



Доклады ТУСУР. 2019 • Том 22, № 3

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442



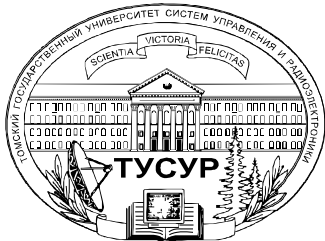
ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2019 • Том 22, № 3



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2019, том 22, № 3**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

А.А. Шелупанов, д.т.н., проф., президент, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, дважды лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701> (гл. редактор).

В.М. Рулевский, к.т.н., доцент, ректор, ТУСУР, директор НИИ АЭМ ТУСУРа, Томск, Россия (зам. гл. редактора).

В.Н. Масленников, к.т.н., доцент, ТУСУР, Томск, Россия (ответственный секретарь).

М.П. Батура, д.т.н., проф., гл. науч. сотрудник, БГУИР, заслуженный работник образования Республики Беларусь, Минск, Беларусь.

Б.А. Беляев, д.т.н., проф., зав. лабораторией ЭИСВЧЭ, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, заслуженный изобретатель России, Красноярск, Россия.

Ян Браун (Jan G. Brown), PhD, Национальная лаборатория им. Лоуренса, Беркли, Калифорния, США.

С.А. Гаврилов, д.т.н., проф., проректор по ИР, НИУ «Московский институт электронной техники» (МИЭТ), лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2967-272X>.

Ю.П. Ехлаков, д.т.н., проф., зав. каф. автоматизации обработки информации, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, Томск, Россия.

В.М. Исаев, д.т.н., первый заместитель директора, Мытищинский НИИ радиоизмерительных приборов, почетный работник науки и техники РФ, почетный работник электронной промышленности, Мытищи, Московская обл., Россия.

А.В. Кобзев, д.т.н., проф., проф. каф. промышленной электроники, ТУСУР, Томск, Россия, почетный работник науки и техники РФ, почетный работник высшего профессионального образования России, Томск, Россия.

А.М. Кориков, д.т.н., проф., зав. каф. автоматизированных систем управления, ТУСУР, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник науки и техники РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, Томск, Россия.

Ю.Н. Кульчин, д.ф.-м.н., академик РАН, директор, ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН», Владивосток, Россия.

В.Ш. Меликян (Vazgen Shavarsh Melikyan), д.т.н., проф., чл.-корр. НАН Республики Армения, ЗАО «Синописис Армения», Ереван, Республика Армения, заслуженный деятель науки Республики Армения, Армения, Ереван, <https://orcid.org/0000-0002-1667-6860>.

С.Д. Одинцов, д.ф.-м.н., проф., иностранный член Норвежской академии наук, проф. Института космических исследований, Барселона, Испания.

Е.М. Окс, д.т.н., проф., зав. каф. физики, ТУСУР, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9323-0686>.

Э.Д. Павлыгин, к.т.н., зам. ген. директора по науке, ФНПЦ АО «Научно-производственное объединение (НПО) «МАРС», Ульяновск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6255-8865>.

Н.А. Ратахин, д.ф.-м.н., академик РАН, директор, Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3820-8777>.

В.К. Сарьян, д.т.н., проф., академик Национальной академии наук (НАН) Республики Армения, проф., Московский физико-технический институт (МФТИ), научный консультант, НИИ радио, заслуженный работник связи РФ, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Москва, Россия.

А.Р. Сафин, к.т.н., доц., НИУ «МЭИ», Москва, Россия.

П.Е. Троян, д.т.н., проф., директор департамента образования, ТУСУР, почетный работник высшего профессионального образования РФ, почетный работник науки и техники РФ, Томск, Россия.

И.А. Ходашинский, д.т.н., проф., проф. каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа, вед. науч. сотрудник лаб. медико-биологических исследований (ЛМБИ), Томск, Россия.

В.В. Шайдуров, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, зав. отделом, ФГБУН «Институт вычислительного моделирования СО РАН», научный руководитель научного направления «Математическое моделирование», Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), Красноярск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7883-5804>.

С.М. Шандаров, д.ф.-м.н., проф., зав. каф. электронных приборов, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, член Оптического общества Америки (OSA), член Международного НТО IEEE/LEOS, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-9308-4458>.

Ю.А. Шурыгин, д.т.н., проф., директор департамента управления и стратегического развития, ТУСУР, научный руководитель НИИ АЭМ ТУСУРа, зав. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, почетный работник науки и техники РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Томск, Россия.

Адрес редакции: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР, тел. (382-2) 51-21-21

Свидетельство о регистрации МНС РФ № 1027000867068 от 13 октября 2004 г.

Подписной индекс 20648 в каталоге агентства «Роспечать»: газеты и журналы.

Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел. (382-2) 51-21-21.

Верстка, техническое редактирование, подготовка оригинал-макета В.М. Бочкаревой
Корректор В.Г. Лихачева.

Editorial board

- Alexander A. Shelupanov** Editor in Chief, President of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Education, Twice Laureate of the Russian Federation Government Prize in Science and Technology, Tomsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701> (ch. Editor).
- Viktor M. Rulevskiy** Deputy Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics (RI AEM) TUSUR, Candidate of Engineering.
- Viktor N. Maslennikov** Executive Secretary of the Editor's Office, Candidate of Engineering.
- Mikhail P. Batura** Chief Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), Doctor of Engineering, Professor.
- Boris A. Belyaev** Head of the Electrodynamics Department, Institute of Physics SB RAS (Krasnoyarsk), Doctor of Engineering.
- Ian G. Brown** PhD in Plasma Physics, Lawrence Berkeley National Laboratories (California USA).
- Sergei A. Gavrilov** Vice Rector for Research, National Research University of Electronic Technology (MIET, Moscow), Doctor of Engineering, Professor.
- Yury P. Ekhlakov** Head of the Department of Data Processing Automation, TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
- Vyacheslav M. Isaev** First Deputy Director of the Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Engineering.
- Anatoly V. Kobzev** Professor of the Department of Industrial Electronics, TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
- Anatoly M. Korikov** Head of the Department of Automated Control Systems of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
- Yury N. Kulchin** Director of the Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok), Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
- Vazgen Sh. Melikyan** Director of the Academic Department of Synopsis Armenia (Yerevan, Armenia), Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
- Sergey D. Odintsov** International Member of the Norwegian Academy of Science and Letters, Professor at Institute of Space Sciences, Barcelona, Spain, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
- Yefim M. Oks** Head of the Department of Physics, TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
- Eduard D. Pavlygin** First Deputy General Director for Research of Federal Research-and-Production Center JSC R&P Mars, Candidate of Engineering.
- Nikolay A. Ratakhin** Director of Institute of High Current Electronics SB RAS, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
- Vilyam K. Saryan** Scientific Adviser at the Research Institute of Radio (Moscow), Academician of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
- Ansar R. Safin** Associate Professor, Department of Formation and Processing of Radio Signals, National Research University MPEI (Moscow), Candidate of Engineering.
- Pavel E. Troyan** Vice-Rector for Academic Affairs, Head of Department of Physical Electronics, Doctor of Engineering, Professor.
- Ilya A. Khodashinsky** Professor at Department of Complex Information Security of Computer Systems, TUSUR University, Leading Researcher at Laboratory of Medical and Biological Studies (LBMS), Tomsk, Russia, Doctor of Engineering, Professor.
- Vladimir V. Shaidurov** Director of the Institute of Computational Modeling SB RAS (Krasnoyarsk), Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
- Stanislav M. Shandarov** Head of the Department of Electronic Devices, TUSUR University, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
- Yury A. Shurygin** First Vice-Rector of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.

 Содержание

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Светличный Ю.А., Дегтярев П.А. Синхронизация и передача данных в радиотехнических системах с территориально распределенными сегментами	7
Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Шкиндеров, М.С., Архипов А.О. Моделирование искажения сигналов в микрополосковой линии со щелью в слое земли	13
Маковкин В.И., Замятин Н.В. Модель прохождения лазерного излучения через запыленные и мутные среды в резервуарах	18
Фролов С.Г., Корилов А.М. Обнаружение и локализация дефектов в трубопроводных сетях	23

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Соловьев М.Л., Минеева Т.Е., Конев А.А., Буинцев Д.Н. Модель угроз безопасности, возникающих при управлении системой защиты информации	31
Куртукова А.В., Романов А.С. Моделирование архитектуры нейронной сети в задаче идентификации автора исходного кода	37
Новохрестова Д.И., Костюченко Е.Ю., Катаева Е.С., Буймов А.Г., Буинцев Д.Н. Программный комплекс по оценке разборчивости речи	43
Катаева Е.С., Якимук А.Ю. Применение метода выделения синхронности при оценке сходства вокальных исполнений	49
Шабля Ю.В., Кручинин Д.В. Модификация метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе применения теории производящих функций	55
Горитов А.Н., Бодрухин А.А. Сравнение методов выделения особых точек объектов на изображениях рабочей сцены робота-манипулятора	61
Носков С.И., Вергасов А.С. Прогнозирование по регрессионной модели с применением элементов теории сходства	67
Торгаева Д.С., Сухоруков М.П., Шурыгин Ю.А., Шиняков Ю.А., Шаляпина Н.А. Имитационное моделирование установки штангового глубинного насоса для добычи нефти	71
Кочергин М.И., Торгаева Д.С., Сухоруков М.П., Дмитриев В.М., Шурыгин Ю.А. Многоуровневое моделирование физико-технических задач на примере глубинного насоса	79
Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг Идентификация диагностических параметров фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин	87

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Юдинцев А.Г. Энергопреобразующие комплексы для наземной обработки и подтверждения прогнозируемой надёжности систем электропитания космических аппаратов	95
Хорошев М.А., Харитонов С.А. Анализ динамических процессов в системе генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты для летательных аппаратов	103
Осипов А.В. Определение характеристик фазовой подстройки частоты в последовательном резонансном преобразователе при широтно-импульсном регулировании	111
Шилин А.А., Момот П.М., Букреев В.Г. Оценка скорости вращения электродвигателя по спектральному составу тока потребления	117
Однокопылов Г.И., Букреев В.Г., Шевчук В.А., Шилин А.А. Исследование эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в горнорудной промышленности	125
Требования	132

ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Svetlichniy Y.A., Degtyarev P.A. Synchronization and Data Transmission in Multistatic Radar Systems.....	7
Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M., Shkinderov M.S., Arkhipov A.O. Simulation of signal distortion in a microstrip line with a gap in the ground layer	13
Makovkin V.I., Zamyatin N.V. Modeling the propagation of laser radiation in dusty and turbid media in tanks.....	18
Frolov S.G., Korikov A.M. Discovery and localization of defects in pipeline networks	23

CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

Soloviev M.L., Mineeva T.E., Konev A.A., Buintsev D.N. Model of security threats arising from the management of information security systems	31
Kurtukova A.V., Romanov A.S. Modeling the neural network architecture to identify the author of the source code.....	37
Novokhrestova D.I., Kostyuchenko E.Y., Kataeva E.S., Buymov A.G., Buintsev D.N. Software package for assessing speech intelligibility.....	43
Kataeva E.S., Yakimuk A.Yu. Application of synchronous isolation for evaluating the similarity of vocal performances.....	49
Shablya Y.V., Kruchinin D.V. Modification of the algorithm development method for combinatorial generation based on the application of the generating functions theory	55
Goritov A.N., Bodrukhin A.A. Comparison of feature points detection methods.....	61
Noskov S.I., Vergasov A.S. Predicting a regression model using elements of the theory of similarity	67
Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Shurygin Yu.A., Shinyakov Yu.A., Shalyapina N.A. Simulation of a sucker rod pump for oil production	71
Kochergin M.I., Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Dmitriev V.M., Shurygin Yu.A. Multilevel modeling of physical and technical problems (on the example of the task of modeling forces on the rod of a sucker rod pump).....	79
Sergeev V.L., Dong V.H. Identification of filtration flow diagnostic parameters during hydrodynamic studies of horizontal wells	87

ELECTRICAL ENGINEERING

Yudintsev A.G. Energy conversion complexes for ground testing of spacecraft power supply systems	95
Khoroshev M.A., Kharitonov S.A. Analysis of dynamic processes in the electric power generating system of variable frequency for aircrafts	103
Osipov A.V. Characterization of phase adjustment of frequency in a series resonant converter with pulse-width regulation.....	111
Shilin A.A., Momot P.M., Bukreev V.G. Estimating of DC motor rotational speed by the spectral structure of consumed current.....	117
Odnokopylov G.I., Bukreev V.G., Shevchuk V.A., Shilin A.A. Exploration AC electrical machines operational reliability in mining industry	125
Manuscript requirements	132

**ЭЛЕКТРОНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 621.396.91/.96

Ю.А. Светличный, П.А. Дегтярев

Синхронизация и передача данных в радиотехнических системах с территориально распределенными сегментами

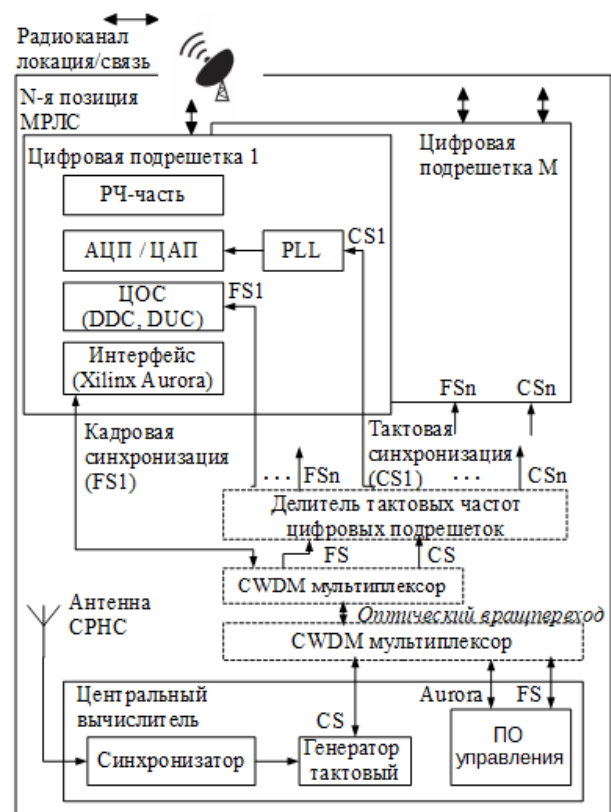
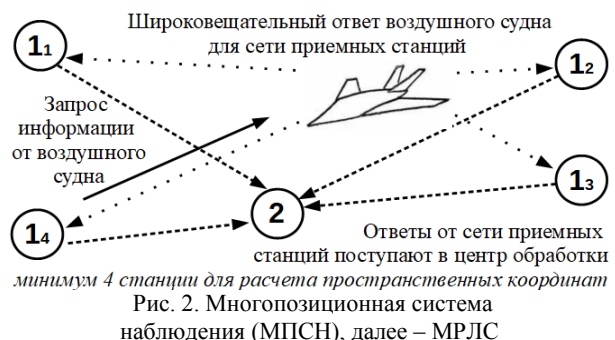
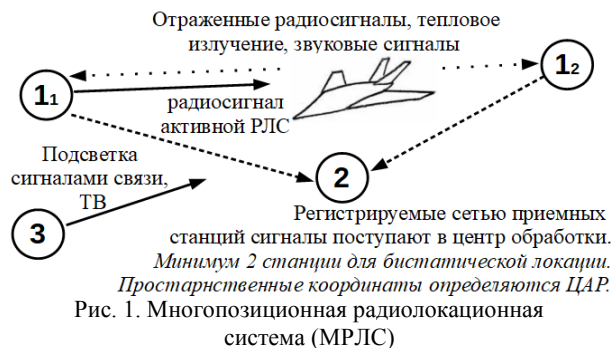
Рассматриваются практические аспекты синхронизации и передачи данных в радиотехнических системах развивающегося сегмента – многопозиционных радиолокационных системах. Активные, полуактивные, пассивные многопозиционные системы имеют схожие принципы обработки сигналов, где определяющим элементом достижения потенциальной точности является синхронизация разнесенных позиций, а для возможности кооперативной обработки информации необходима межпозиционная передача данных. Особенную актуальность имеют технические решения, позволяющие реализовывать мобильные и автономно действующие сегменты многопозиционных систем, размещаемые на беспилотных средствах и в районах с отсутствующей инфраструктурой. Приведены схемы синхронизации и передачи данных, полученные в практических применениях многопозиционных станций нескольких типов. Алгоритмы радиолокации и передачи данных реализованы на единой аппаратной платформе, выполненной по принципу программно-определяемой радиосистемы.

Ключевые слова: синхронизация, связь, передача данных, цифровая антенная решетка, многопозиционная система наблюдения, мультистатическая радиолокационная система, программно-определяемая радиосистема.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-7-12

В последние годы к системам наблюдения за объектами предъявляются новые требования по параметрам чувствительности, информативности, достоверности информации при возможности скрытой работы. В связи с этим повышенное внимание уделяется радиотехническим комплексам с территориально распределенными сегментами антенных систем: пассивным пеленгаторам, бистатическим радиолокаторам с использованием «просветного эффекта», пассивным и полуактивным мультистатическим РЛС, РЛС с синтезированной апертурой, мултилатерационным (наземным многопозиционным) системам (рис. 1, 2).

Типовая функциональная схема одной позиции МРЛС с цифровой антенной решеткой (ЦАР) приведена на рис. 3 [1].



Математические выражения для определения погрешности местоположения объектов прямо связаны с относительной точностью взятия временных отсчетов распределенных сегментов МРЛС, а для достижения потенциальных характеристик методов расчета координат наблюдаемых объектов критерии точности синхронизации должны быть однозначно сформулированы и безусловно обеспечены.

В части передачи данных интерес представляют параметры приемопередающей аппаратуры МРЛС, необходимые для обеспечения работы алгоритмов

радиолокации и радиосвязи на единой аппаратной платформе, в частности – допустимый для различных видов модуляции уровень амплитудно-фазовых искажений.

Требуемая точность синхронизации, пропускная способность каналов передачи данных, равно как и методы их обеспечения, могут существенно отличаться для различных видов радиотехнических систем. Сложность практической реализации схем синхронизации высокой точности, отсутствие глубоко изученных и общепризнанных методов синхронизации и передачи данных в многопозиционных системах ограничивают их развитие или накладывают ограничения на использование возможностей систем с разнесенными позициями в полной мере. Практически достигнутые результаты временной синхронизации и передачи данных разнесенных позиций в известной литературе подробно не описаны, известные технические решения реализуются, как правило, только на стационарно развернутых каналах передачи данных и синхронизации. Возможности достижения теоретически рассчитываемой потенциальной точности измерений в многопозиционных системах, основанные в том числе на альтернативных методах расчета пространственных координат и обеспечения синхронизации [2–4], в широкой практике не применяются, но безусловно должны быть проанализированы в перспективе.

В данной работе ставятся задачи уточнения математических зависимостей характеристик МРЛС от погрешностей синхронизации их территориально распределенных сегментов, обобщения основных математических зависимостей, достаточных для оценки бюджета МРЛС, формулирования требований к приемопередающей аппаратуре, способной обеспечивать алгоритмы радиолокации и радиосвязи с заданными параметрами на единой программно-аппаратной платформе, апробации типовых схем и методов синхронизации и передачи данных в системах с распределенными сегментами, расположенными на мобильных носителях и в условиях отсутствия коммуникационной инфраструктуры.

Математические зависимости

Рассмотрим математические зависимости для расчета координат наблюдаемых объектов от времени. В общем случае зависимость основного параметра, определяемого многопозиционными станциями – дальности до наблюдаемого объекта, разностно-дальномерным методом без учета местоположения разнесенных позиций, может быть представлена в виде (1):

$$\sigma_D = \frac{c \cdot \sqrt{\sigma_{i\tau}^2 + \sigma_{iR}^2}}{(d/D_0)^2}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; $\sigma_{i\tau}$ – погрешность внутренних часов; σ_{iR} – погрешность определения времени прихода ответного сигнала; d – расстояние между позициями; D – расстояние до объекта обнаружения.

Погрешность определения дальности прямо пропорциональна составляющим погрешности внутренних часов и погрешности определения времени прихода ответного сигнала [5], что при реализации схемы синхронизации разнесенных позиций накладывает требования к предельной величине обоих видов погрешностей.

Погрешность определения времени прихода ответного сигнала, как правило, обратно пропорциональна ширине спектра радиосигнала, минимизируется известными корреляционными методами обработки и для сигналов с полосой от 10 МГц составляет от 10 до 100 нс (до 30 м по дальности) в зависимости от вида сигнала и схемы обработки.

Погрешность внутренних часов зависит от программно-аппаратных средств синхронизации станций и может существенно отличаться в зависимости от примененных технических решений, при этом предельно допустимая величина находится в пределах 10 нс временного интервала (около 3 м по дальности) [6].

Для оценки качества канала передачи данных важнейшим параметром является вероятность битовых ошибок в канале, которая для радиосвязи с квадратурно-амплитудной модуляцией (М-КАМ) может быть представлена в виде (2) [7]:

$$P_{QAM}(e) = \frac{1}{N_1} \cdot \sum_m \{J \cdot (1, m, 0, \sqrt{\gamma/N_2}, \sigma_{\psi}^2)\}, \quad (2)$$

где N_1 – коэффициент порядка модуляции; m – индексы порядка модуляции; γ – отношение сигнал/шум приемника (ОСШ); σ_{ψ} – ошибка фазы приемник–передатчик.

Скорость передачи данных по радиоканалу для МРЛС с временным разделением между режимами радиолокации и связи может быть определена согласно (3):

$$R = \frac{\Delta F}{2} \cdot \log_2 N \cdot R_S \cdot T_S, \quad (3)$$

где ΔF – полоса сигнала; N – размерность модуляции; R_S – эффективность протокола; T_S – коэффициент использования канала во времени.

Дальность действия радиоканала при выбранном ОСШ с учетом допустимой ошибки определяется бюджетом радиоканала. ОСШ в канале радиосвязи с учетом его параметров может быть рассчитано согласно (4) [8]:

$$M = P_{\text{пер}} + G_{\text{прм}} + G_{\text{прд}} - L_S - L_0 - P_S, \quad (4)$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, дБм; $G_{\text{прм}}$ – коэффициент усиления (КУ) приемной антенны, дБ; $G_{\text{прд}}$ – КУ передающей антенны, дБ; L_S – потери на трассе, дБ; L_0 – потери в приемопередающей аппаратуре, дБ; P_S – чувствительность приемника, дБм.

Программно-аппаратная реализация

Для мобильных и размещаемых в районах с отсутствующей коммуникационной инфраструктурой МРЛС для синхронизации позиций и передачи данных между ними должны использоваться свободные от необходимости использования кабельных каналов методы.

Для синхронизации позиций в указанных условиях наилучшим образом может подойти схема на основе известных технических решений с использованием спутниковых радионавигационных систем (СРНС), совмещенная с резервной схемой синхронизации по радиосигналам локальной системы единого времени [9]. При этом достигаемая точность синхронизации таких схем оказывается не лучше 100 нс, что требует дополнительных мероприятий по улучшению полученных показателей – например, путем использования методов усреднения временных отметок за определенный временной интервал (метод накопления) и последующего исключения постоянной составляющей [10]. В предложенной схеме синхронизации усреднение выполняется специализированной интегральной схемой на основе принципа прямого цифрового синтеза (рис. 4).

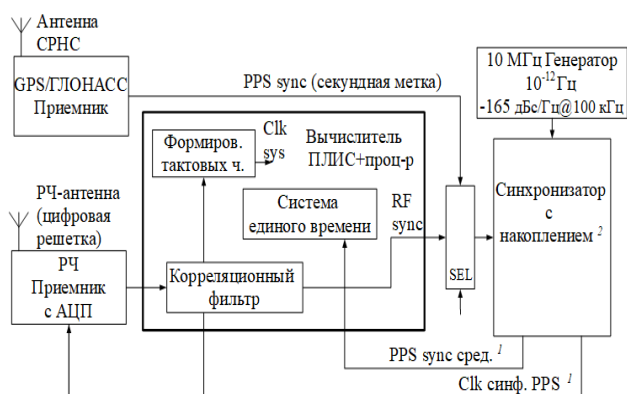


Рис. 4. Схема синхронизации позиции: 1 – уточненный сигнал синхронизации и синфазный ему тактовый сигнал генератора; 2 – уточнение секундной метки СРНС или локального радиосигнала синхронизации

Указанный способ позволяет формировать одновременно высокоточную кадровую метку для внутренних системных часов (PPS sync сред.) и синфазную ей тактовую частоту 50–125 МГц (Clk синф. PPS) для связанных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) разнесенных позиций.

Для передачи данных наиболее простым и надежным вариантом является использование встроенного радиомодема с М-КАМ-модуляцией, где скорость передачи данных может масштабироваться в зависимости от порядка модуляции, при этом, с целью обеспечения наилучшей помехоустойчивости следует использовать минимально возможный порядок, исходя из допустимых требований производительности канала передачи данных МРЛС [8]. В процессе выполнения работ по реализации МРЛС достаточная скорость передачи данных определена на уровне 2,5 Мбит/с при коэффициенте использования во времени, равном 0,2 [в соответствии с (3)], достаточные виды модуляции – от QPSK до QAM-16.

Совмещение алгоритмов радиолокации и радиосвязи выполнено на единой программно-аппаратной платформе с использованием принципа программно-определяемой радиосистемы. Основными модулями программно-аппаратной платформы яв-

ляются радиотрансиверы, высокоинтегрированные вычислительные средства на базе процессоров и программируемой логики. Антенная система представляет собой масштабируемую по количеству каналов и перестраиваемую в широком частотном диапазоне ЦАР.

Результаты проверки

Проверка синхронизатора проводилась по эфирным сигналам СРНС GPS/ГЛОНАСС на стенде, обеспечивающем условия, приближенные к условиям эксплуатации. Для исключения разницы в условиях приема сигналов разными модулями – мешающие отражения, разные созвездия спутников и др. – для приема сигналов СРНС использовалась общая антенна. СКО расхождения внутренних часов двух устройств синхронизации составило менее 5 нс, что на порядок лучше результата синхронизации по сигналам приемников СРНС непосредственно.

Для многопозиционного доплеровского радиолокатора для правильной оценки скоростей обнаруживаемых целей кроме абсолютной временной привязки важна когерентность тактовых генераторов разнесенных позиций. Предложенная схема синхронизатора позволяет формировать на разнесенных позициях когерентные гетеродины с точностью до погрешности за счет использования схемы формирования синфазных меток внутренних часов и частоты тактового генератора (см. рис. 4). Проверка работы синхронизатора в данном режиме проводилась в условиях опытной эксплуатации бистатического радиолокатора с ЦАР. Эксперимент проводился на автономно функционирующих разнесенных позициях МРЛС, передающая и приемные позиции были разнесены на расстояние около 15 000 м. Передающей станцией излучался периодический импульсный ЛЧМ-сигнал с постоянной фазой, на приёмной стороне анализировался дрейф фазы принимаемого радиосигнала с течением времени, что принималось за меру когерентности тактовых генераторов разнесенных позиций. По результатам эксперимента дрейф фазы за период накопления 0,1...0,2 с не превышает 3°, что находится ниже уровня погрешностей вычисления и не влияет на итоговую ошибку оценки скорости доплеровской МРЛС.

Проверка режима передачи данных проводилась на ранее описанной опытной позиции бистатического радиолокатора. Для передачи данных был реализован пакетный радиомодем с модуляцией QAM-16, обеспечивающий достаточную для МРЛС скорость передачи данных и способный к работе в режиме временного разделения режимов локации и передачи данных. Для исправления ошибок применено избыточное кодирование Рида–Соломона (РС) как наиболее эффективное по критериям: качество, сложность реализации, допустимая вероятность ошибки в канале. Параметры приемопередающей аппаратуры соответствовали условиям: компрессионные искажения – 0 дБ, отклонение фазы на разнесенных позициях – не хуже 3°, ОСШ – 15-20 дБ (соответствующие зависимости вероятности ошибок в канале связи без учета возможности восстановле-

ния, рассчитанные на основе (2), приведены на рис. 5). В наихудшем случае – 15 дБ ОСШ и отклонение фазы 3° , вероятность неправильного приема пакета длиной 255 байт, восстановленного кодом РС с избыточностью 25%, составило 0,05%.

Выводы

1. Погрешность синхронизации позиций МРЛС, применяющих разностно-дальномерные методы оценки координат наблюдаемых объектов, складывается из погрешности шкалы времени внутренних часов и погрешности определения времени прихода ответного сигнала. Соотношения указанных составляющих необходимо учитывать при выборе метода синхронизации позиций – важна минимизация обоих типов погрешностей.

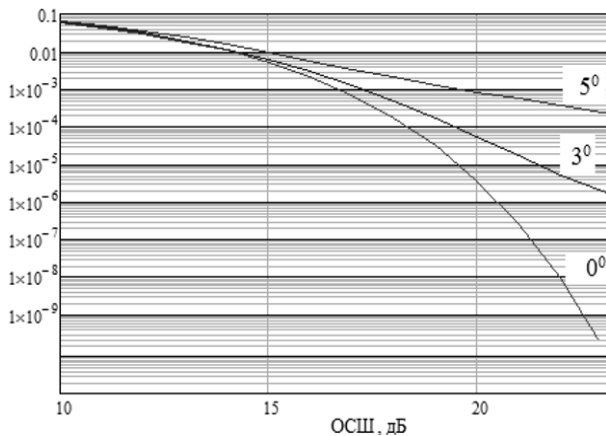


Рис. 5. Характеристики ошибок канала связи

2. Использование методов усреднения синхросигналов (накопления) позволяет повысить точность привязки шкалы времени примерно на порядок относительно их текущих параметров – до нескольких единиц нс в абсолютном выражении и обеспечить возможность синхронизации позиций с приемлемой точностью при временном пропадании сигналов СРНС (до 30 мин) в случае использования в схеме синхронизатора высокостабильного генератора с кратковременной стабильностью (девиацией Аллана) не хуже 10^{-12} Гц. В случае сбоев или пропадания сигналов СРНС на время более 30 мин в качестве альтернативного источника синхросигналов целесообразно использовать локальную синхронизацию путем передачи синхронизирующего радиоимпульса передающим каналом РЛС.

3. Для мобильных и размещаемых в труднодоступных районах с отсутствующей коммуникационной инфраструктурой МРЛС наиболее приемлемыми методами синхронизации и передачи данных является методы на базе радиоканала. Для реализации алгоритмов радиолокации и передачи данных в МРЛС может быть использована предложенная единая программно-аппаратная платформа, реализованная по принципу программно-определяемой радиосистемы.

4. Определенные параметры приемопередающей аппаратуры позволяют реализовывать совмещенные режимы радиолокации и передачи данных

на единой программно-аппаратной платформе, что экономит частотный ресурс, уменьшает общее количество и стоимость радиоаппаратуры, при определенных условиях обеспечивает большую устойчивость к помехам, большую дальность связи. При необходимости уменьшения вероятности ошибок возможно использование более сложных алгоритмов восстановления или предъявление более жестких требований к приемопередающей аппаратуре и взаимной синхронизации позиций.

Литература

1. Светличный Ю.А. Техническая реализация систем ЦОС в радиотехнических комплексах с распределенными модулями на зарубежной и отечественной ЭКБ // 21-я Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2019» (27–29 марта 2019). – М., 2019. (Сб. докладов: кн. 2). – С. 442–447.
2. Кирюшкин В.В. Определение координат воздушного судна в полуактивной системе мультilaterации с синхронизацией приемных позиций по запросному сигналу / В.В. Кирюшкин, Н.С. Волков, А.М. Медведев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. – № 2. – С. 24–32.
3. Кирюшкин В.В. Исследование точности определения координат воздушной цели в спутниковой-псевдоспутниковой многопозиционной системе наблюдения / В.В. Кирюшкин, Е.А. Дьяконов // Междунар. информ.-аналит. журн. «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». – 2017. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tochnosti-opredeleniya-koordinat-vozdushnoy-tseli-v-sputnikovoy-psevdosputnikovoy-mnogopozitsionnoy-sisteme> (дата обращения: 20.06.2019).
4. High-Precision Synchronized Pulse Generation for Mobile Multistatic Radar System / Zhu Li-Chen, Zhao Chen-Ning, Guo Qing-Zi, Bu Xiang-Yuan // Advances in Computer Science Research. – 2017. – Vol. 44. – P. 458–463.
5. Монаков А.А. Алгоритм оценки координат объектов для систем мультilaterации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 4. – С. 38–46.
6. Multilateration error investigation and classification. Error estimation. // Transport and Telecommunication. – 2007. – Vol. 8, No. 2. – P. 28–37.
7. Артеменко А.А. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-КАМ системах передачи данных / А.А. Артеменко, А.А. Мальцев, А.Е. Рубцов // Вест. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 2. – С. 81–87.
8. Польшинкин А.В. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами / А.В. Польшинкин, Х.Т. Ле // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 7, ч. 2. – С. 98–107.
9. Experimental Research of Multistatic Passive Radar with a Single Antenna for Drone Detection / Fang Gao, Wan Xianrong, Yi Jianxin, Liu Yuqi // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 33542–33551.
10. Rama Chellappa. Academic Press Library in Signal Processing // Array, Radar and Communications Engineering. Academic Press. – 2018. – Vol. 7. – 626 p.
11. Борзов А.Б. Перспективы реализации локальных радионавигационных систем на базе многопозиционных РЛС / А.Б. Борзов, С.В. Микаэльян // Вестник СибГУТИ. – 2015. – №2. – С. 198–208.
12. Потенциальные возможности синхронизации шкал времени удаленных объектов по сигналам ГНСС / А.В. Гребенников, М.Ю. Казанцев, А.П. Кудревич, С.В. Си-

засов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 10. – С. 113–116.

13. Монаков А.А. Модифицированный алгоритм Банкрофта для систем мультilaterации // Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 1. – С. 50–55.

14. Крючков И.В. Синхронизация подвижных модулей распределенных радиолокационных комплексов / И.В. Крючков, А.А. Филатов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2012. – С. 45.

15. Колмогоров О.В., Шабанов В.П. Синхронизация шкал времени наземных средств радионавигационных систем и шкал времени пространственно-удаленных эталонов с использованием волоконно-оптических линий связи // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: Изд-во НПП «Радиосвязь», 2018. – С. 116–119.

16. Куличков К.А., Шабанов В.П. Экспериментальная оценка погрешности системы синхронизации с использованием комбинированного сигнала частотно-временной синхронизации // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: Изд-во НПП «Радиосвязь», 2018. – С. 141–144.

17. Титов М.П. Временная синхронизация при бистатическом синтезировании апертуры антенны в космических РСА // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2017. – № 4. – С. 44–51.

Светличный Юрий Алексеевич

Директор центра исследований и разработок ПАО «НПО «Алмаз» в г. Томске (ООО «ЛЭМЗ-Т») Развития пр-т, д. 8, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 48-85-27
Эл. почта: svetlichny_ya@lemz-t.ru

Дегтярев Павел Алексеевич

Канд. техн. наук, нач. сектора центра исследований и разработок ПАО «НПО «Алмаз» в г. Томске (ООО «ЛЭМЗ-Т») Развития пр-т, д. 8, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 48-85-27
Эл. почта: degtyarev_pa@lemz-t.ru

Svetlichny Y.A., Degtyarev P.A.

Synchronization and Data Transmission in Multistatic Radar Systems

The article deals with the practical aspects of synchronization and data transferring in multistatic radar systems. Active, semi-active, passive multistatic systems have similar principles of signal processing, where the determining element of achieving potential accuracy is the synchronization unit, especially in wireless mode. Radiocommunication, radiolocation algorithms are based at common SDR software-hardware platform. The work is focused on typical schemes and methods of distributed multiposition radar synthesis and testing. Synchronization and communication schemes and test results, achieved in practical applications, are presented.

Keywords: synchronization, communication, multilateration, multistatic, radar, surveillance system.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-7-12

References

1. Svetlichny Y.A. *Tekhnicheskaya realizaciya sistem cifrovoi obrabotki signalov v radiotekhnicheskikh kompleksah s raspredelennymi modulyami na zarubegnoi i otechestvennoi elektronnoy baze* [Design DSP units for multistatic radar] // XXI International conference DSPA–2019». М., 2019, pp. 442–447 (in Russ).

2. Kirushkin V.V. *Opreделение koordinat vozduzhnogo sudna v poluaktivnoi sisteme multilateracii s sinhronizaciey priemnyh pozitsiy po zaprosnomu kodu* [Determination of aircraft coordinates in a semi-active multilateration system with synchronization of receiving positions by a request signal] / V.V. Kirushkin, N.S. Volkov, A.M. Medvedev // Information and Measurement Systems, 2019, № 2, pp. 24–32 (in Russ).

3. Kirushkin V.V. *Issledovanie tochnosti opredeleniya koordinat vozduzhnoi tseli v sputnikovoi-psevdosputnikovoi mnogoposicionnoi sisteme nabludeniya* [Investigation of the accuracy of air targets coordinates in satellite multilateration surveillance system] // International information-analytical Journal «Crede Experto: transport, society, education, language». 2017. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tochnosti-opredeleniya-koordinat-vozduzhnoy-tseli-v-sputnikovoy-psevdosputnikovoy-mnogopozitsionnoy-sisteme> (in Russ).

4. Li-Chen Zhu. High-Precision Synchronized Pulse Generation for Mobile Multistatic Radar System // Zhu Li-Chen, Zhao Chen-Ning, Guo Qing-Zi, Bu Xiang-Yuan // Advances in Computer Science Research, vol. 44, 2017, pp. 458–463.

5. Monakov A.A. *Algoritm otsenki koordinat ob'ektov dlya sistem multilateracii* [Estimating object coordinates Algorithm for multilateration systems] // News of Russian universities. Radioengineering, 2018, № 4, pp. 38–46 (in Russ).

6. Yekaterina Trofimova. Multilateration error investigation and classification. Error estimation. Transport and Telecommunication, vol. 8, no. 2, 2007, pp. 28–37.

7. Artemenko A.A. *Vliyanie netochnosti otsenivaniya fazy nesushei na veroyatnost bitovyh oshibok v M-QAM sistemah peredachi dannyh* [Influence of carrier phase estimation inaccuracy on bit error probability in M-QAM data transmission systems] / A.A. Artemenko, A.A. Mal'tsev, A.E. Rubtsov // Vestnik Nizgorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2007, № 2, pp. 81–87 (in Russ).

8. Polynkin A.V. *Issledovanie harakteristik radiokanala svyazi s bezpilotnymi letatelnyimi apparatami* [Research of characteristics of radio channel of communication with unmanned aerial vehicles] / A.V. Polynkin, H.T. Le // Izvestiya TulGU. Technical Science. 2015, № 7, part. 2, pp. 98–107 (in Russ).

9. Gao Fang. Experimental Research of Multistatic Passive Radar with a Single Antenna for Drone Detection / Fang Gao, Wan Xianrong, Yi Jianxin, Liu Yuqi // IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 33542–33551.

10. Rama Chellappa. Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7. Array, Radar and Communications Engineering. Academic Press: 2018, , vol. 7, 626 p.

11. Borzov A.V. *Perspektivy realizacii lokalnyh radio-navigatsionnyh sistem na base mnogopositsionnyh RLS* [Prospects for the implementation of local radio navigation systems based on multi-position radar] / A.V. Borzov, S.V. Mikaelyan // Vestnik SibGUTI. 2015., № 2, p. 198–208 (in Russ).

12. Grebennikov A.V. *Potencialnye vozmozhnosti sinhronizacii vremeni udalennyh obektov po signalam GNSS* [Potential possibilities of synchronization of time scales of remote

objects on GPS signals] / A.V. Grebennikov, M.U. Kazantsev, A.P. Kudrevich, S.V. Sizasov // *Uspehi sovremennoy radioelektroniki*. 2015, №10, pp. 113–116 (in Russ).

13. Monakov A.A. *Modificirovanniy algoritm Bankrofta dlya sistem multilateracii* [A modified Bancroft algorithm for multilateration systems] // *News of Russian universities*. Radioengineering. 2018, № 1, pp. 50–55 (in Russ).

14. Kruchkov I.V. *Synhronizaciya podvignyh moduley raspredelennyh radiolokacionnyh kompleksov* [Mobile modules of distributed radar systems Synchronization] / I.V. Kryuchkov, A.A. Filatov // MGTU im. Baumana. «Instrument Engineering». 2012, pp. 45 (in Russ).

15. Kolmogorov O.V. *Synchronizaciya shkal vremeni nazemnyh sredstv radionavigacionnyh sistem i shkal vremeni prostranstvenno udalennyh etalonov s ispolzovaniem volokonno-opticheskikh liniy svyazi* [Time scales Synchronization of ground radio navigation systems and time scales of spatially remote standards using fiber-optic communication lines] // *Communication and Radio navigation System*. Krasnoyarsk, 2018, pp. 116–119 (in Russ).

16. Kulichkov K.A. *Experimentalnaya otsenka pogreshnosti systemy synhronizatsii s ispolzovaniem kombinirovannogo signala chastotno-vremennoi synhronizatsii* [Experimental estimation of the synchronization system error using

the combined time-frequency signaling signal] // *Communication and Radio navigation System*. Krasnoyarsk, 2018, pp. 141–144 (in Russ).

17. Titov M.P. *Vremennaya synhronizaciya pri bistaticheskoy sintezirovanii apertury anteny (SA) v kosmicheskikh RLS s SA* [Time synchronization in bistatic synthetic aperture antenna (SA) in space-based radars] // *Radioengineering and Communication Systems*. 2017, № 4, p. 44–51 (in Russ).

Yury A. Svetlichniy

Director, Research and Development Center
PAO «NPO «Almaz» (LLC «LEMZ-T»),
8, Razvitiya pr., Tomsk, Russia, 634055
Phone: +7 (382-2) 48-85-27
Email: svetlichniy_ya@lemz-t.ru

Pavel A. Degtyarev

Candidate of Engineering Science, Head of Sector,
Center of PAO «NPO «Almaz» (LLC «LEMZ-T») 8, Razvitiya pr., Tomsk, Russia, 634055
Phone: +7 (382-2) 48-85-27
Email: degtyarev_pa@lemz-t.ru

УДК 621.391.82; 004.3

З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин, М.С. Шкиндеров, А.О. Архипов

Моделирование искажения сигналов в микрополосковой линии со щелью в слое земли

Часто искажение информационных сигналов в печатных платах возникает из-за резонансных эффектов в межсоединениях. Одной из причин резонансных эффектов в межсоединениях печатной платы является наличие щелей в слое земли, которые присутствуют для подключения каких-либо элементов, разъемов и т.п. В работе предложен инструмент для численного моделирования и разработаны имитационные модели для исследования резонансных эффектов в микрополосковой линии со щелью в слое земли. Проведен анализ искажения информационных сигналов в микрополосковой линии из-за резонансных эффектов. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными и указывают на достаточную адекватность разработанных моделей. Показано уменьшение искажений с помощью шунтирующего конденсатора в щели.

Ключевые слова: вычислительная техника, печатная плата, микрополосковая линия, резонанс, слой земли, межсоединение, искажение сигнала, моделирование, эксперимент.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-13-17

Основной чертой развития вычислительной техники (ВТ) является повышение быстродействия. Это ставит перед разработчиками устройств, в основном выполненных на печатных платах (ПП) с микрополосковыми линиями передачи, ряд новых задач. Повышение частоты работы элементов ПП приводит к появлению «паразитных» параметров в топологических элементах (проводниках, экранах, шинах питания), а также в компонентах (индуктивность выводов и т.п.). Поэтому повышение быстродействия требует учета влияния конструкции ПП и особенности передачи сигналов в ней на общие показатели устройства [1, 2].

Основные задачи внутриаппаратурной электромагнитной совместимости (ЭМС), которые уже давно исследуются и учитываются при проектировании высокоскоростных ПП [1–3]: минимизация перекрестных помех; обеспечение согласования линий передач; устранение помех по шинам питания [4]; устранение «отрыва» заземления микросхемы; обеспечение минимальной задержки. Еще одним предметом, актуальным и требующим тщательного исследования, являются резонансные эффекты в микрополосковых линиях ПП [5].

Резонансные явления – это последовательность резонансов различных систем внутри ВТ, таких как межсоединения с реактивной нагрузкой, щели в ПП, щели между ПП и металлическим корпусом, провода, кабели, сам корпус и т.д. Резонансная связь возникает в области одной частоты или, чаще, серии дискретных частот. Таким образом, можно выделить основные причины возникновения резонансных явлений в межсоединениях ПП ВТ: наличие щелей в слое земли, которые присутствуют для подключения каких-либо элементов, разъемов и т.п. Если разъем расположен вблизи линии передачи, резонанс возникает при частотах, когда длина разъема кратна половине длины волны [5]; переходные отверстия между слоями ПП [6, 7]; резонанс металлического корпуса, который ведет себя как высококачественный объемный резонатор [2, 8]; паразит-

ное реактивное сопротивление элементов с сосредоточенными параметрами [1, 2]; расположенные вблизи ПП различные проводники (например, коаксиальные кабели, провода, механические крепления), которые не заземлены вообще или заземлены только в некоторых местах [4]. Также резонанс внутри металлического корпуса ВТ часто возникает при воздействии внешних широкополосных источников, например электростатического разряда, разряда молнии и др. [9–12].

Эти эффекты могут существенным образом влиять на искажение информационных сигналов [1, 3, 13], электромагнитное излучение от ПП [14–16] и другие не менее важные аспекты ЭМС. При длительности фронта цифрового сигнала менее 1 нс необходимо комплексное решение этих и ряда других задач. В противном случае разработчикам сложно рассчитывать на успех своего изделия. Конечным результатом решения этих задач является рациональная топология и компоновка элементов ПП ВТ.

Задача анализа резонансных эффектов в межсоединениях ПП стала широко обсуждаться в течение последнего времени, в основном в зарубежных симпозиумах и конференциях [2, 5–8]. Практически все эти материалы сводятся к констатации факта существования данных эффектов, содержат некоторые рекомендации по их уменьшению и предлагают экспериментальные подходы к анализу. Однако экспериментальные методы требуют наличия специального оборудования и условий (например, экранированные комнаты), которое не по средствам каждому исследователю или предприятию-изготовителю ВТ. В связи с этим возникает задача анализа резонансных эффектов в межсоединениях ПП ВТ путем математического моделирования.

Целью данной работы является разработка имитационных моделей и анализ искажения информационных сигналов в микрополосковой линии из-за резонансных эффектов. При этом исследование резонансных эффектов ведется в широком диапазоне частот с высокой разрешающей способностью по

частоте, в результате чего снижается вероятность потери острых резонансных пиков. Для сравнения результатов моделирования используются известные данные, полученные для экспериментальных печатных плат [5]. Анализ искажения сигналов с субнаносекундными параметрами в микрополосковой линии представлен во временной области.

Методы и модели для исследования искажения сигналов в микрополосковой линии

В рамках данной работы были рассмотрены возможности программы Microwave Studio (MWS) фирмы Computer Simulation Technology [17]. Программа MWS использует метод конечного интегрирования. Данный метод позволяет автоматически выбирать оптимальные для данной задачи метод решения и способ разбиения. Для улучшения моделирования объемных структур произвольной геометрической формы также реализован метод аппроксимации для идеальных граничных условий. При этом геометрия задачи задается в виде входных данных.

Исследование резонансных эффектов в микрополосковой линии проводится с помощью численных моделей, имитирующих экспериментальные платы [5] (рис. 1). Параметры щели в слое земли: ширина 1 мм, длина 35, 50, 65, 80 мм. Во втором варианте исследования щель в слое земли (длина 80 мм) соединяется в середине шунтирующим конденсатором емкостью 100 пФ. Источник P1 и нагрузка P2 имеют сопротивление 50 Ом. В данных моделях также учитываются потери в проводниках и диэлектрическом основании.

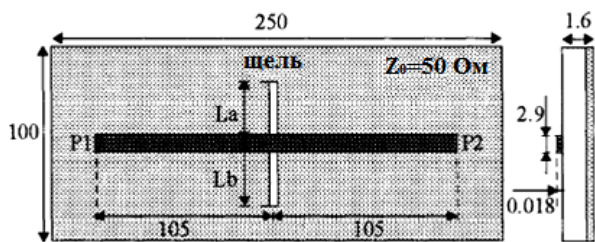


Рис. 1. Экспериментальная плата с микрополосковой линией передачи и поперечным щелевым резонатором в слое земли (все размеры в мм)

Имитационная модель, реализованная в MWS, представлена на рис. 2. Область исследования во всех численных моделях представляет собой прямоугольную область с открытыми границами.

Результаты исследования

При выполнении анализа резонансных эффектов в микрополосковой линии полученные результаты моделирования (рис. 3) сравниваются с результатами экспериментальных исследований (рис. 4) [5].

Полученные результаты исследования показывают, что если в слое земли микрополосковой линии присутствует щель, то коэффициент передачи $|S_{21}|$ на определенной полосе частот существенно уменьшается, и эти частоты зависят от длины щели. Предполагается, что это происходит из-за того, что обратный ток, протекающий вдоль плоскости земли, де-

лает обход вокруг щели, что вызывает задержку фазы. Таким образом, предложенный инструмент позволяет достаточно точно рассчитать параметры возникающих резонансных эффектов из-за наличия щели в слое земли тестовой структуры ПП.

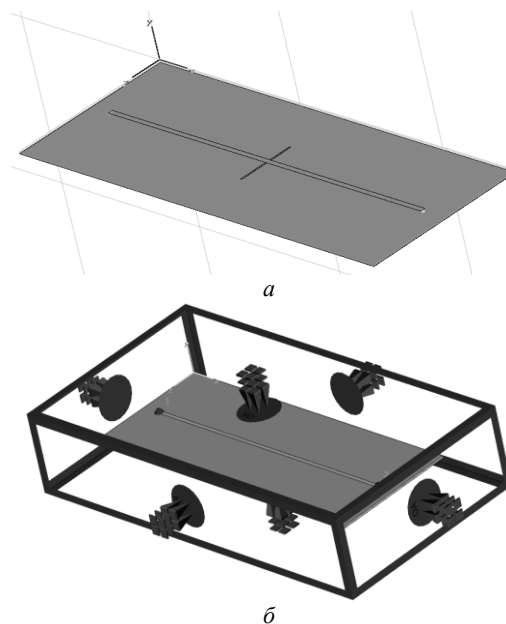


Рис. 2. Имитационная модель ПП (а) и конфигурация области исследования (б)

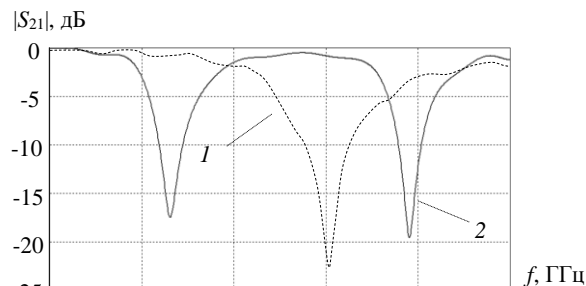


Рис. 3. Вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ при длине щели в слое земли: 1 – 35 мм; 2 – 80 мм

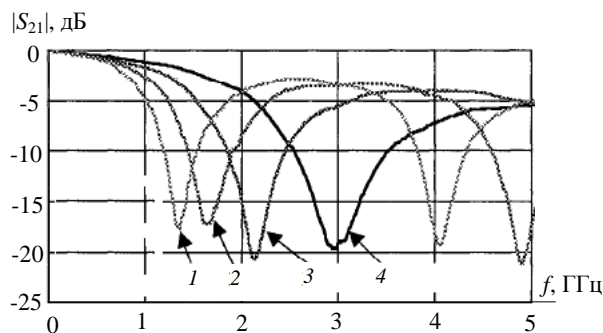


Рис. 4. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ при длине щели в слое земли: 1 – 80 мм; 2 – 65 мм; 3 – 50 мм; 4 – 35 мм

Примеры результатов моделирования искажения сигнала в микрополосковой линии при отсутствии шунтирующего конденсатора, представлены на рис. 5–9.

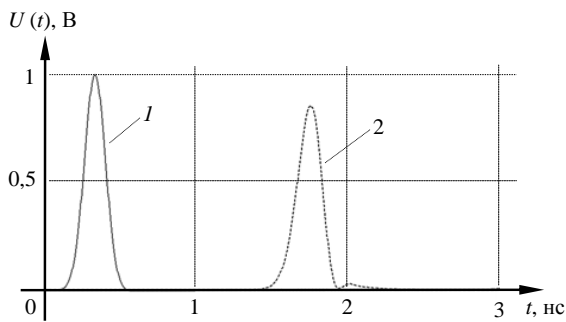


Рис. 5. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; без щели)

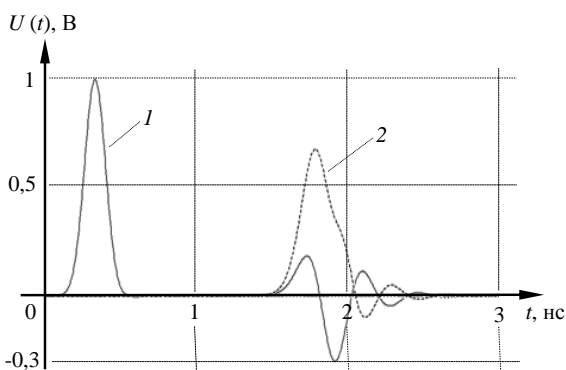


Рис. 6. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 35 мм)

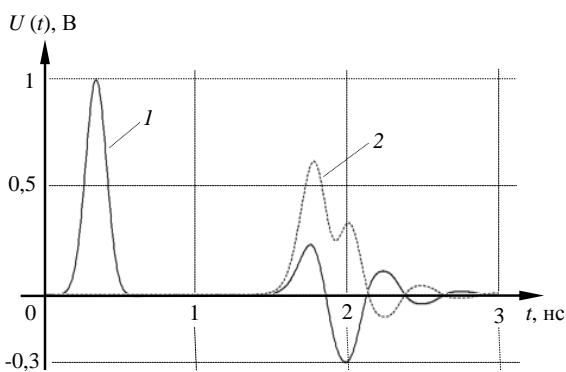


Рис. 7. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 50 мм)

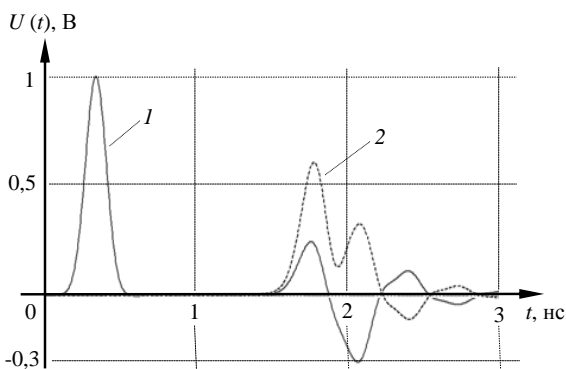


Рис. 8. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 65 мм)

Для случая, когда щель в слое земли соединяется в середине конденсатором емкостью 100 пФ, ре-

зультат моделирования информационного сигнала в микрополосковой линии представлен на рис. 10.

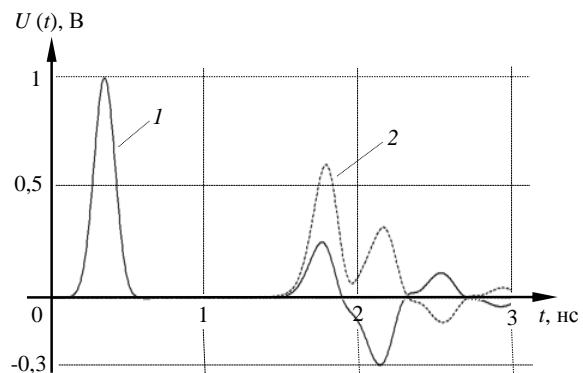


Рис. 9. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 80 мм)

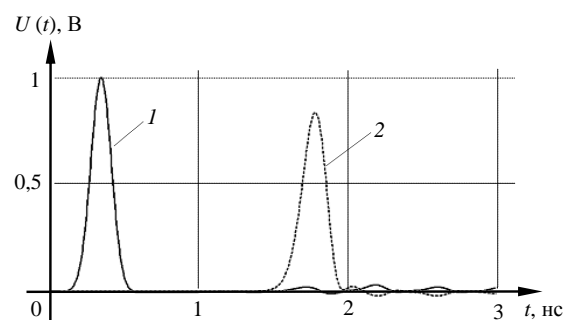


Рис. 10. Временная форма напряжения в микрополосковой линии при наличии шунтирующего конденсатора в щели в слое земли (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 80 мм)

Анализ информационных сигналов в межсоединениях показывает, что чем больше длина щели в слое заземления микрополосковой линии, тем больше влияние резонансных эффектов на его передачу. Это выражается в существенном снижении амплитуды сигнала и искажении формы. Примечательно и увеличение амплитуды отражения от щели, приходящее в начало линии.

Для снижения резонансных эффектов в межсоединениях ПП, связанных со щелями в слоях земли, можно ввести высокочастотные конденсаторы. В данном случае происходит ёмкостное шунтирование щелевого резонатора в середине. Это позволяет увести резонанс вверх по частоте и улучшить отклик тестовой структуры во временной области.

Заключение

С повышением быстродействия ВТ возникают задачи внутриаппаратурной ЭМС, связанные с возникновением резонансных эффектов в межсоединениях ПП, на базе которых, как правило, построены современные устройства. Наиболее эффективно данные задачи могут быть решены еще на этапе разработки ПП на основе результатов моделирования. В работе предложен инструмент для численного моделирования, программа Microwave Studio и разработаны имитационные модели для исследования искажения сигналов в микрополосковой линии из-за резонансных эффектов из-за щели в слое земли.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показывает достаточную согласованность, что позволяет авторам выразить уверенность в возможности использования данного инструмента для исследования ПП с более сложной структурой, а также для изучения электромагнитных излучений.

Литература

1. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. – М.: Грифон, 2017. – 424 с.
2. Xing-Chang W. Modeling and Design of Electromagnetic Compatibility for High-Speed Printed Circuit Boards and Packaging. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 322 p.
3. Henry O.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 872 p.
4. Кечиев Л.Н. Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. – М.: Грифон, 2016. – 400 с.
5. A study on the model of the slit on the ground plane / Y. Mizuguchi, H. Yamamoto, S. Shinohara, R. Sato // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Danvers, 2000. – P. 575–580.
6. Tian X. Analysis of via resonance in multi-layer printed circuit board / X. Tian, Y. Zhang // Proceeding of 2018 International Workshop on Antenna Technology. – Nanjing, China, 2018. doi: 10.1109/IWAT.2018.8379234
7. Effects of parasitic resonance on a vertical transition in multilayer printed circuit boards / S.T. Choi, K. Hamaguchi, K. Tokuda, Y. Kim // Microw. Opt. Technol. Lett. – 2010. – No. 52. – P. 2098–2100.
8. Williams T. Controlling resonances in PCB-chassis structures // Proceeding of International Symposium on EMC EUROPE–2002. – Sorrento, Italy, 2002. – P. 305–310.
9. Гизатуллин З.М. Экспериментальные исследования помехоустойчивости персонального компьютера при импульсном разряде статического электричества / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2011. – № 3. – С. 78–83.
10. Кириллов В.Ю. Расчёт напряжённости электрического и магнитного полей от электростатических разрядов / В.Ю. Кириллов, М.М. Томилин // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – № 2. – С. 15–24.
11. Гизатуллин З.М. Анализ электромагнитной обстановки внутри зданий при воздействии разряда молнии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – № 1-2. – С. 38–47.
12. Нуриев М.Г. Анализ помехоустойчивости вычислительной техники при воздействии разряда молнии на молниезащиту здания на основе физического моделирования / М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин, В.А. Дроздилов, Э.И. Павлова // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 6. – С. 14.
13. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2. – С. 45–50.
14. Funato H. Model-based analysis of screw locations to reduce radiation from a PCB-chassis structure / H. Funato, T. Suga, M. Suhara // Proceeding of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – USA, Raleigh, 2014. – P. 123–127.
15. Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, М.С. Шкиндеров, Ф.Р. Назметдинов // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 9. – С. 7.

16. Куксенко С.П. Оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадного модального фильтра для сети Ethernet 100BASE-T / С.П. Куксенко, Р.Р. Хажибеков, Т.Т. Газизов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – № 1. – С. 13–20.

17. CST Studio Suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite> (дата обращения: 07.10.2019).

Гизатуллин Зиннур Марселевич

Д-р техн. наук, доцент, профессор каф. систем автоматизированного проектирования Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ)
Карла Маркса ул., д. 10, г. Казань, Россия, 420111
ORCID: 0000-0003-0571-5593
Тел.: +7-903-061-71-76
Эл. почта: gzm_zinnur@mail.ru

Гизатуллин Рифнур Марселевич

Канд. техн. наук, инженер ПАО «Казаньоргсинтез», Беломорская ул., д. 101, г. Казань, Россия, 420051
Тел.: +7-906-329-14-48
Эл. почта: e-mail: grm444@mail.ru

Шкиндеров Максим Сергеевич

Аспирант каф. системы автоматизированного проектирования КНИТУ-КАИ
Карла Маркса ул., д. 10, г. Казань, Россия, 420111
Тел.: +7-917-224-71-69
Эл. почта: shkinderov@rambler.ru

Архипов Артем Олегович

Студент каф. системы автоматизированного проектирования КНИТУ-КАИ
Карла Маркса ул., д. 10, г. Казань, Россия, 420111
Тел.: +7-937-615-73-80
Эл. почта: arkhiartem1998@icloud.com

Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M., Shkinderov M.S., Arkhipov A.O.

Simulation of signal distortion in a microstrip line with a gap in the ground layer

Often, the distortion of information signals in printed circuit boards occurs due to resonant effects in interconnects. One of the reasons for resonance effects in the interconnects of the printed circuit board is the presence of gaps in the ground layer, which are present for connecting any elements, connectors, etc. A tool for numerical modeling is proposed and simulation models are developed for studying resonance effects in a microstrip line with a gap in the ground layer. The analysis of distortion of information signals in the microstrip line due to resonance effects is carried out. The simulation results are compared with experimental data and indicate that the models developed are sufficiently adequate. It is shown a reduction in distortion using a shunt capacitor in the slit.

Keywords: computing equipment, printed circuit board, microstrip line, resonance, grounding layer, interconnection, signal distortion, simulation, experiment.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-13-17

References

1. Kechiev L.N. *Pechatnye platy i uzly gigabitnoy elektroniki* [Printed circuit boards and nodes gigabit electronics]. M., Grifon Publ., 2017, 424 p. (in Russ.).
2. Xing-Chang W. *Modeling and Design of Electromagnetic Compatibility for High-Speed Printed Circuit Boards and Packaging*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 322 p.
3. Henry O.W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009, 872 p.
4. Kechiev L.N. *Proektirovanie sistemy raspredeleniya pitaniya pechatnykh uzlov elektronnoy apparatury* [Designing a power distribution system for printed circuit assemblies of electronic equipment]. M., Grifon Publ., 2016, 400 p. (in Russ.).
5. Mizuguchi Y., Yamamoto H., Shinohara S., Sato R.A. study on the model of the slit on the ground plane. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings*, USA, Danvers, 2000, pp. 575–580.
6. Tian X., Zhang Y. Analysis of via resonance in multi-layer printed circuit board. *2018 International Workshop on Antenna Technology Proceedings*, Nanjing, China, 2018. doi: 10.1109/IWAT.2018.8379234
7. Choi S.T., Hamaguchi K., Tokuda K., Kim Y.H. Effects of parasitic resonance on a vertical transition in multi-layer printed circuit boards. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2010, no. 52, pp. 2098–2100.
8. Williams T. Controlling resonances in PCB-chassis structures. *International Symposium on EMC EUROPE 2002 Proceedings*, Italy, Sorrento, 2002, pp. 305–310.
9. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Experimental studies of the noise immunity of a personal computer in a pulsed discharge of static electricity. *Vestnik Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, 2011, no. 3, pp. 78–83 (in Russ.).
10. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. Calculation of the electric and magnetic fields voltage from electrostatic discharges. *Electromagnetic Compatibility Technologies*, 2017, no. 2, pp. 15–24. (in Russ.).
11. Gizatullin Z.M. Analysis of the electromagnetic environment inside buildings under the influence of a lightning discharge. *News of higher educational institutions. Energy problems*, 2008, no. 1-2, pp. 38–47 (in Russ.).
12. Nuriev M.G., Gizatullin R.M., Drozdikov V.A., Pavlova E.I. Analysis of the noise immunity of computer equipment under exposure to the lightning discharge on the lightning protection of a building on the basis of physical modeling. *Journal of Radio Electronics*, 2019, no. 6, pp. 14 (in Russ.).
13. Kuksenko S.P., Zabolotsky A.M., Melkozerov A.O., Gazizov T.R. New features of the system for modeling electromagnetic compatibility TALGAT. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no. 2, pp. 45–50 (in Russ.).
14. Funato H., Suga T., Suhara M. Model-based analysis of screw locations to reduce radiation from a PCB-chassis structure. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings*, USA, Raleigh, 2014, pp. 123–127.
15. Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Shkinderov M.S., Nazmetdinov F.R. A simple method of research of electromagnetic radiation from electronic means. *Journal of Radio Electronics*, 2016, no. 9, p. 7 (in Russ.).
16. Kuksenko S.P., Khazhibekov R.R., Gazizov T.T. Evaluation of the level of radiated electromagnetic emission of a seven-cascade modal filter for Ethernet 100BASE-T. *Electromagnetic Compatibility Technologies*, 2017, no. 1, pp. 13–20 (in Russ.).
17. CST Studio Suite. Available at: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite> (Accessed: October 7, 2019).

Zinnur M. Gizatullin

Doctor of Engineering Science, Professor,
Department of Computer Aided Design Systems,
Kazan National Research Technical University named after
A.N. Tupolev – KAI (KNRTU-KAI)
10, Karl Marx st., Kazan, Russian Federation, 420111
ORCID: 0000-0003-0571-5593
Phone: +7-903-061-71-76
Email: gzm_zinnur@mail.ru

Rifnur M. Gizatullin

Candidate of Engineering Science, Engineer,
PJSC Kazanorgsintez
101, Belomorskaya st., Kazan, Russian Federation, 420051
Phone: +7-906-329-14-48
Email: grm444@mail.ru

Maksim S. Shkinderov

PhD student, Department of Computer Aided Design Systems,
KNRTU-KAI
10, Karl Marx st., Kazan, Russian Federation, 420111
Phone: +7-917-224-71-69
Email: shkinderov@rambler.ru

Artem O. Arkhipov

Student, Department of Computer Aided Design Systems,
KNRTU-KAI
10, Karl Marx st., Kazan, Russian Federation, 420111
Phone: +7-937-615-73-80
Email: arkhiartem1998@icloud.com

УДК 519.245 535.34 535.36

В.И. Маковкин, Н.В. Замятин

Модель прохождения лазерного излучения через запыленные и мутные среды в резервуарах

Предложена методика моделирования методом Монте-Карло прохождения лазерного излучения через запыленные и мутные среды в резервуарах. Реализованы основные этапы моделирования от инициализации фотона до его поглощения средой или перехода за пределы наблюдаемой области. Приведены результаты моделирования перемещения пучка фотонов в исследуемой среде. Результаты проведенной работы показали, что целесообразно применять данный метод для моделирования прохождения лазерного излучения уровнемеров через запыленные и мутные среды в резервуарах, так как он позволяет математически определить возможную погрешность показателей лазерных дальномеров при измерении уровня вещества через различные среды и выявить причины этой погрешности.

Ключевые слова: мутная среда, запыленная среда, метод Монте-Карло, рассеивание, поглощение, модель, лазер.
doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-18-22

Для определения объемов сыпучих веществ в резервуарах предложено применять лазерные дальномеры в режиме уровнемеров. Одной из основных проблем при эксплуатации резервуаров является погрешность получаемых лазерным уровнемером значений уровня вещества в определенных точках и вычисление объема вещества в резервуаре [1, 2]. Если влияние ряда факторов на погрешность может быть устранено положением, конструкцией и типом уровнемера, то требуется отдельное изучение влияния пылевых облаков и паров, образуемых внутри резервуара, на точность возвращаемого сигнала [3].

Пары и пылевые облака (цемент, зерно, гранулы, пары от горячих жидкостей) являются неоднородными мутными средами. Это значит, что их оптические характеристики нельзя описать простым отражением или поглощением света в среде, так как он может рассеиваться на частицах разных плотностей и неоднородностях веществ.

Аналитическое определение влияния мутных сред на показатели лазерного дальномера сильно затруднено без введения серьезных приближений и упрощений, поэтому для подобных задач широкое распространение получили численные методы моделирования, в особенности, метод Монте-Карло, используемый во многих областях науки. Моделирование подобных процессов лучше всего осуществимо с применением статистического метода Монте-Карло (МК), который основывается на представлении распространения излучения в виде потока модельных волновых пакетов. Данный метод является хорошей альтернативой аналитическому решению уравнения переноса [4–7].

Кроме основной проблемы моделирования прохождения излучения в мутной среде, имеющей сильный коэффициент рассеяния, актуальной проблемой являются неоднородность среды, наличие частиц пыли, воды (пара) и других частиц самого различного размера и концентрации, к тому же состоящих из различных химических веществ. Эффект подобной неоднородности можно объяснить так. Свет, перемещаясь в мутной среде, преломляется и отражается на

границах неоднородностей описанных компонент, являющихся частью этой среды, и в результате фотоны могут выходить в самых различных направлениях. Каждый вид пыли, пара и тому подобное имеет свой специфический состав, характер неоднородности и, следовательно, свои параметры рассеяния [8].

В [9] различные компоненты рассеяния (частицы пыли или пара), предлагается учитывать с помощью «розыгрыша» равномерно распределенных случайных величин, напрямую зависящих от концентрации тех или иных частиц в среде.

В алгоритме реализованы:

- инициализация фотона;
- моделирование движения фотона;
- моделирование разных видов рассеяния фотона;
- моделирование процесса пересечения или отражения от границы сред;
- моделирование движения фотонов в сторону измеряемого объекта и их обратное движение при отражении;
- моделирование поглощения части пучка фотона после каждого «шага» и при пересечении границы сред;
- моделирование «рулетки» выживания фотонов при «весе» пучка фотонов меньше заданного.

Главной идеей этого метода является моделирование большого количества реализаций случайного процесса. Вероятностные характеристики этих процессов должны совпадать с величинами решаемой задачи [10, 11]. Метод Монте-Карло требует большого количества времени обработки для того, чтобы достичь необходимой точности, но с вычислительными мощностями, которыми обладают современные компьютеры, это сделать гораздо проще, чем десятки лет назад. В данной задаче метод Монте-Карло применяется для моделирования транспорта фотонов через мутные среды и получаемая модель должна учитывать характеристики среды, ее оптические свойства, геометрию и описание распространения излучения [12].

В поставленной задаче в качестве уровнемера используется импульсный лазерный дальномер. Он

состоит из детектора излучения, импульсного лазера и схемы обработки сигнала. Одним из преимуществ импульсных лазерных уровнемеров (дальномеров) является их большая дальность работы, так как импульс можно выдавать с разной мощностью и в случае необходимости включать только на время импульса.

Расчет движения фотона должен быть не только в направлении к измеряемому веществу, но и в обратном, при движении к детектору. Необходимо рассчитать, попадет ли фотон в область самого детектора или уйдет за его границы, а также рассчитать длину и время его пути для определения величины погрешности измерения уровня [13].

Модель должна учитывать следующие события:

- 1) инициализация фотона;
- 2) перемещение фотона в среде;
- 3) изменение направления перемещения фотона в среде;
- 4) рассеяние фотонов;
- 5) попытка перемещения фотона в другой слой (отражение или пересечение их границы);
- 6) уменьшение числа фотонов;
- 7) смерть фотона.

Моделируемый фотон описывается следующими данными: исходный W_0 пакет фотонов, координаты (x, y, z) и углы (θ, φ) , определяющие его направление движения (рис. 1). Угол φ отсчитывается от положительного направления оси X в плоскости (x, y) , а угол θ – от положительного направления оси.

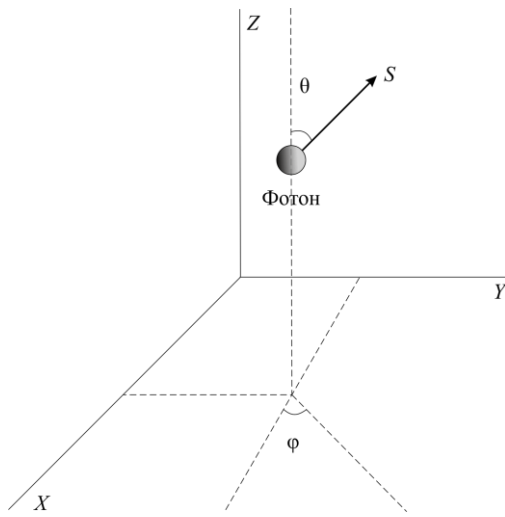


Рис. 1. Положение и направление фотона

При инициализации функция плотности вероятности свободного пробега фотона определяется, используя закон Бугера–Ламберта–Бера.

$$\varepsilon = \int_{x_{\min}}^{x_{\text{md}}} p(x) dx, \quad (1)$$

где ε – случайное число, равномерно распределенное на интервале от 0 до 1; $p(x)$ – функция плотности вероятности случайной величины x ; x_{\min} – минимальное значение x ; x_{md} – выбираемое значение x .

Определить расстояние, которое пройдет фотон в мутной среде, можно из функции плотности вероятности

$$p(l) = \mu_t \exp(-\mu_t l). \quad (2)$$

Отсюда находим функцию определения длины пробега

$$l = -\ln(1-\varepsilon) / \mu_t, \quad (3)$$

где ε – случайное число, равномерно распределенное в интервале $(0, 1)$; $\mu_t = \mu_a + \mu_s$ – коэффициент экстинкции света; μ_a – коэффициент поглощения света; μ_s – коэффициент рассеяния света.

Направление движения фотона определяется с помощью направляющих косинусов (μ_x, μ_y, μ_z) . Сами направляющие косинусы вычисляются по формуле

$$\begin{cases} \mu_x = \sin \theta \cos \varphi \\ \mu_y = \sin \theta \sin \varphi \\ \mu_z = \rho \cos \theta \end{cases}, \quad (4)$$

где ρ – направление движения фотона по оси Oz и может принимать значения 1 или -1 в зависимости от того, в каком направлении он движется.

Конечные координаты фотона после пробега l в направлении, заданном направляющими косинусами, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x' &= x + \mu_x l, \\ y' &= y + \mu_y l, \\ z' &= z + \mu_z l. \end{aligned} \quad (5)$$

Начальное и последующее после рассеяния направления движения можно определить при использовании любой фазовой функции рассеяния. Угол φ может быть определен по формуле (6), если функция азимутально независима:

$$\varphi = 2\pi\varepsilon, \quad (6)$$

где ε – случайное число, равномерно распределенное на интервале от 0 до 1.

Если рассеяние изотропно, то угол θ определяется как

$$\cos(\theta) = 2\varepsilon - 1. \quad (7)$$

Если рассеяние не изотропно (имеет сложный вид), то, проведя преобразования над случайными числами, исходя из закона распределения плотности вектора, углы определяются следующим образом:

$$\cos(\theta) = 2\sqrt{\varepsilon} - 1, \quad (8)$$

$$\sin(\theta) = \sqrt{1 - \varepsilon^2}. \quad (9)$$

Также для не изотропного рассеяния угол θ может быть определен, используя формулу Хенни–Гринштейна:

$$\cos(\theta) = \frac{1}{2g} \left\{ 1 + g^2 - \left[\frac{1 - g^2}{1 - g - 2\varepsilon} \right] \right\}, \quad (10)$$

где g – показатель анизотропии, находится в интервале от -1 до 1 .



Рис. 2. Схема алгоритма моделирования методом Монте-Карло

Если g имеет значение ноль, то рассчитывается изотропное рассеяние, если значение близко к единице, то это означает, что отклонение рассеяния от первоначального направления пути очень низкое.

Одним из ключевых моментов при описании распространения лазерного излучения через изучаемую среду является анизотропия рассеяния. Для характеристики анизотропии рассеяния используется параметр анизотропии g (средний косинус угла рассеяния). Так как параметр анизотропии у каждого вещества свой, в данной работе для определения угла рассеяния решено использовать уравнение Хенши–Гринштейна. Таким образом, кроме показателей поглощения и рассеяния сред и частиц, через которые может совершить попытку перемещения фотон, необходимо знать значения параметра анизотропии.

В данном случае под каждым фотоном подразумевается пакет фотонов, распространяющийся в среде, который мы будем называть «вес». Чем большее расстояние проходит фотон, преодолевая границы сред и тому подобное, тем меньше становится его «вес» W . Размер пакета определяется коэффициентом, при инициализации равным W_0 [14].

По мере перемещения фотонов часть их «веса», равная $(1-a)W$, где a – альbedo единичного акта рассеяния, оказывается поглощенной в среде в виде

$$a = \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a}, \quad (11)$$

где μ_a – коэффициент поглощения света; μ_s – коэффициент рассеяния света.

При весе, меньшем порогового значения W_n , разыгрывается «рулетка» – пакет имеет один шанс из m продолжить движение. Если этот шанс не наступил, то вес пакета становится равен нулю, и он будет полностью поглощен [15]. Соотношение порогового значения статистического веса и величины m описывается следующим образом:

$$W_n = 1/m. \quad (12)$$

На основе описанной модели предложен алгоритм его реализации на рис. 2.

Для более объективной картины моделируемая область разделена на сетку с задаваемыми размерами ячеек. При завершении каждого этапа перемещения фотона, за исключением тех случаев, когда фотон покидает границы среды, поглощенная часть «веса» фотона W записывается в ячейку массива Q_{ijk} , определяющего распределение поглощенной энергии в среде. Значения индексов (i, j, k) вычисляются по текущим координатам фотона.

Примерами моделируемой среды являются слой воздуха, мутная среда (пылевое облако или пар) и ве-

щество, уровень которого измеряется лазерным дальномером. Таким образом, сигнал проходит через воздух, слой пыли или пара, отражается (отслеживаем фотоны, рассеиваемые в обратном направлении) от поверхности вещества и повторно проходит через ту же самую мутную среду и воздух, чтобы потом быть измеренным датчиком на лазерном дальномере или пройти мимо него (рис. 3).

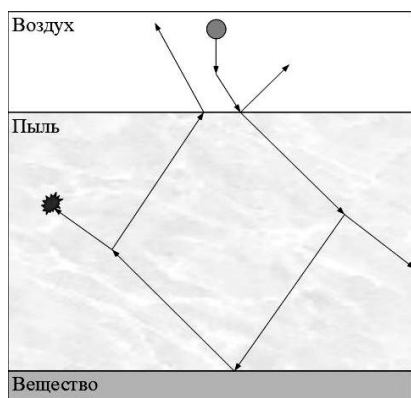


Рис. 3. Схема модели среды и движений фотона в мутных средах и на границах сред

На рис. 4 и 5 приведены примеры реализации перемещения фотона в запыленной среде.

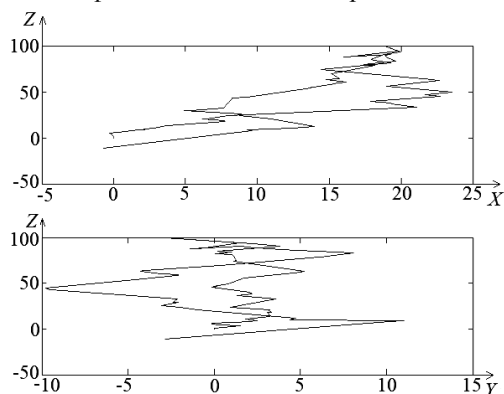


Рис. 4. Пример реализации модели движения одного пучка фотона в мутной среде с момента его инициализации до его возвращения от границы сред. Вверху – вид слева (XZ), внизу – справа (YZ)

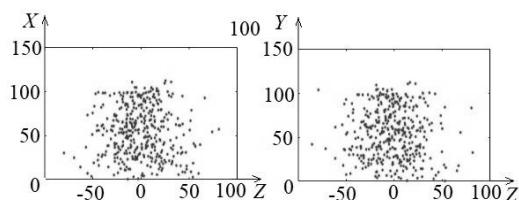


Рис. 5. Пример реализации модели движения фотонов в мутной среде – на рисунке изображены поглощенные при перемещении фотоны. Вид сбоку: XZ – слева, XZ –

Таким образом, предложенный способ моделирования прохождения лазерного излучения через запыленные и мутные среды можно использовать для изучения того, какое влияние могут оказывать пыль и пары на получаемые с помощью лазерного дальномера значения уровня. Можно рассчитать возможную погрешность в данных условиях и выявить причины ее появления.

Результаты эксперимента показали адекватность модели и что с ее помощью можно изучать поведение пучков фотонов в различных средах и на границах этих сред.

Литература

1. Маковкин В.И. Обеззараживание и использование андрогенных отходов в ресурсосберегающих строительных технологиях / В.И. Маковкин, Н.В. Замятин, Г.В. Смирнов // Изв. ТПУ. – 2018. – Т. 329, № 9. – С. 164–174.
2. Пат. 2 661 314 РФ, МПК G 01F 23/292 (2006.01) G 01 F 22/00 (2006.01). Способ контроля параметров выпущенных веществ в резервуарах / Г.В. Смирнов, Н.В. Замятин. – № 2017117123; заявл. 16.05.2017; опубл. 13.07.2018. Бюл. № 20.
3. Маковкин В.И. Модель прохождения лазерного излучения через запыленную среду в резервуарах / В.И. Маковкин // Научная сессия ТУСУР: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТУСУР, 2018. – Ч. 3. – С. 102–106.
4. Лазерная инженерия хрящей / В.Н. Баграташвили, А.В. Басков, И.А. Борщенко и др. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2006. – 488 с.
5. Имитационное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования / Г.М. Креков, В.М. Орлов, В.В. Белов и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1988. – 168 с.
6. Сетейкин А.Ю. Анализ по методу Монте-Карло процессов распространения лазерного излучения в многослойных биоматериалах // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т. 99, вып. 4. – С. 685–689.
7. Беликов А.В. Численное моделирование методом Монте-Карло распространения лазерного излучения в многослойной среде, имитирующей ткани головы в норме и при внутричерепной гематоме / А.И. Беликов, А.В. Скрипник, М.М. Антропова // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер.: Физика. – 2017. – Т. 17, вып. 3. – С. 158–170.
8. Русскова Т.В. Оптимизация последовательного программного кода для моделирования переноса солнечного излучения в вертикально-неоднородной среде / Т.В. Русскова, Т.Б. Журавлева // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 10. – С. 836–842.
9. Гендрина И.Ю. Алгоритм моделирования функции размытия точки системы видения через атмосферу методом Монте-Карло // Направления и механизмы развития науки нового времени: от теории до внедрения результатов. – СПб., 2017. – С. 142–144.
10. Павлов М.С. Моделирование распространения оптического излучения методом Монте-Карло в биологических средах с замкнутыми внутренними неоднородностями / М.С. Павлов, И.В. Красников, А.Ю. Сетейкин // Оптический журнал. – Благовещенск, 2010. – С. 15–19.
11. Jacques S.L. Monte Carlo Modeling of Light Transport in Tissue (Steady State and Time of Flight) // Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue. – 2010. P. 109–144.
12. Condensed Monte Carlo simulations for the description of light transport / R. Graaff, M.H. Koelink, F.F.M. de Mul, W.G. Zijlstra, A.C.M. Dassel, J.G. Aarnoudse // Applied Optics. – 1993. – Vol. 32. – P. 426–434.
13. MCML–Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues / L. Wang, S.L. Jacques, L. Zheng // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 1995. – Vol. 47, No. 2. – P. 131–146.
14. Кочубей В.И. Спектроскопия рассеивающих сред: учеб. пособие / В.И. Кочубей, А.Н. Башкатов. – Саратов: Новый ветер, 2014. – 86 с.
15. Привалов В.Е. Моделирование распространения лазерного излучения в неоднородных средах со сложной

геометрией / В.Е. Привалов, А.Ю. Сегейкин, А.Э. Фотиади // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2013. – Т. 165, вып. 1. – С. 45–55.

Маковкин Владимир Иванович

Аспирант каф. автоматизации обработки информации (АОИ) ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-923-425-25-85

Эл. почта: assorti2030@yandex.ru

Замятин Николай Владимирович

Д-р техн. наук, профессор, каф. АОИ ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-913-820-64-81

Эл. почта: zamnv47@gmail.com

Makovkin V.I., Zamyatin N.V.

Modeling the propagation of laser radiation in dusty and turbid media in tanks

The algorithm for simulating the laser beam propagation through dusty and turbid media in tanks by using the Monte-Carlo method was proposed. The main stages of modelling were implemented: from initialization of a photon to its absorption. A trial simulation of the movement of a photon beam in the studied medium was conducted.

Keywords: Turbid media, dusty media, Monte-Carlo method, scattering, absorption, model, laser.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-18-22

References

1. Makovkin V.I., Zamyatin N.V., Smirnov G.V. [Disinfection and usage of anthropogenic waste in resource-saving construction technologies]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University-Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 164–174 (in Russ.).
2. Smirnov G.V., Zamyatin N.V. *Sposob kontrolya parametrov vypuchih veshchestv v rezervuarah* [The method of controlling the parameters of bulging substances in reservoirs] Patent RF, no. 2017117123, 2017.
3. Makovkin V.I. *Model' prohozhdeniya lazernogo izlucheniya cherez zapylennuyu sredu v rezervuarah* [Model of the passage of laser radiation through a dusty medium in tanks] Nauchnaya sessiya TUSUR. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh [TUSUR Scientific session. Proc. of the international scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists]. Tomsk, TUSUR, 2018, vol. 3, pp. 102–106.
4. Bagratashvili V.N., Baskov A.V., Borshchenko I.A et al.: *Lazernaya inzheneriya hryashchej* [Laser Engineering of Cartilages]. M., FISMALIT Publ., 2006. 488 p.
5. Krekov G.M., Orlov V.M., Belov V.V et al.: *Imitacionnoe modelirovanie v zadachah opticheskogo distancionnogo zondirovaniya* [Simulation in problems of optical remote sensing]. Novosibirsk, Nauka. Sib. otd. Publ., 1988. 168 p.
6. Seteikin A.Yu. [Monte Carlo analysis of laser radiation propagation in multilayer biological materials]. *Optics and Spectroscopy*. 2005, vol. 99, no. 4, pp. 685–689 (in Russ.).

7. Belikov A.V., Skronik A.V., Antropova M.M. *Chislennoe modelirovanie metodom Monte-Karlo rasprostraneniya lazernogo izlucheniya v mnogoslojnoj srede, imitiruyushchej tkani golovy v norme i pri vnutricherepnoj gematome* [Monte Carlo numerical simulation of the propagation of laser radiation in a multilayer medium that simulates head tissue in normal and intracranial hematoma] *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Novaya Seriya. Sseriya: Fizika* [Bullentin of Saratov University. New Series. Series: Physics]. 2017, vol.17, no. 3, pp. 158–170.

8. Russkova T.V., Zhuravleva T.B. [The optimization of sequential code for simulation of solar radiative transfer in a vertically heterogeneous environment]. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2016, vol. 29, no. 10, pp. 836–842 (in Russ.).

9. Gendrina I.Yu. *Algoritm modelirovaniya funkcii razmytiya tochki sistemy videniya cherez atmosferu metodom Monte-Karlo* [Algorithm for modeling the blur function of a point of system of vision through the atmosphere by the Monte Carlo method]. *Napravleniya i mekhanizmy razvitiya nauki novogo vremeni: ot teorii do vnedreniya rezul'tatov* [Directions and mechanisms for the development of the science of the new time: from theory to the implementation of the results] Saint Petersburg, 2017, pp. 142–144.

10. Pavlov M.S., Krasnikov I.V., Setekin A.Y. [Monte Carlo modelling of optical-radiation propagation in biological media with closed internal inhomogeneities]. *Journal of Optical Technology*. Blagoveshchensk, 2010, pp. 15–19 (in Russ.).

11. Jacques S.L. Monte Carlo Modeling of Light Transport in Tissue (Steady State and Time of Flight). *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue*. 2010, pp. 109–144.

12. Graaff R., Koelink M.H., de Mul F.F.M., Zijlstra W.G., Dassel A.C.M., Aarnoudse J.G. Condensed Monte Carlo simulations for the description of light transport *Applied Optics*. 1993, vol. 32, pp. 426–434.

13. Wang L., Jacques S.L., Zheng L. MCML—Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 1995, vol. 47, no. 2, pp. 131–146.

14. Kochubej V.I. Bashkatov A.N.: *Spektroskopiya raseivayushchih sred: uchebnoj posobie* [Spectroscopy of scattering media: study guide]. Saratov, Novyy veter Publ., 2014. 86 p.

15. Privalov V.E. Seteikin A.U., Fotiadi E.E. [Simulation of laser radiation propagation in inhomogeneous media with complex geometry]. *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 2013, vol. 165, no. 1, pp. 45–55 (in Russ.).

Vladimir I. Makovkin

Postgraduate student,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-425-25-85
Email: assorti2030@yandex.ru

Nikolay V. Zamyatin

Doctor of Engineering Science, Professor,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-820-64-81
Email: zamnv47@gmail.com

УДК 004:658.011.56

С.Г. Фролов, А.М. Кориков

Обнаружение и локализация дефектов в трубопроводных сетях

Обнаружение дефектов в трубопроводных сетях является актуальной научно-практической задачей, так как от своевременного и точного обнаружения места порыва трубопровода и оперативной ликвидации этого дефекта зависит качество предоставляемой услуги потребителю. На примере теплосети рассматриваются некоторые методы обнаружения и локализации утечки в системе трубопроводов и возможности их практического применения. Предпочтение отдается корреляционному методу обнаружения утечки теплоносителя. Проведен анализ корреляционного метода обнаружения утечки и разработаны рекомендации по использованию.

Ключевые слова: трубопроводные сети, теплоснабжение, локализация утечки, методы локализации утечки, корреляционный метод.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-23-28

Обнаружение и локализация дефектов в трубопроводных сетях, например места утечки в системе теплоснабжения, является актуальной научно-практической задачей, так как от своевременного и точного обнаружения места порыва трубопровода и его оперативной ликвидации зависит качество предоставляемой услуги потребителю. Для своевременного обнаружения мест утечки теплоносителя и оперативного устранения неисправностей в системе теплоснабжения применяются различные методы, позволяющие как обнаруживать утечку теплоносителя на раннем этапе ее появления, так и достаточно точно локализовать место, в котором произошел порыв. Известны следующие две группы методов обнаружения утечки (повреждений трубопровода):

1) методы, основанные на постоянном мониторинге технологических параметров теплоносителя в системе теплоснабжения;

2) методы, основанные на контроле протекания переходных процессов в системе теплоснабжения.

Проведем краткий анализ методов обнаружения утечки и оценим возможность их практического применения в автоматизированной системе обнаружения утечки теплоносителя в системе теплоснабжения г. Томска.

Методы, основанные на мониторинге параметров теплоносителя

Методы этой группы обеспечивают своевременное обнаружение дефекта на раннем этапе его появления, но не могут с достаточной точностью локализовать конкретное место утечки, так как для этого необходимо густое покрытие системы теплоснабжения датчиками, контроллерами и сетевыми модемами [1, 2]. Одним из таких методов является автоматизированный анализ текущих параметров теплоносителя. Этот метод применяется в первой линии обнаружения утечки, так как использует в качестве источника данных непрерывно отслеживаемые технологические параметры теплоносителя (давление, массорасход, температуру теплоносителя до и после потребителя). Данные показатели постоянно отслеживаются диспетчером, который в свою очередь проводит анализ соответствия полученных данных с данными, которые присущи текущему

температурному графику и конфигурации сети. Технологические данные в системе теплоснабжения собираются постоянно в любых условиях, поэтому этот метод не требует особых затрат по проведению автоматизированного анализа данных на предмет выявления дефектов в системе. Также этот метод позволяет выявить утечку на участке теплоснабжения в период наименьшей активности потребителей. К такому периоду относится, например, временной интервал с 2 до 3 часов ночи. Если в этот промежуток времени расход воды на отслеживаемом участке превышает разумные пределы, то на контролируемом участке сети имеется дефект. Однако данный метод имеет большой недостаток: зависимость погрешности измерения расхода и давления от диаметра трубопровода. Чем больше диаметр отслеживаемого трубопровода, тем больший разброс показаний датчиков можно трактовать как погрешность [3].

В случае малых отверстий расход в поврежденной трубе увеличивается на величину, рассчитываемую по закону истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре [4]. Также при возникновении порыва в трубопроводе происходит изменение давления воды в поврежденном участке трубы [5]. В случае ламинарного потока (в идеальном случае, так как в реальности в трубопроводах протекает турбулентный поток из-за шероховатостей внутренней поверхности трубопровода) и расхода на утечку 15 м³/ч графики давления и расхода будут выглядеть как на рис. 1.

При возникновении утечки теплоносителя в трубопроводе, ведущего к потребителю, давление временно уменьшается, но за счет компенсации давления оборудованием через некоторое время приходит в норму; расход на прямом участке трубопровода до места разрыва возрастает на расход воды через отверстие, а на участке после порыва, наоборот, уменьшается.

Анализ графиков на рис. 1 позволяет определить временные интервалы, в которых технологические параметры отклоняются от нормы, что указывает на возможное наличие дефекта в трубопроводе.

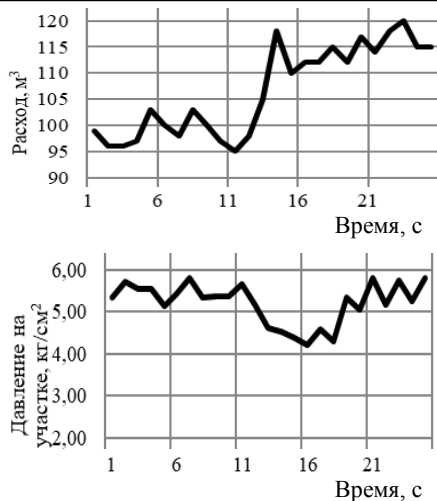


Рис. 1. Графики расхода воды и её давления на поврежденном участке трубы

Методы, основанные на контроле протекания переходных процессов в системе теплоснабжения

Методы, относящиеся ко второй группе, обеспечивают не только обнаружение, но и локализацию места утечки с достаточной точностью. Данные методы требуют дорогостоящего оборудования для получения необходимых данных, так как для реализации метода необходимо осуществить некоторые присущие конкретному методу манипуляции на наблюдаемом участке сети (например, направить сигнал в трубопровод или снять сигнал специальным устройством с участка трубопровода и произвести его обработку). К таким методам относится метод обнаружения и локализации утечки, основанный на разности стоячих волн, а также корреляционный метод.

Метод обнаружения и локализации утечки, основанный на разности стоячих волн, основан на принципах, используемых в электротехнике и технике связи для определения места разрыва кабельной линии. Используется синусоидальное возбуждение кабеля генератором на одном конце и одновременное измерение напряжения и тока. При разрыве кабеля изменяется его сопротивление, т.е. изменяется отношение между напряжением и током, отражаются поступающие волны и создаются остаточные стоячие волны. Расстояние от места генерирования сигнала до разрыва кабеля определяется из анализа соответствующих резонансных частот.

Для реализации метода разности стоячих волн в системе трубопроводов индуцируется установившийся колебательный поток с помощью движения задвижки с малой амплитудой и анализируется частотная характеристика максимального изменения давления на участке возмущения для определенного диапазона частот.

Каждая особенность системы теплоснабжения порождает вторичные волны, которые вносят изменения в амплитуду давления на участке возмущения [6]. Исследуя данные изменения и определив частоту резонансных колебаний, можно получить рассто-

яние от генератора сигнала до места порыва трубопровода. Данный метод применим для поиска дефекта трубопровода, однако у него есть существенный недостаток – необходимость в источнике сигнала. Для осуществления локализации утечки методом разности стоячих волн в трубопроводе необходим достаточно мощный сигнал, который может быть сгенерирован микродвижением запорной арматуры сети. Однако в системе трубопроводов имеются протяженные участки сети, на которых отсутствует запорная арматура. Кроме отмеченного недостатка, возникают трудности автоматизации этого метода, которые обусловлены необходимостью получения специальных разрешений от государственных структур на удаленное управление технологическими объектами критической инфраструктуры [7, 8].

Корреляционный метод обнаружения утечки теплоносителя является к настоящему времени достаточно распространенным методом. Корреляционный метод применяется для нахождения дефектов участка трубопровода с применением промышленных корреляционных течеискателей [9–11]. Данные приборы являются надежным средством поиска утечки на участке сети с погрешностью до 5 м. Однако применение этих приборов в автоматизированной системе обнаружения утечки теплоносителя не представляется возможным ввиду отсутствия режима их автономной работы (приборы требуют присутствия оператора), а также их дороговизны. Еще одним узким местом данного метода являются внешние помехи, так как в качестве снимаемого сигнала применяется звуковой сигнал с частотой до 2000 Гц. Близкорасположенные объекты инфраструктуры города (автомобильные дороги с интенсивным движением, промышленная зона с шумным производством, строительные работы) могут вносить помехи в снимаемый сигнал, так как все они производят шум в используемом частотном диапазоне.

Корреляционный метод основан на перекрестном корреляционном анализе двух сигналов, снятых с источника одновременно на известном расстоянии друг от друга. Применение алгоритма перекрестной корреляции к полученным данным позволяет получить кривую корреляции. Анализируя кривую, можно понять, существует ли статистически значимая зависимость между сигналами (в таком случае на кривой будут присутствовать пики, соответствующие отсчетам времени, в которые сигналы имеют зависимость друг от друга) или же такая зависимость отсутствует.

Применение корреляционного метода в качестве метода обнаружения и локализации места утечки теплоносителя путем нахождения зависимости между снятыми сигналами (пикового значения на кривой корреляции) означает, что на участке трубы между датчиками, с которых снимается сигнал, присутствует дефект, порождающий искажение или генерирующий собственный сигнал (такой, как вытекающая из места повреждения вода под давлением).

Кривая корреляции при перекрестной корреляции двух сигналов есть зависимость коэффициента

корреляции от времени смещения одного сигнала относительно другого [12]. Зная расстояние между датчиками, с которых был снят сигнал, а также технологические параметры теплоносителя, влияющие на скорость распространения звука в жидкой среде (такие, как давление и температура), можно вычислить расстояние от датчиков, на котором был обнаружен дефект. На рис. 2 представлен результат перекрестной корреляции двух сигналов.

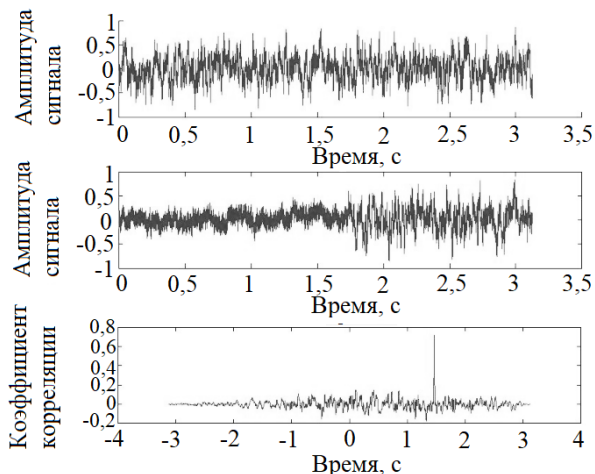


Рис. 2. Результат применения алгоритма перекрестной корреляции к двум сгенерированным сигналам

Уравнение для скорости распространения звука в жидкой среде известно:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\chi\rho}}, \quad (1)$$

где c – скорость звука в жидкости (м/с), $K=1/\chi$ – модуль всестороннего сжатия (Н/м^2), χ – коэффициент сжимаемости жидкости ($\text{м}^2/\text{Н}$), ρ – плотность жидкости (кг/м^3) [13].

На основе известных уравнений и алгоритмов перекрестной корреляции возможно создание автоматизированной системы обнаружения утечки теплоносителя.

Разработка автоматизированной системы обнаружения утечки теплоносителя (АСОУТ)

В качестве устройства для снятия сигналов с участка трубопровода в АСОУТ предлагается использовать прототипы устройств, выполненных на базе микроконтроллера ATMEL ATMEGA328P с пьезоэлементом в качестве датчика для непосредственного снятия сигнала с трубопровода. Конфигурация участка теплосети, на которой был поставлен пробный эксперимент в АСОУТ, представлена на рис. 3. Данная конфигурация представляет собой участок трубопровода длиной 200 м, на концах которой установлены датчики, а в центральной части установлен ручной клапан сброса теплоносителя, используемый в эксперименте в качестве искусственного места утечки (для имитации утечки теплоносителя).

На рис. 4 представлены результаты эксперимента. Диаграмма на рис. 4, *а* представляет результат применения корреляции к двум сигналам, снятым с участка трубопровода без имитации утечки; диаграмма на рис. 4, *б* – с имитацией утечки в точке $M=100$ м.

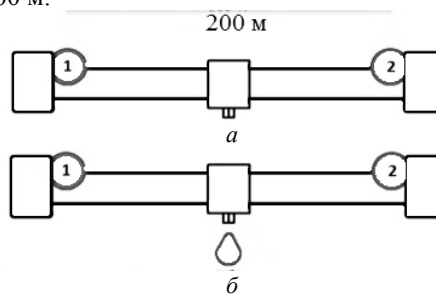


Рис. 3. Конфигурация участка системы теплоснабжения. Цифрами 1 и 2 обозначены датчики: *а* – конфигурация системы для эксперимента без имитации утечки; *б* – конфигурация системы для эксперимента с имитацией утечки в средней точке $M=100$ м

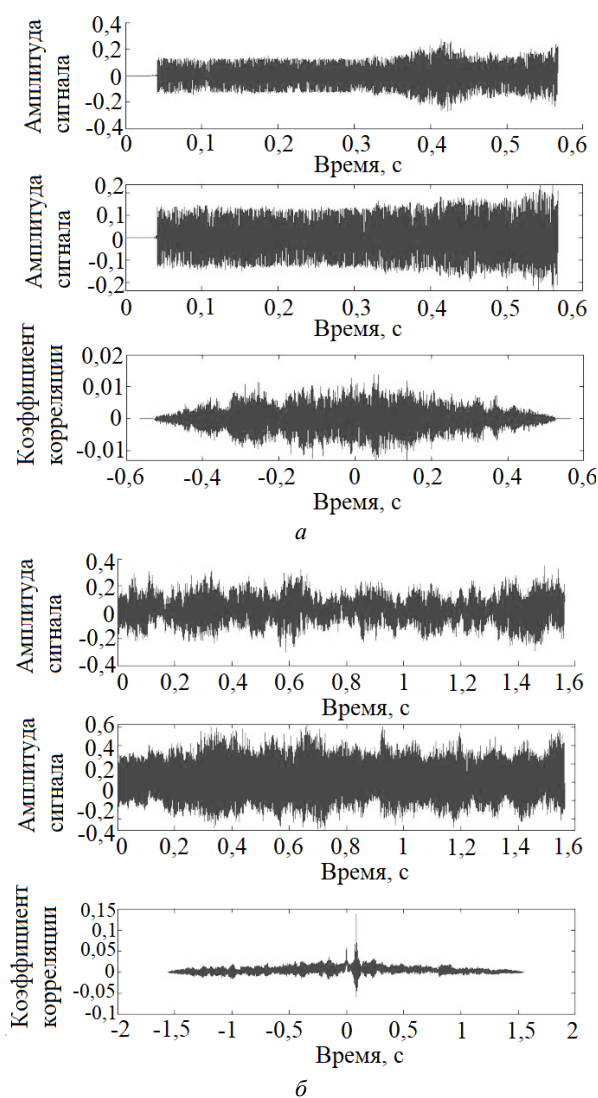


Рис. 4. Результаты применения алгоритма перекрестной корреляции к двум снятым с датчиков аудиосигналам без имитацией утечки (*а*) и с имитацией утечки в точке $M=100$ м (*б*)

Из результатов эксперимента следует, что при наличии утечки теплоносителя кривая корреляции имеет пик в момент времени 0,078 с. Для температуры воды $t = 86$ °С и давления в системе $P = 5,2$ бар скорость звука в системе по формуле (1) равна 1483 м/с (модуль всестороннего сжатия воды $K = 2,12766 \times 10^9$ Н/м², плотность воды при $t = 86$ °С равна 967,8 кг/м³). Исходя из полученных данных, местоположению утечки соответствует точка с координатой 115,7 м. Погрешность определения местоположения утечки обусловлена использованием при расчете параметров дистиллированной воды, а также ошибками измерения датчиков.

Для обнаружения утечки на участке системы теплоснабжения необходимо применить корреляционный метод к двум сигналам, снятым с приборов, установленных на двух разных концах участка, на котором предположительно имеется дефект. Датчики не имеют возможности анализировать состояние участка теплоснабжения, они лишь посылают сигнал на удаленную систему по запросу [14], которая в свою очередь производит обработку и анализ полученных данных.

Технологическая система обработки и последующего вывода результатов (АСОУТ) в понятной для человека форме представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из нескольких крупных модулей:

- 1) первичного мониторинга параметров сети;
- 2) связи с датчиками;
- 3) обработки и анализа данных;
- 4) отображения состояния сети.

Модуль первичного мониторинга параметров сети основан на уже существующей SCADA-системе [15], которая непрерывно отслеживает необходимые технологические параметры системы теплоснабжения. При отклонении их от нормы модуль отправляет запрос на получение данных с потенциально дефектного участка теплоснабжения, используя модуль связи с датчиками.

Модуль связи с датчиками включает в себя оборудование связи, посредством которого технологическая система в необходимый момент времени посылает запрос на получение данных с датчика и получает данные, и программную составляющую, выполняющую первичную обработку полученного сигнала (преобразование в необходимый формат данных для последующей обработки).

Модуль обработки и анализа данных использует полученные данные для определения наличия повреждения в участке, с которого были сняты сигналы, корреляционным методом, анализирует полученные результаты и на основе анализа выводит необходимое сообщение диспетчеру (присутствует дефект на участке системы или нет).

Модуль отображения состояния сети показывает диспетчеру состояние системы теплоснабжения в режиме реального времени (отображение текущих технологических параметров системы), а также последние результаты применения второй ступени мониторинга (дефектные участки сети). В качестве

данного модуля возможно использование уже существующей SCADA-системы.

Совокупность сети датчиков, установленных на участках системы теплоснабжения, и технологической системы, способной получать данные и обрабатывать их по необходимости, образует программно-аппаратный комплекс, который реализует автоматизированную систему обнаружения и локализации утечек в системе теплоснабжения.

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что корреляционный метод обеспечивает достаточную точность локализации дефектов в трубопроводных сетях и, в частности, места утечки в системах теплоснабжения, поэтому может быть применен на практике в качестве метода локализации места утечки. Для автоматизации локализации места утечки отмеченные выше методы первой и второй группы должны применяться в совокупности друг с другом, а также с технологическими системами, уже существующими на предприятии. Непрерывный мониторинг параметров теплоносителя применяется в качестве метода обнаружения дефекта в теплосети, а корреляционный метод после обнаружения дефектного участка применяется в качестве метода локализации конкретного места утечки. Автоматизированная система, базирующаяся на этих методах, способна осуществлять текущий мониторинг дефектов теплосети и уведомлять диспетчера о возникновении каких-либо нестандартных ситуаций для принятия решения о дальнейших действиях персонала.

Литература

1. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.e-reading.club/bookreader.php/129367/Pravila_tehnicheskoi_ekspluatcii_teplovyh_energoustanovok.html, свободный (дата обращения: 23.06.2019).
2. Своды правил по проектированию и строительству: СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов: нормативно-технический материал. – М., 1997. – 100 с.
3. РД 153-34.0-11.339-97. Методика выполнения измерений расхода воды в трубопроводах больших диаметров. Введ. 1999-02-01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 35 с.
4. Истечение жидкости через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://firing-hydra.ru/index.php?request=full&id=356>, свободный (дата обращения: 28.06.2019).
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. – Т. 1: Механика. Теплота. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1985. – 606 с.
6. Didia Covas, Helena Ramos. Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems // Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.civil.ist.utl.pt/~didia/Publications/RI_05%20\(2005\)%20Covas%20et%20al.%20\(JHE_ASCE\).pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~didia/Publications/RI_05%20(2005)%20Covas%20et%20al.%20(JHE_ASCE).pdf), свободный (дата обращения: 03.07.2019).
7. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/obespechenie-bezopasnosti-kriticheskoy>

informatsonnoj-infrastruktury/285-zakony/1610-federalnyj-zakon-ot-26-iyulya-2017-g-n-187-fz, свободный (дата обращения: 15.07.2019).

8. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона «О безопасности критической инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/component/attachments/download/2088>, свободный (дата обращения: 15.07.2019).

9. Корреляционные течеискатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.z-tec.ru/product-category/categories/teleinspektsiya-techeiskateli-trassoiskateli/techeiskateli/korrelyatsionnye/>, свободный (дата обращения: 15.07.2019).

10. Поиск утечек в СПб. Корреляционный течеискатель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.leakfinder.ru/oborudovanie/correlator/>, свободный (дата обращения: 15.07.2019).

11. Методы обнаружения протечек в трубопроводах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.centert.ru/projects/acoustic/>, свободный (дата обращения: 15.07.2019).

12. Корреляция сигналов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bourabai.ru/signals/ts08.htm>, свободный (дата обращения: 15.07.2019).

13. Скорость звука в жидкостях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.fxuz.ru/формулы_по_физике/акустика/распространение_звука/скорость_звука/скорость_звука_в_жидкостях/, свободный (дата обращения: 15.07.2019).

14. NB-IoT: как он работает? – Ч. 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/ru-mts/blog/430496/>, свободный (дата обращения: 23.07.2019).

15. Системы автоматизированного контроля и сбора информации (SCADA) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bourabai.ru/dbt/scada.htm>, свободный (дата обращения: 24.07.2019).

Фролов Сергей Геннадьевич

Аспирант каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-408-83-52
Эл. почта: sgf2@tpu.ru

Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. АСУ ТУСУРА
вед. науч. сотр. Томского ф-ла
Института вычислительных технологий СО РАН
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79
Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

Frolov S.G., Korikov A.M.

Discovery and localization of defects in pipeline networks

Detection of defects in the pipeline networks of heat supply is an urgent scientific and practical task, since the quality of the service provided to the consumer depends on the timely and accurate detection of the place of the pipeline burst and the

prompt elimination of this defect. The article discusses some methods of detection and localization of leakage in the system of pipelines of the heating system and the possibility of their practical application. Preference is given to the correlation method of detection of coolant leakage. The analysis of the correlation method of leak detection and developed recommendations for use.

Keywords: pipeline network, heat, localization of leaks, methods of locating leaks, correlation method.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-23-28

References

1. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii teplovykh energoustanovok* [Technical operation rules of thermal power plants]. Available at: https://www.e-reading.club/bookreader.php/129367/Pravila_tekhnicheskoi_ekspluatatsii_teplovykh_energoustanovok.html (Accessed: June 23, 2019) (in Russ.).

2. *Своды правил по проектированию и строительству: СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов.* [The rules of design and construction: SP 41-101-95. Design of heat points]. М., 1997. 100 p. (in Russ.).

3. *RD 153-34.0-11.339-97. Metodika vypolneniya izmereniy raskhoda vody v tryboprovodakh bolshikh diametrov* [RD 153-34.0-11.339-97 Methods of measurement of water flow in large diameter pipelines]. М.: Standarts Publishing, 1999. 35 p. (in Russ.).

4. *Istechenie zhidkosti cherez maloe otverstie v tonkoy stenke pri postoyannom napore* [Fluid flow through a small hole in a thin wall with constant pressure]. Available at: <https://firing-hydra.ru/index.php?request=full&id=356> (Accessed: June 23, 2019) (in Russ.).

5. Landsberg, G.S. *Elementarnyy uchebnik fiziki. T.1. Mekhanika. Teplota. Molekulyarnaya fizika.* [Elementary physics. Vol. 1. Mechanics. Heat. Molecular physics.]. М., 1985. 606 p. (in Russ.).

6. Didia Covas, Helena Ramos. Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 2005.* Available at: [http://www.civil.ist.utl.pt/~didia/Publications/RI_05%20\(2005\)%20Covas%20et%20al.%20\(JHE_ASCE\).pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~didia/Publications/RI_05%20(2005)%20Covas%20et%20al.%20(JHE_ASCE).pdf) (Accessed: June 03, 2019).

7. *O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii. Feder. zakon ot 26.07.2017 № 187-FZ* [On security of the critical information infrastructure of the Russian Federation. Feder. Law of 26.07.2017 No. 187-FZ] Available at: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/obespechenie-bezopasnosti-kriticheskoy-informatsionnoj-infrastruktury/285-zakony/1610-federalnyj-zakon-ot-26-iyulya-2017-g-n-187-fz>. (Accessed: July 15, 2019) (in Russ.).

8. *O vnesenii izmeneniy v ot-del'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii v svyazi s prinyatiem Federal'nogo zakona «O bezopasnosti kriticheskoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii».* Feder. zakon ot 26.07.2017 № 193-FZ [On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation in connection with the adoption of the Federal Law «On the Safety of Critical Infrastructure of the Russian Federation». Feder. Law of 07.07.2017. No. 193-FZ]. Available at: <https://fstec.ru/component/attachments/download/2088> (Accessed: July 15, 2019). (in Russ.).

9. *Korrelyatsionnye techeiskateli* [Correlation leak detectors]. Available at: <https://www.z-tec.ru/product-category/categories/teleinspektsiya-techeiskateli-trassoiskateli/techeiskateli/korrelyatsionnye/> (Accessed: July 15, 2019). (in Russ.).

10. *Poisk utechek v SPb. Korrelyatsionnyy techeiskatel'* [Search for leaks in St. Petersburg. Correlation Leak Detec-

tor]. Available at: <https://www.leakfinder.ru/oborudovanie/correlator/> (Accessed: July 15, 2019) (in Russ.).

11. *Metody obnaruzheniya protechek v truboprovodakh* [Methods for detecting leaks in pipelines]. Available at: <http://www.centert.ru/projects/acoustic/> (Accessed: July 15, 2019) (in Russ.).

12. *Korrelyatsiya signalov* [Correlation of signals]. Available at: <http://bourabai.ru/signals/ts08.htm> (Accessed: July 15, 2019) (in Russ.).

13. *Skorost' zvuka v zhidkostyakh* [The speed of sound in liquids]. Available at: https://www.fxyz.ru/формулы_по_физике/акустика/распространение_звука/скорость_звука/скорость_звука_в_жидкостях/ (Accessed: July 15, 2019) (in Russ.).

14. *NB-IoT: kak on rabotaet? Chast' 1* [NB-IoT: how does it work? Part 1]. Available at: https://habr.com/ru/company/ru_mts/blog/430496/ (Accessed: July 23, 2019) (in Russ.).

15. *Sistemy avtomatizirovannogo kontrolya i sbora informatsii* (SCADA) [Systems of automated control and information collection (SCADA)]. Available at: <http://bourabai.ru/dbt/scada.htm> (Accessed: July 24, 2019) (in Russ.).

Sergey G. Frolov

PhD student, Department of Automated Control Systems
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-408-83-52
Email: sgf2@tpu.ru

Anatoly M. Korikov

Doctor of Engineering Science, Assistant Professor, Head
of the Department of Automated Control Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Leading researcher at Tomsk Branch of the Institute
of Computing Technologies SB RAS
Phone: +7 (382-2) 41-42-79
Email: korikov@asu.tusur.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 004.056

М.Л. Соловьев, Т.Е. Минеева, А.А. Конев, Д.Н. Буинцев

Модель угроз безопасности, возникающих при управлении системой защиты информации

Представлена модель угроз, направленная на повышение уровня безопасности системы защиты информации. Для построения модели используется теория графов и теория управления бизнес-процессами. Разработанная модель включает угрозы, направленные на кадровый, технический и нормативный компоненты системы защиты информации. Типы угроз сформированы на основе цикла Деминга, что позволяет учесть все значимые процессы управления системой. Учёт всех значимых компонентов и процессов управления системой защиты информации является существенным преимуществом по сравнению с существующими моделями угроз.

Ключевые слова: модель угроз безопасности, система защиты информации, угрозы целостности, жизненный цикл, процессы управления, перечень угроз информации.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-31-36

На сегодняшний день очень важным вопросом является обеспечение безопасности системы защиты информации в целом. Так как в основном внимание уделяют защите информации, носителям информации, средствам защиты, находящимся в организации, а регламентирующей документации не хватает должного внимания, что и является угрозой процессам управления системой защиты информации (СЗИ).

В существующих приказах и нормативных документах не прописано, что угрозы, направленные на процессы управления, должны рассматриваться на всех этапах ее жизненного цикла, а именно, рассмотрев угрозы на каждом этапе, безопасность управленческих процессов системы защиты информации станет эффективнее и максимально надежнее. Поэтому регламентация управленческих процессов очень важна, так как через нее и осуществляется управление системой защиты информации в целом.

Согласно приказу ФСТЭК №235 [1] и ГОСТу Р 50922–2006 [2], система защиты информации является совокупностью персонала, технических средств обеспечения безопасности, а также правил и норм, установленных соответствующими документами в области защиты информации. Таким образом, модель угроз должна включать все три составляющие системы защиты информации.

Общий подход к структуре модели угроз приведен в [3] и включает следующие классы угроз:

- перечень угроз, направленных на информацию и ее носители;
- перечень угроз, направленных на элементы информационной системы и системы защиты;
- перечень угроз, направленных на процессы управления системой защиты.

В работе [4] рассматриваются модели классификации угроз, аргументируется отсутствие полноты в существующих моделях классификации угроз, также предлагается использовать смешанную модель классификации угроз, которая позволяет определять характеристики данных угроз.

В работах [5–8] предложены методики оценки рисков и выявления актуальных угроз безопасности

исследуемой информационной системы, разработанные на основе моделей угроз безопасности.

У существующих моделей угроз безопасности отсутствует необходимый перечень угроз, что является существенным недостатком, так как в дальнейшем невозможно будет сформировать обоснованные требования к обеспечению безопасности процессов управления СЗИ. Кроме того, угрозы, направленные на нарушение процессов управления системой, практически отсутствуют, и они не структурированы, что не позволяет составить максимально полный перечень угроз.

Подходы к построению моделей угроз, направленные на информационные системы, а также информацию и ее носители, описаны в [9, 10]. В этих же работах представлены модели самих объектов защиты – информационных систем и информационных потоков, реализованных в данных системах. Таким образом, дополнительно к этим моделям угроз необходимо разработать модели объекта защиты и угроз с точки зрения управления информационной системой.

Модель жизненного цикла системы защиты

Модель жизненного цикла системы защиты основана на классификации процессов управления системой и ее компонентами. В качестве классов взяты элементы системы защиты – персонал, программно-аппаратные средства обеспечения безопасности и организационная документация, в соответствии с которой функционирует система безопасности [11].

Перечень этапов жизненного цикла основывается на определении состояний и переходов между ними системы защиты информации и/или ее компонентов (работоспособность, выход из строя, потеря актуальности и т.п.) [12]. Учитываемые этапы жизненного цикла:

- приобретение (разработка) компонента системы защиты и вывод элемента из системы;
- ввод в эксплуатацию элемента системы защиты и вывод компонента из эксплуатации;
- эксплуатация компонента системы защиты;

- контроль актуальности компонента системы защиты и его обновление;
- контроль функционирования компонента системы защиты и его восстановление.

Процессы, связанные с вводом/выводом из эксплуатации, подразумевают включение/исключение компонента из системы защиты. Например, применительно к персоналу – это предоставление прав доступа к защищаемой информации сотрудника или отзыв прав на работу с данной информацией.

Предложенные этапы жизненного цикла могут быть представлены следующим образом [13]:

- планирование;
- ввод в эксплуатацию;

- эксплуатация;
- контроль за функционированием;
- улучшение;
- вывод из эксплуатации;
- уничтожение.

Предложенная классификация позволила формализовать модели жизненного цикла программно-аппаратных средств защиты, персонала организации, а также нормативной документации [14].

На основе моделей жизненного цикла составляющих системы защиты информации была составлена типовая модель жизненного цикла самой системы защиты информации (рис. 1).

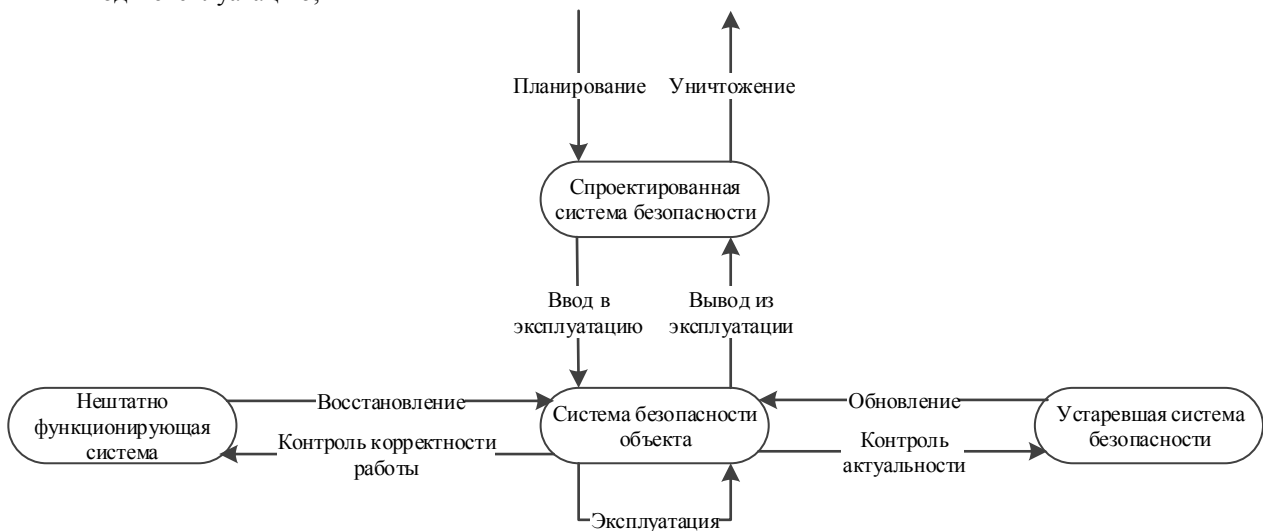


Рис. 1. Модель жизненного цикла системы защиты информации

Модель жизненного цикла системы защиты информации отражает состояния и процессы управления ее составляющих, а именно программно-аппаратных средств защиты, нормативной документации и персонала, также при ее построении были учтены основные этапы жизненного цикла системы.

Данная модель позволит рассмотреть каждый из классов процессов управления более подробно и раскрыть перечень угроз, направленных непосредственно на состояние системы защиты в процессе ее управления. Соответственно, рассмотрев перечень угроз, можно будет описать механизмы защиты, направленные на минимизацию этих угроз, что обеспечит безопасность работы системы защиты информации.

Модель угроз

Управление системой защиты информации подразумевает регламентацию этапов жизненного цикла за счет составления организационной документации. Под «организационной документацией» в данном случае подразумевается не документ, а правила, в нем зафиксированные. Таким образом, типовые угрозы направлены на процессы управления компонентами системы защиты информации (программно-аппаратными средствами, нормативной документацией и персоналом) с точки зрения некорректной разработки или применения этих правил. Подход к рассмотрению угроз управления СЗИ основан на

цикле Деминга, так как данный постоянный круг действий направлен на усовершенствование и улучшение процессов [15]. Цикл Деминга представляет алгоритм действий, состоящий из следующих стадий:

- проектирование;
- выполнение;
- контроле;
- корректировка.

На каждом этапе цикла были рассмотрены соответствующие угрозы управляющим процессам СЗИ и выделены типовые угрозы (таблица).

Нейтрализация данных типов угроз направлена на понимание требований безопасности управленческих процессов, необходимости внедрения и использования мер безопасности, непрерывный контроль и мониторинг производительности и эффективности управления СЗИ, а также ее улучшение [16].

При составлении перечня угроз были учтены все существующие процессы каждого этапа жизненного цикла системы защиты информации. Например, для персонала представлены следующие процессы управления:

- прием на работу;
- допуск к конфиденциальной информации;
- выполнение своих обязанностей;
- идентификация текущего состояния статуса сотрудника;
- повышение квалификации;

- контроль корректности работы;
- восстановление качества выполняемых обязанностей сотрудника;
- лишение прав на работу с конфиденциальной информацией;
- увольнение.

**Типовые угрозы,
возникающие на этапах жизненного цикла СЗИ**

Угрозы	
Целостности	Конфиденциальности
Некорректная разработка регламента процесса	Разглашение информации об особенностях разработки регламента процесса
Некорректное исполнение регламента процесса	Разглашение правил работы, указанных в регламенте
Некорректная организация контроля за исполнением регламента процесса	Разглашение информации о принципах организации контроля за исполнением регламента процесса
Неполная корректировка возможных ошибок, найденных в регламенте процесса	Разглашение информации об обнаруженных ошибках, найденных в регламенте процесса, и правил их корректировки

Таким образом, были рассмотрены процессы управления для нормативной документации и программно-аппаратного обеспечения. Каждый процесс управления регламентируется управляющими документами, перечень которых был тоже подобран и рассмотрен для более детального описания угроз, направленных на процессы управления системой защиты.

Для наглядного отображения модели угроз безопасности используется теория графов, а именно, неориентированный граф, отражающий соответствие угроз безопасности процессам управления системой защиты, на которые данные угрозы направлены.

Множество типовых угроз было обозначено, как

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8\},$$

где u_1 – угроза некорректной разработки регламента процесса; u_2 – угроза некорректного исполнения регламента процесса; u_3 – угроза некорректной организации контроля за исполнением регламента процесса; u_4 – угроза неполной корректировки возможных ошибок, найденных в регламенте процесса; u_5 – угроза разглашения информации об особенностях разработки регламента процесса; u_6 – угроза разглашения правил работы, указанных в регламенте; u_7 – угроза разглашения информации о принципах организации контроля за исполнением регламента процесса; u_8 – угроза разглашения информации об обнаруженных ошибках, найденных в регламенте процесса, и правил их корректировки.

Множество процессов управления обозначено как

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9\},$$

где v_1 – процессы, связанные с планированием (разработкой или подбором компонента); v_2 – процессы, связанные с вводом компонента в эксплуатацию; v_3 –

процессы, связанные с эксплуатацией компонента; v_4 – процессы, связанные с контролем актуальности компонента; v_5 – процессы, связанные с обновлением компонента; v_6 – процессы, связанные с контролем функционирования компонента; v_7 – процессы, связанные с восстановлением компонента; v_8 – процессы, связанные с выводом компонента из эксплуатации; v_9 – процессы, связанные с исключением компонента из системы.

Множество компонентов системы защиты информации обозначено как

$$M = \{m_1, m_2, m_3\},$$

где m_1 – программно-аппаратные средства защиты; m_2 – нормативная документация; m_3 – персонал.

На множествах U и V введем отношение «существует», выделив в декартовом произведении множеств $U \times V$ подмножество упорядоченных пар, обладающих свойством: множество угроз U_i существует на множестве процессов управления V_j .

Бинарное отношение было обозначено $\alpha \subset U \times V$

$$\alpha = \{(U_i^{mk}, V_j^{mk})\},$$

где $i = 1 \dots 6$ – номер типа угрозы, $j = 1 \dots 9$ – номер процесса управления, k – номер элемента системы защиты информации.

Результатом данного отношения α будет являться полный перечень угроз, существующих на каждом из процессов управления системой защиты информации.

Например, отношение $\alpha = \{(U_5^{m3}, V_4^{m3})\}$ будет означать, что для такого элемента СЗИ, как персонал, на этапе контроля актуальности выполняемых обязанностей существует угроза разглашения информации о некорректном планировании инструкции, регламентирующей процесс контроля актуальности выполняемых обязанностей сотрудника. Данная угроза является угрозой конфиденциальности процесса контроля актуальности и влияет на стабильность функционирования данного процесса тем, что такая информация может нанести ущерб организации со стороны злоумышленника.

А отношение $\alpha = \{(U_2^{m1}, V_9^{m1})\}$ означает, что для программного обеспечения на этапе его удаления существует угроза неверного обучения инструкции, регламентирующей процесс удаления исполнителем данного процесса. Данная угроза является угрозой целостности для процесса удаления программного обеспечения, так как исполнитель, который плохо обучен регламенту, нарушает целостность процесса удаления.

Собственно моделью угроз и будет считаться полное соответствие существующих угроз управляющим процессам (рис. 2). В данной модели учитываются все угрозы, которые направлены на регламентирующую документацию на каждом этапе ее совершенствования, а именно на этапе планирования, на этапе обучения персонала, на этапе поиска ошибок и на этапе исправления найденных ошибок, содержащихся в регламентирующей документации процессов управления системой защиты информации.

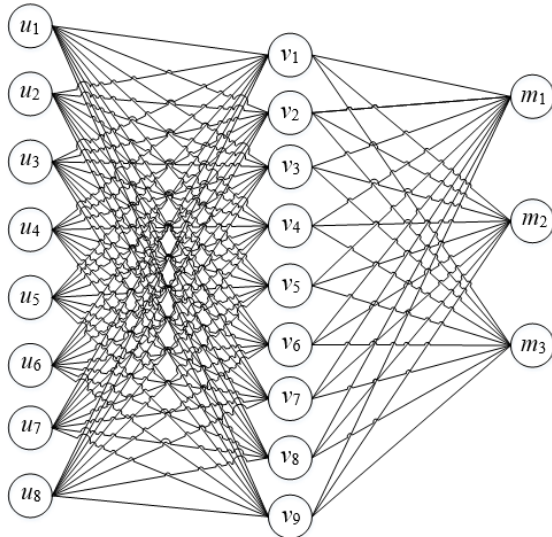


Рис. 2. Модель угроз безопасности, направленных на процессы управления СЗИ

Данная модель обладает полнотой угроз, относящихся к каждому классу процессов управления. Каждому типу угроз соответствует этап жизненного цикла, на котором она реализуется, а этап жизненного цикла, в свою очередь, соответствует определенному компоненту СЗИ. Использование данной модели позволит получить максимально возможный перечень угроз, что позволит повысить уровень защищенности системы защиты в целом и ее отдельных компонентов.

Перечень угроз составлен для каждого компонента СЗИ и всех предложенных процессов управления на основе модели жизненного цикла системы защиты информации. Стоит отметить, что подобные угрозы не включены в банк угроз ФСТЭК, что еще раз доказывает актуальность данной проблемы и необходимость рассмотрения данного вопроса.

Актуальность данной модели можно обосновать сравнением со следующими нормативными документами в области информационной безопасности:

– приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [17];

– приказ ФСТЭК России от 21.12.2017 № 235 «Об утверждении Требований к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования: приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю»;

– приказ ФСТЭК России 22.12.2017 № 236 «Об утверждении формы направления сведений о результатах присвоения объекту критической информационной инфраструктуры одной из категорий значимости либо об отсутствии необходимости присвоения ему одной из таких категорий» [18].

Сравнивая разработанную модель с требованиями по обеспечению безопасности и создания си-

стем безопасности, можно отметить, что некоторые процессы управления, на которые направлены угрозы, рассматриваются и в данных требованиях. Но также модель угроз учитывает те процессы, которые в перечисленных нормативных актах не рассматриваются, например, лишение прав сотрудника на работу с конфиденциальной информацией и восстановление корректности работы элемента СЗИ.

Заключение

Разработанная модель, в отличие от аналогов, включает типы угроз для всех классов компонентов системы защиты информации, а также учитывает все типовые процессы управления, что является преимуществом перед существующими моделями угроз.

Все процессы управления, рассматриваемые в приказах ФСТЭК, учитываются в разработанной модели жизненного цикла СЗИ. Разработанная модель содержит расширенный перечень процессов управления и направленных на эти процессы угроз, по сравнению с банком угроз ФСТЭК. При этом предложенная модель включает в разрезе угроз набор требований по обеспечению безопасности объектов СЗИ.

Угрозы, направленные на процессы, регламентирующие работу СЗИ, рассматриваются на каждом этапе жизненного цикла системы, что не прописывается ни в одном нормативном документе по информационной безопасности. При составлении типовых угроз, направленных на процессы управления, был использован цикл Деминга, что при нейтрализации данных угроз значительно повлияет на усовершенствование и улучшение управления СЗИ. Построенная модель угроз наглядно показывает соответствие элемента СЗИ, процесса управления и угроз, направленных на них.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2017–2019 гг. (проект № 2.8172.2017/8.9).

Литература

1. Об утверждении требований к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования: приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 21 декабря 2017 г. № 235 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1589-prikaz-fstek-rossii-ot-21-dekabrya-2017-g-n-236>, свободный (дата обращения: 20.07.2019).

2. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения. – Введ. 2008-02-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 12 с.

3. Конев А.А. Подход к описанию структуры системы защиты информации / А.А. Конев, Е.М. Давыдова // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 2 (28). – С. 107–111.

4. Jouini M. Classification of Security Threats in Information Systems / M. Jouini, L. Ben Arfa Rabai, A. Ben Aissa // Procedia Computer Science. – 2014. – Vol. 32. – P. 489–496.

5. Шувалов И.А. Математическая модель воздействия угроз на информационную систему обработки персональных данных / И.А. Шувалов, Е.А. Семенчин // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-3. – С. 529–533.

6. Прищеп С.В. Подходы и критерии оценки рисков информационной безопасности / С.В. Прищеп, С.В. Тимченко, А.А. Шелупанов // Безопасность информационных технологий. – 2007. – № 4. – С. 15–21.

7. Миронова В.Г. Анализ этапов предпроектного обследования информационной системы персональных данных / В.Г. Миронова, А.А. Шелупанов // Вестник Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 2 (35). – С. 45–48.

8. Миронова В.Г. Методология формирования угроз безопасности конфиденциальной информации в неопределенных условиях их возникновения / В.Г. Миронова, А.А. Шелупанов // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 12 (137). – С. 39–45.

9. Novokhrestov A. Mathematical model of threats to information systems / A. Novokhrestov, A. Konev // Prospects of Fundamental Sciences Development, PFSD-2016. AIP Conf. Proc. 1772. – 060015.

10. Модель угроз безопасности информации и ее носителей / А.К. Новохрестов, А.А. Конев, А.А. Шелупанов, Н.С. Егошин // Вест. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 21, № 10. – С. 93–104.

11. Королева О.Ю. Модель и метод оценки эффективности системы обеспечения информационной безопасности корпоративного хранилища данных кредитных организаций Российской Федерации: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2012. – 124 с.

12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – М.: Стандартинформ, 2006. – 53 с.

13. Базаров Т.Ю. Управление персоналом: учеб. для вузов / Т.Ю. Базаров, Б.Л. Еремин. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1998. – 423 с.

14. Модель жизненного цикла системы защиты информации / А.А. Конев, Т.Е. Минеева, М.Л. Соловьев, А.А. Шелупанов, М.П. Силич // Безопасность информационных технологий. – 2018. – Т. 25, № 4. – С. 34–41.

15. Адлер Ю.П. Методы постоянного совершенствования сквозь призму цикла Шухарта–Деминга / Ю.П. Адлер, Е.И. Хунузиди, В.Л. Шпер // Методы менеджмента качества. – 2005. – № 3. – С. 29–36.

16. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Введ. 2006–27–12. – М.: Стандартинформ, 2006. – 31 с.

17. Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1592-prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239>, свободный (дата обращения: 20.07.2019).

18. Об утверждении формы направления сведений о результатах присвоения объекту критической информационной инфраструктуры одной из категорий значимости либо об отсутствии необходимости присвоения ему одной из таких категорий: приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 22.12.2017 г. № 236 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1590-prikaz-fstek-rossii-ot-22-dekabrya-2017-g-n-236>, свободный (дата обращения: 20.07.2019).

Соловьев Михаил Леонидович

И.о. ректора Сибирского гос. ун-та телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)
Кирова ул., д. 86, г. Новосибирск, Россия, 630102
ORCID 0000-0002-4242-5571
Тел.: +7 (383-2) 69-83-15
Эл. почта: miksol57@list.ru

Минеева Татьяна Евгеньевна

Выпускник каф. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID 0000-0003-1702-8731
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: tatianamineeva7@gmail.com

Конев Антон Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID 0000-0002-3222-9956
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: kaa1@keva.tusur.ru

Буинцев Дмитрий Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 90-01-01
Эл. почта: buintsev-dn@tusur.ru

Soloviev M.L., Mineeva T.E., Konev A.A., Buintsev D.N.

Model of security threats arising from the management of information security systems

This paper presents a threat model aimed at improving the security level of an information protection system. To build the model, graph theory and business process management theory are used. The developed model includes threats aimed at personnel, technical and regulatory components of the information protection system. The types of threats are formed on the basis of the Deming cycle, which allows to take into account all the significant processes of system management. Taking into account all the significant components and processes of managing the information security system is a significant advantage over existing threat models.

Keywords: security threat model, information protection system, integrity threats, life cycle, management processes, list of information threats.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-31-36

References

1. *Ob utverzhdenii Trebovaniy k sozdaniyu sistem bezopasnosti znachimykh obyektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii i obespecheniyu ih funktsionirovaniya* [On approval of the Requirements for the creation of security systems of significant objects of the critical information infrastructure of the Russian Federation and ensuring their functioning]: the order of the Federal Service for Technical and Export Control dated December 21, 2017, no. 235. (in Russ.). Available at: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1589-prikaz-fstek-rossii-ot-21-dekabrya-2017-g-n-236> (accessed: July 20, 2019).

2. GOST R 50922–2006. *Zaschita informatsii. Osnovnyye terminy i opredeleniya* [GOST R 50922–2006. Protection of information. Basic terms and definitions]. M., 2008. 12 p. (in Russ.).
3. Konev A.A., Davydova E.M. [Approach to the description of the structure of the information security system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2013, no. 2 (28), pp. 107–111 (in Russ.).
4. Jouini M., Ben Arfa Rabai L., Ben Aissa A. Classification of Security Threats in Information Systems. *Procedia Computer Science*, 2014, vol. 32, pp. 489–496.
5. Shuvalov I.A., Semenchin E.A. [Mathematical model of impact of threats on information system of processing of personal information]. *Fundamental research*, 2013, no. 10-3, pp. 529–533 (in Russ.).
6. Prischep, A.A., Timchenko S.V., Shelupanov A.A. [Approaches and criteria for assessing information security risks]. *IT Security (Russia)*, 2007, no. 4, pp. 15–21 (in Russ.).
7. Mironova V.G., Shelupanov A.A. [Analysis of stages preproject survey information system of personal data]. *Vestnik SibSAU*, 2011, no. 2 (35), pp. 45–48 (in Russ.).
8. Mironova V.G., Shelupanov A.A. [Methodology of formation of threats of safety confidential information in uncertain conditions of their emergence]. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2012, no. 12 (137), pp. 39–45 (in Russ.).
9. Novokhrestov A., Konev A. Mathematical model of threats to information systems. *Prospects of Fundamental Sciences Development, PFSD-2016. AIP Conf. Proc.*, 1772, 060015.
10. Novokhrestov A.K., Konev A.A., Shelupanov A.A., Yegoshin N.S. [Information and information carrier security threat model]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 10, pp. 93–104 (in Russ.).
11. Koroleva O.Yu. *Model' i metod otsenki effektivnosti sistemy obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti korporativnogo khranilishcha dannykh kreditnykh organizatsiy Rossiyskoy Federatsii* [A model and method for assessing the effectiveness of the information security system of a corporate data warehouse of credit institutions of the Russian Federation. Thesis of Cand. of Tech. Science.]. SPb., 2012, 124 p. (in Russ.).
12. GOST R ISO/IEC 15288-2005. *Informatsionnaya tehnologiya. Sistemnaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla sistem* [GOST R ISO/IEC 15288-2005. Information technology. System engineering. System life cycle processes]. M., 2006, 53 p. (in Russ.).
13. Bazarov T.Yu., Eremin B.L. *Upravlenie personalom* [Personnel Management]. M., Banks and stock exchanges, UNITI, 1998, 423 p. (in Russ.).
14. Konev, A.A., Mineeva T.E., Soloviev M.L., Shelupanov A.A., Silich M.P. [Model of the life cycle of the information security system]. *IT Security (Russia)*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 33–41 (in Russ.).
15. Adler Yu.P., Hunuzidi E.I., Shper V.L. [Methods of continuous improvement through the prism of the Shewhart-Deming cycle]. *Quality management methods*, 2005, no. 3, pp. 29–36 (in Russ.).
16. GOST R ISO/IEC 27001-2006. *Informatsionnaya tehnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Sistemy menedzhmenta informatsionnoy bezopasnosti* [GOST R ISO/IEC 27001-2006. Information technology. Methods and means of security. Information security management systems]. M., 2006, 31 p. (in Russ.).
17. *Ob utverzhdenii Trebovaniy po obespecheniyu bezopasnosti znachimykh obyektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii* [On the approval of the Requirements for ensuring the security of significant objects of the critical information infrastructure of the Russian Federation]: the order of the Federal Service for Technical and Export Control dated 25.12.2017, no. 239 (in Russ.). Available at: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1592-prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239> (accessed: July 20, 2019).
18. *Ob utverzhdenii formy napravleniya svedeniy o rezultatah prisvoeniya obyektu kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury odnoy iz kategoriy znachimosti libo ob otsutstvii neobходимosti prisvoeniya emu odnoy iz takih kategoriy* [On the approval of the form for sending information on the results of assigning a critical information infrastructure to the object of one of the importance categories or on the absence of the need to assign one of such categories to it]: the order of the Federal Service for Technical and Export Control dated December 22, 2017, no. 236 (in Russ.). Available at: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1590-prikaz-fstek-rossii-ot-22-dekabrya-2017-g-n-236> (accessed: July 20, 2019).

Mikhail L. Soloviev

Acting Rector
Siberian State University of Telecommunications
and Information Sciences (SibSUTIS)
86, Kirov st., Novosibirsk, Russia, 630102
ORCID 0000-0002-4242-5571
Phone: +7 (383-2) 69-83-15
Email: miksol57@list.ru

Tatiana E. Mineeva

Graduate, Department of Information Systems Security,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID 0000-0003-1702-8731
Phone: +7 (382-2) 70-15-29
Email: tatianamineeva7@gmail.com

Anton A. Konev

Candidate of Engineering Science, Assistant Professor,
Department of Integrated Information Security
of Electronic Computing Systems (KIBEVS), TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID 0000-0002-3222-9956
Phone: +7 (382-2) 70-15-29
Email: kaa1@keva.tusur.ru

Dmitriy N. Buintsev

Candidate of Engineering Science, Assistant Professor,
Department of Integrated Information Security
of Electronic Computing Systems (KIBEVS), TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 90-01-01
Email: buintsev-dn@tusur.ru

УДК 519.25: 004.8

А.В. Куртукова, А.С. Романов

Моделирование архитектуры нейронной сети в задаче идентификации автора исходного кода

Предлагаются новые гибридные архитектуры нейронных сетей для решения задачи идентификации автора исходного кода. Рассматриваются модели на основе популярных однонаправленных и двунаправленных сверточно-рекуррентных архитектур. Установлено, что наиболее эффективной моделью является гибридная нейронная сеть, которая достигает точности 97% и демонстрирует независимость от языка, на котором программирует автор.

Ключевые слова: модель, машинное обучение, исходный код, идентификация, глубокие нейронные сети.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-37-42

Решения задачи идентификации автора исходного кода [1] представляют большой интерес как для отечественных, так и для иностранных исследователей в областях прикладной лингвистики, компьютерной криминалистики в качестве инструмента для идентификации авторов-вирусописателей, а также защиты интеллектуальной собственности как меры оценки оригинальности программных решений, защищенных авторскими правами.

Развитие информационных технологий влечет за собой создание новых и совершенствование уже существующих методов [2–9] обработки текстовых данных и принятия решений. При этом стоит учитывать опыт и результаты, полученные применением традиционных подходов, зарекомендовавших себя при решении аналогичных и смежных задач интеллектуального анализа текста.

В ранних трудах, посвященных решению поставленной задачи, как правило, применялись подходы на основе классических алгоритмов машинного обучения и статистики. Исследование Wang N. и Ji S. [10] посвящено методу, объединяющему статический и динамический анализы исходных кодов. Под динамическими признаками подразумевались такие признаки, как вызовы функций, выделение памяти и т.п. Использование такого метода при решении задачи определения автора исходного кода позволяет избежать необходимости полного переобучения при увеличении тренировочной выборки, а также потери точности на больших авторских корпусах. Точность метода – 94% на корпусе из 23 авторов.

Большую популярность среди исследователей имеет метод SCAP [11], применяющий для разграничения авторского инварианта статистические профили программистов, включающие в себя определенный ряд метрик (стиль комментариев, предпочитаемые типы данных, особенности именования идентификаторов и т.п.). На основе полученных профилей обучается классификатор машины опорных векторов (SVM). Такой метод позволяет получить заключение о принадлежности неизвестного образца исходного кода тому или иному профилю за короткий промежуток времени, однако имеет недостаточно высокую точность – 80% для 34 авторов,

программирующих на JavaScript. В работе [12] представлена программная реализация методики SCAP, а также приведены результаты экспериментов для языков Java и C++. Точность идентификации для этих языков составила 91%.

Метод SVM использовался также в работе [13]. На вход классификатору подавался результат работы традиционного для анализа текста алгоритма машинного обучения – абстрактных синтаксических деревьев (АСД), учитывающих различные стилометрические признаки, в том числе признаки, устраняющиеся при рефакторинге программного кода. К последним относятся длинные методы, преобладание операторов включения над условными, большое количество комментариев и другие признаки, демонстрирующие степень отклонения программиста от парадигм написания кода. Точность такого подхода составила 75% на корпусе из 9 программистов, пишущих на Java.

Более современными подходами к идентификации автора исходного кода являются различные архитектуры нейронных сетей (НС). Авторы методики [14] предлагают осуществлять обучение НС на наборе признаков, полученных при помощи методов роя части (МРЧ) и обратного распространения ошибки. Так, тренировочные наборы включают в себя лексические, структурные (стиль расстановки скобок, предпочтение символов табуляции пробельным), а также синтаксические признаки, извлекаемые АСД. Классификация обученной авторами НС продемонстрировала точность 91% на корпусе из 40 авторов, программирующих на Java.

Наилучшие результаты при определении автора исходного кода демонстрируют алгоритмы глубокого обучения. Работа [15] посвящена подходу на основе ансамбля глубокой рекуррентной нейронной сети (RNN) и алгоритма случайного леса. Эксперименты, проведенные авторами, подтвердили возможность такой архитектуры осуществлять идентификацию автора-программиста обфусцированного кода с точностью порядка 95%. Тренировочный корпус авторов работы включает в себя образцы 142 авторов, программирующих на языке C++.

Особого внимания заслуживают двунаправленные RNN – наиболее эффективные среди глубоких

архитектур и фундаментальные для обработки больших данных, представленных в текстовом виде. Архитектура двунаправленной LSTM (BiLSTM) была выбрана исследователями В. Alsulami и Е. Dauber [16] и позволила им добиться точности идентификации автора исходного кода 96% для 25 Python-программистов и 85% для 10 программистов, пишущих на C++.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о высокой эффективности глубоких архитектур НС, а также ансамблей классификаторов, комбинирующих в себе традиционные алгоритмы машинного обучения и различные модели НС.

Таким образом, была сформулирована цель исследования – смоделировать и реализовать глубокую архитектуру НС, позволяющую идентифицировать автора исходного кода с высокой точностью независимо от языка программирования.

Постановка задачи

Разрабатываемая математическая модель должна быть классифицирующей, описывающей процесс определения принадлежности автора анонимного образца исходного кода программы конкретному классу, исходя из поданных ей на вход обучающих данных.

Пусть имеется множество исходных кодов программ $\mathbf{S} = \{s_1, \dots, s_k\}$, где каждый исходный код рассматривается как вектор признаков $\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$, и множество авторов $\mathbf{A} = \{a_1, \dots, a_l\}$. Для подмножества исходных кодов $\mathbf{S}' = \{s_1, \dots, s_m\} \subseteq \mathbf{S}$, где $m < k$ – авторы известны, существует множество пар «исходный код-автор» $(s_i, a_j) \in \mathbf{D} \subseteq \mathbf{S}' \times \mathbf{A}$, где $s_i \in \mathbf{S}'$, $a_j \in \mathbf{A}$. Решение задачи состоит в идентификации автора, принадлежащего множеству \mathbf{A} , являющегося истинным автором анонимных образцов исходных кодов подмножества $\mathbf{S}'' = \mathbf{S} / \mathbf{S}'$.

Данную задачу следует рассматривать как задачу многоклассовой классификации. Так, множество \mathbf{A} состоит из множества предопределенных классов и их меток, множество \mathbf{D} включает в себя исходные коды для обучения классификатора, а множество \mathbf{S}'' содержит классифицируемые исходные коды.

Цель состоит в разработке модели, решающего поставленную задачу – нахождение целевой функции $\mathbf{F}: \mathbf{S} \times \mathbf{A} \rightarrow [0, 1]$, которая относит некоторый исходный код из множества \mathbf{S} к его истинному автору. Значение функции описывается как степень принадлежности объекта классу, где 1 соответствует полному соответствию целевому классу, а 0, напротив, полное несоответствие.

Моделирование архитектур нейронных сетей

При анализе исходных кодов следует учитывать особенности искусственных текстов, в частности, семантические и синтаксические правила, структурные признаки, а также парадигмы программирования. Этим обусловлен выбор сверточно-рекуррентной архитектуры (CRNN) для решения поставленной задачи. С целью выявления большого коли-

чества информативных признаков следует обрабатывать исходные коды на символьном уровне. Такой вид представления данных позволит CRNN «охватывать» как объемные языковые конструкции, так и локальные особенности написания программного кода.

Наиболее сложным процессом при моделировании архитектуры CRNN является выбор самой эффективной для идентификации автора исходного кода архитектуры. В рамках данного исследования было решено смоделировать следующие CRNN:

- CNN-SimpleRNN;
- SeparableCNN-SimpleRNN;
- CNN-GRU/LSTM;
- CNN-BiGRU/BiLSTM.

Перечисленные архитектуры имеют различные математические аппараты и существенные отличия в процессах осуществляемого обучения.

В общем случае формирование выходной карты признаков скрытого слоя l CNN архитектурой можно описать следующим образом:

$$h_j^l = f\left(\sum_i x_i^{l-1} * k_j^l + b_j^l\right), \quad (1)$$

где f – функция активации; b_j – коэффициент сдвига для карты признаков; k_j – ядро свертки номер j ; x_i^{l-1} – карта признаков предыдущего слоя; $*$ – операция свертки.

Работа как простых CNN, так и отдельных CNN (SeparableCNN) заключается в параллельном анализе n -грамм, где n определяется размером фильтра свертки. Различие данных архитектур состоит лишь в способности отдельных CNN раскладывать ядро свертки на меньшие ядра, что в некоторых случаях может дать прирост точности за счет более глубокого анализа.

Состояние простой RNN в момент времени t формально может быть задано как

$$s_t = f(a_t) = f(b + \mathbf{W}_{s_{t-1}} + \mathbf{U}_{x_t}). \quad (2)$$

Тогда выход простой RNN будет выглядеть как:

$$y_t = h(o_t) = h(c + \mathbf{V}_{s_t}), \quad (3)$$

где $f()$ – нелинейность RNN (как правило, сигмоидальная функция), h – функция активации выходного слоя (для мультiclassовой классификации – Softmax), b, c – внутренние параметры, \mathbf{W} – матрица весов для перехода между скрытыми состояниями, \mathbf{U} – матрица входов, \mathbf{V} – матрица выходов.

На практике простой RNN не всегда хватает для «запоминания» далеко расположенных в текстовой последовательности зависимостей. Наиболее распространенным подходом к решению такой проблемы является использование долгой краткосрочной памяти (LSTM), основанной на гейтах (узлах) входа, забывания и выхода. Гейт забывания f_i функционирует на основе сцепленных и переданных сигмоидальной функции на предыдущем шаге значений. На выходе она выводит значение f_i в диапазоне $[0; 1]$. Затем f_i и c_{t-1} поэлементно умножаются: если получается значение 0, то f_i исключается из c_{t-1} , если 1, то включается. Гейт забывания можно описать как

$$f_t = \sigma(\mathbf{W}_f \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_f), \quad (4)$$

где \mathbf{W}_f – весовая матрица забывания, \mathbf{h}_t – вектор скрытого состояния в момент t , \mathbf{x}_t – входной вектор в момент t , b_f – внутренний параметр забывания; σ – сигмоидальная функция.

При работе фильтра обновления происходит сцепление входного значения и представления из предыдущего шага. Функция тангенса позволяет получить несколько значений, из которых с помощью сигмоидальной функции производится выбор включаемых в c_{t-1} значений:

$$i_t = \sigma(\mathbf{W}_i \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_i), \quad (5)$$

$$\tilde{C}_t = \tan h(\mathbf{W}_c \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_c), \quad (6)$$

где \mathbf{W}_c , \mathbf{W}_i – весовые матрицы обновления и входа, b_c , b_i – внутренние параметры обновления и входа.

Полученные значения могут использоваться как выходные. Состояние C_t ячейки передается в функцию тангенса и с помощью поэлементного умножения выбирается значение, которое будет включено в c_{t-1} .

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t, \quad (7)$$

$$o_t = \sigma(\mathbf{W}_o [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_o), \quad (8)$$

$$h_t = o_t \cdot \tan h(C_t), \quad (9)$$

где \mathbf{W}_o – весовая матрица выхода, b_o – внутренние параметры выхода.

Эффективность использования двунаправленных архитектур была доказана исследователями экспериментально [16]. Этим обусловлена необходимость их моделирования в рамках решения поставленной задачи.

Особенность BiLSTM состоит в наличии двух типов связей: одна направлена вперед во времени, что дает возможность учитывать представления с предыдущих шагов, а другая направлена обратно, что позволяет учитывать представления шагов, расположенных впереди. Таким образом, с целью реализации BiLSTM математический аппарат однонаправленной LSTM дополняется аналогичными гейтами и фильтрами, однако ориентированными на шаг во времени $t+1$. На примере гейта забывания

$$f_t = \sigma(\mathbf{W}_f \cdot [h_{t+1}, \mathbf{x}_t] + b_f). \quad (10)$$

Недостатком LSTM- и BiLSTM-архитектур является их требовательность к вычислительным ресурсам. При недостатке вычислительных ресурсов данные НС могут быть замещены своими более простыми аналогами – управляемыми рекуррентными блоками (GRU) и их двунаправленной модификацией (BiGRU).

В GRU используются гейты u_t обновления как альтернатива комбинации входного и забывающего гейтов LSTM и перезагрузки r_t как способ переноса памяти от одного шага к другому.

Гейт обновления u_t отбирает информацию, которая должна пойти дальше, из предыдущих шагов с помощью сигмоидальной функции

$$f_u = \sigma(\mathbf{W}_u \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_u). \quad (11)$$

Гейт перезагрузки можно представить как:

$$r_t = \sigma(\mathbf{W}_r \mathbf{x}_t + \mathbf{W}_{hr} h_{t-1} + b_r), \quad (12)$$

где \mathbf{W}_u , \mathbf{W}_r – весовые матрицы обновления и перезагрузки, b_u , b_r – внутренние параметры обновления и перезагрузки.

Следовательно, выход блока h_t является комбинацией предыдущего выхода h_{t-1} и кандидата в выход h_t , являющегося зависимым от гейта перезагрузки:

$$\tilde{h}_t = \tan h(\mathbf{W}_{\tilde{h}} \cdot \mathbf{x}_t + \mathbf{W}_{h\tilde{h}} [r_t \cdot h_{t-1}]), \quad (13)$$

$$h_t = (1 - u_t) \cdot \tilde{h}_t + h_{t-1}. \quad (14)$$

Принцип работы двунаправленной GRU (BiGRU) аналогичен BiLSTM.

Постановка эксперимента и его результаты

Для получения достоверных результатов работы каждой модели была собрана база исходных кодов программ с ресурса GitHub [17]. В базу были включены как наиболее популярные согласно индексу TIOBE [18], так и только набирающие популярность языки программирования. Подробная информация о собранной экспериментальной базе представлена в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальная база

Язык	Количество кодов	Количество авторов	Средняя длина кода, символов
C++	12366	72	988
Java	39708	73	2409
JS	18735	69	397
Python	16783	57	532
C	17274	62	1162
C#	19378	71	638
Ruby	19150	58	304
PHP	17158	80	374
Swift	12672	74	775
Go	14067	81	816
Groovy	14002	68	167
Kotlin	15274	72	301
Perl	11189	61	251

Рассмотренные модели были реализованы на языке программирования Python с использованием библиотек для глубокого анализа данных Keras [19] и TensorFlow [20].

Оценка качества моделей производилась посредством перекрестной проверки по 10 блокам (кроссвалидации). Такая процедура позволяет избежать проблему чрезмерного разброса оценок при проверке и получить достоверный результат. Точность на каждом из блоков определяется как

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}}, \quad (15)$$

где TP – истинно-положительное решение, TN – истинно отрицательное решение, FP – ложно положительное решение, FN – ложно отрицательное решение. Данные показатели рассчитываются на основе таблицы сопряженности, где содержится информация о том, сколько раз система приняла верное и сколько раз неверное решение по исходным кодам заданного класса.

Результаты валидации описанных моделей на корпусе из 10 авторов, ограниченном 30 файлами и 500 символами, представлены в табл. 2.

В каждую из моделей была включена CNN-часть, позволяющая всем моделям вести параллельную обработку униграмм, триграмм и пентаграмм символов поданного на вход исходного кода.

Наибольшая точность достигается моделями с BiLSTM и BiGRU, позволяющими производить обработку таких n -грамм в прямом и обратном порядке. Для данных моделей были проведены дополнительные эксперименты с корпусами, включающими в себя образцы 5 и 20 авторов. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 2

Язык	CNN-RNN, %	CNN-GRU, %	CNN-BiGRU, %	CNN-LSTM, %	CNN-BiLSTM, %	SCNN-RNN, %
C++	77	71,8	87,5	83	65	64
Java	58	74	92	76,4	96,4	66
JS	60,9	67	88	73	83	59,9
Python	42	74	92	82	92	60,5
C	57	73,2	93	76	96	58
C#	73	69,8	95	85,2	95,2	61,8
Ruby	68	62	89	72,8	92	47,6
PHP	75	68,5	88,3	84,3	82	58
Swift	44,5	72	94	80	62	44
Go	55	81,4	86	84	90	50
Groovy	49,3	78	96	92,7	97	60
Kotlin	25	71,5	85	89,1	67,9	38
Perl	62	69	91	87	59	55

Таблица 3

Архитектура	CNN-BiGRU			CNN-BiLSTM		
	5	10	20	5	10	20
Авторы (кол-во)						
Java, %	97,2	92	90	98,5	96,4	93,5
C, %	96,1	93	89	97	96	74
C++, %	92	87,5	81,5	93	65	59
Python, %	95,2	92	90	100	92	72
C#, %	95,5	95	93,3	96	95,2	56
JS, %	91,5	88	86,2	94	83	73
PHP, %	92	88,3	82,8	96	82	45
Ruby, %	92,7	89	86	100	92	90
Swift, %	98,3	94	89,2	95,2	62	49
Go, %	93,1	86	83	94	90	62
Groovy, %	99	96	92,5	97,9	97	75
Kotlin, %	91	85	80,9	92	67,9	55
Perl, %	96,3	91	87	98	59	57

Для вынесения конкретных рекомендаций по применению модели на основе гибридной нейронной сети (HNN) были проведены эксперименты, направленные на выявление влияния объема корпуса (количества исходных кодов и их длин) на итоговый результат классификации. Результаты данных экспериментов над HNN с рекуррентной частью BiGRU представлены на рис. 1 и 2. Данные графики демонстрируют точности кроссвалидации на различных по объему выборках для 10 и 20 авторов.

Заключение

В данной статье для решения поставленной задачи были рассмотрены шесть моделей на основе различных CRNN. Научная новизна работы заключается в применении ранее неопробованных в задачах интеллектуального анализа текста архитектур HC, выявлении наиболее эффективных из них и дальнейшем внедрении в программную систему для идентификации автора исходного кода.

Сравнительно низкая точность моделей (~71%), включающих в себя однонаправленные рекуррентные архитектуры (SimpleRNN, GRU, LSTM), обу-

словлена их неспособностью в отличие от двунаправленных сетей анализировать символическую последовательность как в прямом, так и в обратном порядке.

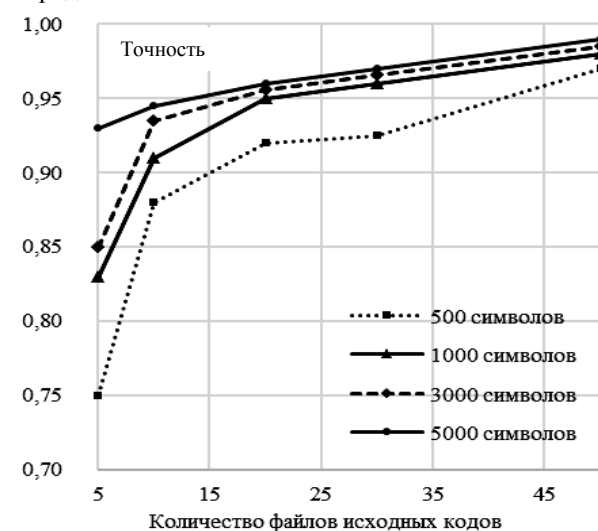


Рис. 1. Эксперимент с 10 авторами

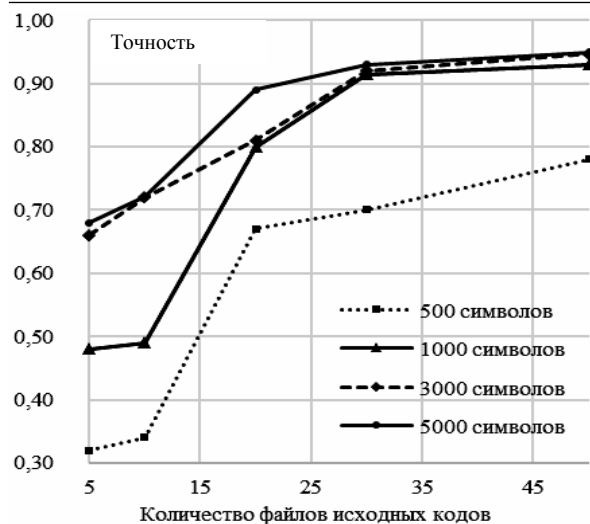


Рис. 2. Эксперименты с 20 авторами

Наибольшая точность (97%) была достигнута моделью, комбинирующей в себе архитектуры многослойной CNN и BiLSTM, однако данная модель оказалась неприменимой к большим по объему авторским корпусам.

Таким образом, хотя модель CNN-BiGRU и демонстрирует менее точный в сравнении с моделью CNN-BiLSTM результат, ввиду наличия у последней большего числа встроенных фильтров и операций, эксперименты показали ее эффективность при увеличении тренировочной выборки, а также независимость от языка программирования, на котором пишет автор.

Исследование, проведенное с использованием модели CNN-BiGRU, позволило определить оптимальный для получения достоверных результатов объем тренировочной выборки:

- для достижения точности 90% и выше на корпусе 10 авторов необходимо применять не менее 10 файлов объемом от 1 000 символов;

- на корпусе 20 авторов необходимо применять не менее 30 файлов объемом от 1 000 символов.

Уменьшение количества файлов должно сопровождаться увеличением объема одного исходного кода и, напротив, уменьшение объема должно сопровождаться уменьшением количества исходных кодов в корпусе.

Следует отметить, что все реализованные модели работают с не обработанными предварительно исходными кодами, а не с пространством признаков, выделенных экспертом. Это позволяет моделям выявлять закономерности, не контролируемые программистом на подсознательном уровне, а значит делает их устойчивыми к намеренному запутыванию кода.

Литература

1. Куртукова А.В. Идентификация автора исходного кода методами машинного обучения / А.В. Куртукова, А.С. Романов // Труды СПИИРАН. – 2019. – № 18(3). – С. 741–765.
2. Анализ тональности текстов с использованием методов машинного обучения / А.С. Романов, А.В. Куртукова, Р.В. Мещеряков, М.И. Васильева // Сб. трудов конф.

«The II International Conference R. Piotrowski's Readings LE & AL'2017», СПб., 27 ноября 2017 г. – М.: Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V., 2018. – С. 86–95 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ceur-ws.org/Vol-2233>, свободный (дата обращения: 12.06.19).

3. Романов А.С. Обобщенная методика идентификации автора неизвестного текста / А.С. Романов, А.А. Шелупанов, С.С. Бондарчук // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 1(21), ч. 1. – С. 108–112.

4. Романов А.С. Методика проверки однородности текста и выявления плагиата на основе метода опорных векторов и фильтра быстрой корреляции / А.С. Романов, Р.В. Мещеряков, З.И. Резанова // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 2(32). – С. 264–269

5. Исхакова А.О. Модель процесса формирования инвариантов классов текстов / А.О. Исхакова // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 76–80.

6. Костюченко Е.Ю. Обработка естественной информации на основе аппарата нейронных сетей / Е.Ю. Костюченко // Доклады ТУСУР. – 2009. – № 1(19), ч. 2. – С. 54–56.

7. Чемерилов В.В. Система автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений в текстовом отрывке / В.В. Чемерилов, А.С. Фадеев // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 42–48.

8. Mäntylä M.V. The Evolution of Sentiment Analysis / M. Viking, D. Graziotin, M. Kuutila // A Review of Research Topics, Venues, and Top Cited Papers. – 2018. – ArXiv abs/1612.01556.

9. Burrows S. Application of information retrieval techniques for source code authorship attribution / S. Burrows, A. Uitendbogerd, A. Turpin // 14th International Conference on Database Systems for Advanced Applications. – 2009. – P. 699–713.

10. Wang N. Integration of Static and Dynamic Code Stylometry Analysis for Programmer De-anonymization / N. Wang, S. Ji // Proceedings of the 11th ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security. – 2018. – P. 74–84.

11. Wisse W. Scripting DNA: Identifying the JavaScript Programmer / W. Wisse, C.J. Veenman // Digit. Investig. – 2015. – № 15. – P. 61–71.

12. Tennyson M.F. ASAP: A Source Code Authorship Program // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. – 2019. – P. 1–14.

13. Zia T. Source Code Author Attribution Using Author's Programming Style and Code Smells / T. Zia, M. Ilyas // I.J. Intelligent Systems and Applications. – 2017. – № 5. – P. 27–33.

14. Yang X. Authorship attribution of source code by using backpropagation neural network based on particle swarm optimization / X. Yang, Q. Li, Y. Guo, M. Zhang // PLoS ONE. – 2017. – № 12(11) 95 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187204>, свободный (дата обращения: 14.06.19).

15. Abuhamad M. Large-Scale and Language-Oblivious Code Authorship Identification / M. Abuhamad, T. AbuHmed, A. Mohaisen, D. Nyang // Proceedings of the ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. – 2018. – P. 101–114.

16. Alsulami B. Source Code Authorship Attribution using Long Short-Term Memory Based Networks / B. Alsulami, E. Dauber, R. Harang, S. Mancoridis, R. Greenstadt // Proceedings of the 22nd European Symposium on Research in Computer Security. – 2017. – P. 65–82.

17. Github [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/>, свободный (дата обращения: 17.06.19).

18. Index TIOBE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tiobe.com>, свободный (дата обращения: 22.06.19).

19. Keras [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://keras.io/>, свободный (дата обращения: 25.06.19).

20. TensorFlow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/>, свободный (дата обращения: 25.06.19).

Куртукова Анна Владимировна

Студентка каф. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050
Тел.: +7-905-991 6713
Эл. почта: av.kurtukova@gmail.com

Романов Александр Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050
Тел.: + 7 (382-2) 41 34 26
Эл. почта: alexx.romanov@gmail.com

Kurtukova A.V., Romanov A.S.

Modeling the neural network architecture to identify the author of the source code

The paper proposes new hybrid architectures of neural networks to solve the problem of identifying the author of the source code. Models based on popular unidirectional and bidirectional convolutional-recurrent architectures are considered. The most effective model achieves an accuracy of 97% and demonstrates independence from the language in which the author programs, which makes it better in comparison with analogues.

Keywords: model, machine learning, source code, identification, deep neural networks.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-37-42

References

1. Kurtukova A.V., Romanov A.S. [Identification author of source code by machine learning methods]. *SPIIRAS Proceedings*, 2019, vol. 18, no. 3. pp. 741–765 (in Russ.).
2. Romanov A.S., Vasilieva M.I., Kurtukova A.V., Meshcheryakov R.V. [Sentiment Analysis of Text Using Machine Learning Techniques]. *Proceedings 2nd International Conference «R. PIOTROWSKI'S READINGS LE & AL'2017»* (Saint-Petersburg, 2017). Saint-Petersburg, Informatik V Publ., 2018, pp. 86–95 (In Russ.). Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2233> (Accessed: June 12, 2019).
3. Romanov A.S., Shelupanov A.A., Bondarchuk S.S. Generalized authorship identification technique]. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, vol. 1, no. 21, pp. 108–112 (in Russ.).
4. Romanov A.S., Meshcheryakov R.V., Rezanova Z.I. [Plagiarism detection and text homogeneity checking technique based on one-class support machine and fast correlation-based filter]. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, vol. 2, no. 32, pp. 264–269 (in Russ.).
5. Iskhakova A.O. [Model to set up the texts class invariants]. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 76–80 (in Russ.).

6. Kostyuchenko E.Y. [Processing of the natural information on the basis of neural networks]. *Proceedings of TUSUR University*, 2009, vol. 1, no. 19, pp. 54–56 (in Russ.).

7. Chemerilov V.V., Fadeev A.S. [System of automatic homography resolution based on the semantic connection words of adjacent sentences in a text passage]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 42–48 (in Russ.).

8. Mäntylä M.V., Graziotin D., Kuutila M. The Evolution of Sentiment Analysis. *A Review of Research Topics, Venues, and Top Cited Papers*, 2018, *ArXiv abs/1612.01556*.

9. Burrows S., Uitdenbogerd A., Turpin A. Application of information retrieval techniques for source code authorship attribution. *14th International Conference on Database Systems for Advanced Applications*, 2009, pp. 699–713.

10. Wang N., Ji S. Integration of Static and Dynamic Code Stylometry Analysis for Programmer De-anonymization. *Proceedings of the 11th ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security*, 2018, pp. 74–84.

11. Wisse W., Veenman C.J. Scripting DNA: Identifying the JavaScript Programmer. *Digit. Investig.*, 2015, no. 15, pp. 61–71.

12. Tennyson M. F. ASAP: A Source Code Authorship Program. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 2019, pp. 1–14.

13. Zia T., Ilyas M. Source Code Author Attribution Using Author's Programming Style and Code Smells. *I.J. Intelligent Systems and Applications*, 2017, no. 5, pp. 27–33.

14. Yang X, Li Q., Guo Y., Zhang M. Authorship attribution of source code by using backpropagation neural network based on particle swarm optimization. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, no. 11. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187204> (Accessed: June 14, 2019).

15. Abuhamad M., AbuHmed T., Mohaisen A., Nyang D. Large-Scale and Language-Oblivious Code Authorship Identification. *Proceedings of the ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 2018, pp. 101–114.

16. Alsulami B., Dauber E., Harang R., Mancoridis S., Greenstadt R. Source Code Authorship Attribution using Long Short-Term Memory Based Networks. *Proceedings of the 22nd European Symposium on Research in Computer Security*, 2017, pp. 65–82.

17. Github. Available at: <https://github.com/> (Accessed: June 17, 2019).

18. Index TIOBE. Available at: <https://www.tiobe.com/> (Accessed: June 22, 2019).

19. Keras Documentation. Available at: <https://keras.io/> (Accessed: June 25, 2019).

20. TensorFlow Documentation. Available at: <https://www.tensorflow.org/> (Accessed: June 15, 2019).

Anna V. Kurtukova

Student, Department of Information System Security of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-905-991 6713
Email: av.kurtukova@gmail.com

Aleksandr S. Romanov

Ph.D., Associate professor, Department of Information System Security of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7 (382-2) 41 34 26
Email: alexx.romanov@gmail.com

УДК 004.934.2

Д.И. Новохрестова, Е.Ю. Костюченко, Е.С. Катаева, А.Г. Буймов, Д.Н. Буинцев

Программный комплекс по оценке разборчивости речи

Представлен программный комплекс, предназначенный для оценки качества речи на основе оценки разборчивости произношения слогов. Описаны изменения в структуре базы данных и ее наполнении, необходимом для функционирования программного комплекса, разработанные алгоритмы и функции программного продукта, а также изменения в модулях записи сеанса и оценивания слогов.

Ключевые слова: оценка качества речи, качество произнесения слогов, временная нормализация, программный комплекс, алгоритм детектирования голосовой активности.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-43-48

В настоящий момент выявлено более 100 000 случаев раковых заболеваний органов речеобразующего аппарата, и каждый год это число увеличивается на 25 000 [1, 2]. Самый распространенный вариант лечения включает в себя хирургическое вмешательство, после которого необходимо пройти речевую реабилитацию. Очевидные недостатки метода оценки качества восстановления речи, основанного на ГОСТ Р 58040–95 [3], привели к необходимости разработки алгоритмов автоматической оценки и их реализации в рамках автоматизированных систем по оценке разборчивости речи. В настоящий момент существует ряд работ по автоматизации оценки разборчивости речи [4–6], однако все они появились позднее начала разработки и появления основных алгоритмов рассматриваемого программного комплекса. В рамках исследования по восстановлению речи с использованием технических методов такие алгоритмы были разработаны и реализованы. Они были включены в разработанный программный комплекс, описанный в [7]. После предварительного тестирования было принято решение о необходимости доработки программного комплекса.

Для внедрения программного комплекса по оценке качества речи в процесс речевой реабилитации больных в рамках лечения онкологических заболеваний в НИИ онкологии г. Томска требовалось решить следующие задачи:

1. Доработка структуры базы данных для возможности хранения нескольких вариантов оценки слоговой разборчивости, для хранения сегментации сигнала, возможность указывать тип сеанса (не только слоговая или фразовая разборчивость, но и отметка о моменте записи сеанса: до или после операции).
2. Добавление в базы данных разработанных ранее списков слогов для записи.
3. Разработка и внедрение в модуль оценивания алгоритмов подсчета оценок на основе ранее описанных подходов [8, 9] и алгоритма сегментации для возможности оценивать отдельные фонемы в слогах.
4. Доработка модуля записи слогов: разработка более точного алгоритма детектирования голосовой активности, добавление возможности настройки параметров алгоритма детектирования голосовой

активности, доработка интерфейса программы для возможности коррекции процесса записи слогов.

5. Добавление возможности оценки качества произношения слогов в режиме реального времени в процессе записи сеанса.

База данных

Сама база данных до изменения структуры представлена в [10]. В данной статье опишем только внесенные изменения. Ввиду необходимости в хранении нескольких оценок для одной записи слога в таблицу Slog были добавлены 5 полей для хранения оценок (типа double), а также поле для хранения сегментации слога (тип varchar). Сегментация представляет собой набор значений, обозначающих границу между фонемами, разделенными знаком табуляции. Изменения в таблице Slog представлены в табл. 1.

Таблица 1

Измененная структура таблицы Slog в базе данных

Название поля	Тип данных
Id_zap	INT(11)
Id_seans	INT(11)
Id_slog	INT(11)
Path	VARCHAR(255)
Listen	VARCHAR(255)
Correct1	DOUBLE(255,4)
Correct2	DOUBLE(255,4)
Correct3	DOUBLE(14,4)
Correct4	DOUBLE(14,4)
Correct5	DOUBLE(14,4)
Segmentation	VARCHAR(255)

Также в таблицу Seans, где хранится информация о всех имеющихся сеансах, было добавлено поле type (тип varchar) для возможности внесения комментариев или дополнительной информации о сеансе (предполагается, что в этом поле будет указано «время» записи сеанса, а именно до или после операции).

Для возможности сегментирования записей слогов в таблицу Gostslog_tr добавлено поле position_trouble (тип int), в котором отражено, на каком месте в рамках данного слога стоит проблемная фонема.

Помимо изменений в структуре базы данных, были добавлены наборы слогов, по которым в

настоящий момент можно проводить записи и оценку сеансов. В настоящий момент в базе данных для слоговой разборчивости имеется 5 наборов, по трем из которых возможна оценка сеанса. В табл. 2 представлено описание наборов слоговой оценки.

Таблица 2

Описание наборов слогов в базе данных

Название набора	Кол-во	Описание
Гост1	250	Первые 250 слогов из ГОСТ Р 58040–95
Счет	10	Числа от нуля до девяти
ОнкоЯзык	90	Набор слогов с проблемными фонемами [к][с][т] и их мягкими вариантами: по 5 слогов на каждое возможное расположение фонемы в слоге (в начале, в середине, в конце)
ОнкоЯзыкНК	60	Набор слогов с проблемными фонемами [к][с][т] и их мягкими вариантами: по 5 слогов на каждое крайнее расположение фонемы в слоге (в начале, в конце)
ОнкоЯзыкН	30	Набор слогов с проблемными фонемами [к][с][т] и их мягкими вариантами: по 5 слогов с расположением фонемы в начале слога

Наборы слогов ОнкоЯзыкНК и ОнкоЯзыкН были введены ввиду ограничений алгоритма сегментации (в данный момент он работает только при расположении фонемы в начале слога при любом количестве фонем в слоге и при расположении фонемы в конце слога при наличии трех фонем в слоге). Для каждого из наборов слогов также были добавлены транскрипции каждого слога из набора и номера проблемных фонем в них.

Параметры алгоритма детектирования голосовой активности и их настройка

Используемый в программе алгоритм детектирования голосовой активности работает на основе вычисления двух параметров записанного в буфер сигнала: мера спектральной плоскостности SMF (1) и энергия E :

$$SMF = 10 \times \log_{10} \frac{Gm}{Am}, \quad (1)$$

где Gm – среднее геометрическое спектра речи, Am – среднее арифметическое спектра речи.

Алгоритм принимает решение о наличии или отсутствии речи в буфере сигнала следующим образом: вычисляются параметры для буфера сигнала, сравниваются с минимальными значениями, если разница между полученными значениями и минимальные больше пороговых значений, то принимается решение о наличии голоса на данном отрезке. Для возможности настройки параметров алгоритма для различных записывающих устройств была добавлена новая форма, позволяющая провести запись звука без голоса (запись «тишины») и запись с постоянным присутствием голоса и на основе полученных параметров (минимальные значения и пороговые значения) проводить дальнейшую запись.

При построении модели шума проводится измерение уровня энергии сигнала на записях без голоса и с голосом, меры спектральной плоскостности, количества проанализированных при их подсчете фреймов и длительности записей. По итогам обработки проводится вычисление пороговых значений энергии сигнала и меры спектральной плоскостности.

Также была добавлена возможность корректировать пороговые значения в зависимости от чувствительности микрофона и речи пациента. Для этого было добавлено поле множителя, при помощи которого редактируется порог. В настоящий момент оптимальный множитель для чувствительных микрофонов 0,5, для остальных – 0,25. Оптимальное время для каждого из видов записи 4–8 с.

Настройка параметров записи голоса доступна как из главного окна приложения (окна со списком пациентов), так и из окна, в котором непосредственно производится запись сеанса.

Модуль записи слогов

Предполагается, что запись сеанса будет происходить в автоматизированном режиме, а именно логопед (или пациент) будет участвовать только в настройках записи, а обработка записей, подсчет оценки, если необходимо, и переключение на следующий слог будут автоматическими. Форма записи слогов представлена на рис. 1. В данной версии программного комплекса возможна настройка следующих параметров:

1. Возможность воспроизведения слога. Для наборов слогов ОнкоЯзык, ОнкоЯзыкНК, ОнкоЯзыкН предусмотрена возможность воспроизведения записанного эталонного произношения слога через наушники или колонки. Данная возможность должна помочь пациенту понять, как именно необходимо произнести отображенный на экране слог.

2. Отображение слога и его транскрипции на экране. В предыдущей версии программы и слог, и его транскрипция отображались с одинаковым размером (примерно 25 кеглей). Однако после первого тестового запуска программы в НИИ онкологии было принято решение о существенном увеличении шрифта для слога и уменьшении для транскрипции ввиду того, что пациент не понимал соответствия между слогом и транскрипцией. Также была возможность еще увеличить или уменьшить размер шрифта для отображения слога.

В рамках программного комплекса [7] при неправильном срабатывании алгоритма детектирования голосовой активности возврат к предыдущему слогу осуществлялся по нажатию клавиш Ctrl+Z, в новой версии программы была добавлена кнопка «Назад», выполняющая те же функции. Замена сочетания клавиш на кнопку обосновывается тем, что назначение кнопки с подобной надписью интуитивно понятно пользователю системы, что упрощает работу с программой. Кнопка «Следующий слог» остается для записей слогов пациентов, у которых после операции речь ухудшилась до состояния, при

котором невозможно корректно определить начало и конец речи. В этом случае параметры чувствительности алгоритма будут изменены на минимальные,

запись звука будет осуществляться постоянно, а переключение между слогами будет осуществляться специалистом-логопедом.

Рис. 1. Форма записи слогов

Для оценки вариативности речи до операции необходимо записать два сеанса, которые в дальнейшем будут использоваться как эталон. Однако для знакомства пациента с программным комплексом и облегчения дальнейшей работы с ним предлагается записывать три (и более, по необходимости) сеанса, а в качестве эталона выбрать два из них.

При записи сеансов после операции появляется возможность оценивать сеанс непосредственно во время записи. Для этого необходимо отменить «Оценивать слоги при записи», после этого станет доступна кнопка «Выбор сеанса для сравнения». Если отмечена необходимость в оценке, но при этом не выбраны эталонные сеансы, программа выдаст предупреждение и не начнет сеанс записи, пока не решится этот конфликт.

При выборе сеанса для работы выбор осуществляется на основе идентификатора и даты записи. Дополнительно предоставляется информация о типе проводимой оценки и полученных результатах оценки качества произнесения. В настоящий момент можно выбрать один или два сеанса для сравнения. Возможность выбора только одного сеанса для сравнения добавлена из-за того, что есть пациенты, которые в настоящий момент проходят лечение в НИИ Онкологии, но до операции у них получилось записать только один сеанс. Для выбора доступны сеансы только такого же типа (записанные по тому же набору слогов), что и записываемый сеанс.

Модуль оценки слогов

В настоящем комплексе предусмотрено три различных способа оценки разборчивости слога. Все три вычисляются как отношение среднего коэффи-

циента корреляций между парами эталонное произношение–оцениваемое произношение (здесь и далее описана ситуация с наличием двух эталонных сеансов, однако все оценки доступны при наличии только 1 сеанса) к коэффициенту корреляции между эталонными произношениями. Таким образом, оценка заключена в интервале от 0 до 1, чем ближе к 1 полученная оценка, тем качественнее, ближе к эталону произнесена фонема. В первом и третьем способах трансформация записей для подсчета коэффициента корреляции осуществляется за счет использования функции Resample из математического пакета Matlab, во втором способе используется алгоритм динамической трансформации временной шкалы. Отличие 1-го способа от 3-го заключается в том, что в первом способе оценивается не весь слог, а только проблемная фонема, поэтому в данном случае перед непосредственной оценкой необходимо произвести сегментацию слога и выделить проблемную фонему. Ввиду того, что алгоритм сегментации работает корректно только при определенных расположениях фонем в слоге, первый способ оценивания доступен только для определенных наборов слогов.

Оценка разборчивости слога возможна не только в процессе записи сеанса, но и для существующего сеанса. Форма просмотра сеанса и его оценки представлена на рис. 2. Для того чтобы провести сегментацию, необходимо нажать кнопку «Провести сегментацию», если для данного типа сеанса функция сегментации недоступна, о этом будет выведено сообщение. Результат сегментации хранится в колонке Segmentation и после нажатия кнопки

«Сохранить» записывается в базу данных. Далее необходимо выбрать настройки оценки, а именно тип оценки и эталонные сеансы. Эталонные сеансы выбираются аналогично форме записи слогов. После выбора эталонных сеансов кнопка «Оценить сеанс» станет доступна и при ее нажатии пройдет последо-

вательная оценка всех слогов в данном сеансе. Результат будет представлен в колонке correct1 и после нажатия кнопки «Сохранить» будет сохранен в базе данных. Также после окончания вывода всех оценок подсчитывается средняя оценка сеанса и также вносится в базу данных.

id_zap	id_seans	id_slog	correct1	correct2	segmentation
12708	1099	1	1		0,162
12709	1099	2	1		0,106
12710	1099	3	1		0,094
12711	1099	4	0,27		0,138
12712	1099	5	0,427		0,085
12713	1099	6	1		0,078
12714	1099	7	0,631		0,136
12715	1099	8	0,506		0,104
12716	1099	9	0,536		0,081
12717	1099	10	1		0,130
12718	1099	11	1		0,216
12719	1099	12	0,485		0,199

Рис. 2. Форма просмотра сеанса и оценки слогов

Заключение

В работе описаны выявленные в процессе тестирования программного комплекса по оценке разборчивости речи проблемные моменты и поставлены задачи по их решению. В рамках решения каждой задачи необходимые функции были реализованы, а также описаны имеющиеся в настоящий момент ограничения по работе с программным комплексом. Доработанный программный комплекс в настоящий момент проходит процедуру внедрения в НИИ онкологии г. Томска, проведены тестовые записи, а также первые записи пациентов. Результатом записей стали рекомендации по дополнительной доработке программного комплекса, а именно:

- добавление полей в таблицу с данными о пациентах для детализации медицинской информации;
- добавление возможности записи отдельных слогов для случаев позднего обнаружения проблем с записями сеанса (к примеру, во время дополнительного прослушивания в рамках слога обнаружен посторонний шум, мешающий его восприятию);
- возможность вывода нескольких оценок, полученных разными способами, в несколько столбцов с оценками слогов.

Дальнейшая модернизация программного комплекса предполагает использование систем распознавания и анализа речи [11–17] для оценки слоговой, словесной и фразовой разборчивости. Для обеспечения безопасности хранимой информации планируется к разработке модуль криптографической защиты, который не препятствовал бы получению оценок в режиме реального времени [18].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект «Восстановление речевой функции с использованием технических методов и математического моделирования у больных раком

полости рта и ротоглотки после хирургического лечения», № 1615-00038.

Литература

1. Злокачественные новообразования в России в 2016 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2018. – 250 с.
2. Состояние онкологической помощи населению России в 2016 году / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2017. – 236 с.
3. ГОСТ Р 50840–95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 234 с.
4. Pamula H. et al. Parametric Assessment of Esophageal Speech in Post-Laryngectomy Patients // 2018 Joint Conference-Acoustics. – IEEE. – 2018. – P. 1–5.
5. Kalita S., Mahadeva Prasanna S. R., Dandapat S. Intelligibility assessment of cleft lip and palate speech using Gaussian posteriograms based on joint spectro-temporal features // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2018. – Vol. 144, No. 4. – P. 2413–2423.
6. Sumita Y.I. et al. Digitised evaluation of speech intelligibility using vowels in maxillectomy patients / Y.I. Sumita, M. Hattori, M. Murase, M.E. Elbashti, H. Taniguchi // Journal of oral rehabilitation. – 2018. – Vol. 45, No. 3. – P. 216–221.
7. Костюченко Е.Ю. Программное обеспечение для объективной оценки качества произнесения слогов при речевой реабилитации / Е.Ю. Костюченко, Р.В. Мещеряков, Д.И. Новохрестова, А.В. Пятков, Л.Н. Балацкая, Е.Л. Чойнзонов // Всерос. науч. конф. по проблемам управления в технических системах. Санкт-Петербургский гос. электротехн. Ун-т ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 2017. – № 1. – С. 277–280.
8. Kostyuchenko E. Correlation normalization of syllables and comparative evaluation of pronunciation quality in speech rehabilitation / E. Kostyuchenko, R. Meshcheryakov,

D. Ignatieva, A. Pyatkov, E. Choyzonov, L. Balatskaya // International Conference on Speech and Computer. – Springer, Cham, 2017. – P. 262–271.

9. Новохрестова Д.И. Временная нормализация слогов алгоритмом динамической трансформации временной шкалы при оценке качества произнесения слогов в процессе речевой реабилитации // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 142–145. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-142-145

10. Костюченко Е.Ю. Формирование базы данных пациентов при речевой реабилитации после комбинированного лечения онкологических заболеваний органов речеобразующего тракта / Е.Ю. Костюченко, Д.И. Новохрестова, А.В. Пятков // Электронные средства и системы управления. – Томск: ТУСУР, 2017. – №2. – С. 245–247.

11. Кипяткова И.С., Карпов А.А. Разновидности глубоких искусственных нейронных сетей для систем распознавания речи // Труды СПИИРАН. – 2016. – Т. 6, № 49. – С. 80–103.

12. Кипяткова И.С., Карпов А.А. Аналитический обзор систем распознавания русской речи с большим словарем // Труды СПИИРАН. – 2010. – Т. 12, №. 1. – С. 7–20.

13. Ishikawa K., MacAuslan J., Boyce S. Toward clinical application of landmark-based speech analysis: Landmark expression in normal adult speech // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2017. – Vol. 142, No. 5. – P. EL441–EL447.

14. Hossain M.S., Muhammad G. Emotion recognition using secure edge and cloud computing // Information Sciences. – 2019. – Vol. 504. – P. 589–601.

15. Kaya H., Karпов A.A., Salah A.A. Fisher vectors with cascaded normalization for paralinguistic analysis // Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. – 2015.

16. Криптографические протоколы в системах с ограниченными ресурсами / С.К. Росошек, Р.В. Мещеряков, А.А. Шелупанов, М.А. Соськин // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № S1. – С. 51–61.

17. Rakhmanenko I. Fusion of biLSTM and GMM-UBM systems for audio spoofing detection / I. Rakhmanenko, A. Shelupanov, E Kostyuchenko // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – 2019. – Vol. 8, No. 4. – P. 1741–1746.

18. The evaluation process automation of phrase and word intelligibility using speech recognition systems / E. Kostuchenko, D. Novokhrestova, M. Tirskaaya, A. Shelupanov, M. Mirovich-Danchenko, E. Choyzonov, L. Balatskaya // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2019. – Vol. 11658 LNAI. – P. 237–246

Новохрестова Дарья Игоревна

Преп. каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29 (внут. 29-66)
Эл. почта: ndi@fb.tusur.ru

Костюченко Евгений Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КИБЭВС ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29 (внут. 29-66)
Эл. почта: key@keva.tusur.ru

Катаева Елена Сергеевна

Ст. преп. каф. КИБЭВС ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29 (внут. 29-66)
Эл. почта: kes@keva.tusur.ru

Буймов Аркадий Георгиевич

Д-р техн. наук, профессор каф. экономики ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29 (внут. 2966)
Эл. почта: arkadii.g.buimov@tusur.ru

Буинцев Дмитрий Николаевич

Канд. техн. наук, проректор по развитию университетского комплекса и социальной работы ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 90-01-01
Эл. почта: buintsev-dn@tusur.ru

Novokhrestova D.I., Kostyuchenko E.Y., Kataeva E.S., Buimov A.G., Buintsev D.N.

Software package for assessing speech intelligibility

The article presents a software package designed to assess the quality of speech based on the evaluation of the syllables pronunciation intelligibility. Changes in the structure of the database and its filling, necessary for the functioning of the program complex, were described. The developed algorithms and functions of the software product were presented. Changes in session recording and syllable estimation modules were given.

Keywords: speech quality estimation, syllables pronunciation quality, temporal normalization, software complex, voice activity detection algorithm.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-43-48

References

1. Kaprin A.D., Starinskiy V.V., Petrova G.V. *Zlo-kachestvennyye novoobrazovaniya v Rossii v 2015 godu (zabolevaemost' i smertnost')* [Malignant neoplasms in Russia in 2016 (morbidity and mortality)], 2018, 250 p. (in Russ.)
2. Kaprin A.D., Starinskiy V.V., Petrova G.V. *Sostoyaniye onkologicheskoy pomoshchi naseleniyu Rossii v 2016 godu* [The status of cancer care for the population of Russia in 2016], 2017, 236 p. (in Russ.)
3. *GOST R 50840 – Peredacha rechi po traktam svyazi. Metody ocenki kachestva, razborchivosti i uznavaemosti* [GOST R 50840 – Voice transmission over communication paths. Methods for assessing quality, legibility and recognition], 1996, 234 p. (in Russ.)
4. Pamula H. et al. Parametric Assessment of Esophageal Speech in Post-Laryngectomy Patients *2018 Joint Conference-Acoustics*, IEEE, 2018, pp. 1–5.
5. Kalita S., Mahadeva Prasanna S.R., Dandapat S. Intelligibility assessment of cleft lip and palate speech using Gaussian posteriors based on joint spectro-temporal features *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, vol. 144, no. 4, pp. 2413–2423.
6. Sumita Y.I. et al. Digitised evaluation of speech intelligibility using vowels in maxillectomy patients *Journal of oral rehabilitation*, 2018, vol. 45, no. 3, pp. 216–221.
7. Kostyuchenko E. et al. Software for the objective assessment of the quality of pronunciation of syllables in speech rehabilitation *All-Russian Scientific Conference on Management Issues in Technical Systems. – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education St. Petersburg*

State Electrotechnical University LETI named after VI Ulyanov (Lenin), 2017, no. 1, pp. 277–280 (in Russ.)

8. Kostyuchenko E. et al. Correlation normalization of syllables and comparative evaluation of pronunciation quality in speech rehabilitation *International Conference on Speech and Computer*, Springer, Cham, 2017, pp. 262–271.

9. Novokhrestova D. Temporary normalization of syllables by the dynamic transformation algorithm of the timeline in assessing the quality of the pronunciation of syllables in the process of speech rehabilitation *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 142–145. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-142-145 (in Russ.)

10. Kostyuchenko E., Novokhrestova D., Pyatkov A. Formation of a database of patients with speech rehabilitation after combined treatment of oncological diseases of the organs of the speech-forming tract *Electronic means and control systems*, Tomsk, 2017, no. 2, pp. 245–247 (in Russ.)

11. Kipyatkova I.S., Karpov A.A. Variants of Deep Artificial Neural Networks for Speech Recognition Systems. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2016, vol. 6, no. 49, pp. 80–103 (in Russ.)

12. Kipyatkova I.S., Karpov A.A. Analytical review of Russian speech recognition systems with a large dictionary *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 7–20 (in Russ.)

13. Ishikawa K., MacAuslan J., Boyce S. Toward clinical application of landmark-based speech analysis: Landmark expression in normal adult speech *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, vol. 142, no. 5, pp. EL441–EL447.

14. Hossain M.S., Muhammad G. Emotion recognition using secure edge and cloud computing *Information Sciences*, 2019, vol. 504, pp. 589–601.

15. Kaya, Heysem, Alexey A. Karpov, and Albert Ali Salah. Fisher vectors with cascaded normalization for paralinguistic analysis. *Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. 2015.

16. Rososhek S.K., Meshcheryakov R.V., Shelupanov A.A., Sonkin M.A. *Kriptograficheskie protokoly v sistemah s ogranichennymi resursami* [Cryptographic protocols in systems with limited resources] *Computational Technologies*, vol. 12, no. S1, 2007, pp. 51–61 (in Russ.)

17. Rakhmanenko I., Shelupanov A., Kostyuchenko E. [Fusion of biLSTM and GMM-UBM systems for audio spoofing detection] *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 8, no. 4, 2019, pp. 1741–1746

18. Kostuchenko E., Novokhrestova D., Tirskaaya M., Shelupanov A., Nemirovich-Danchenko M., Choynzonov E., Balatskaya L. [The evaluation process automation of phrase and word intelligibility using speech recognition systems] *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 11658 LNAI, 2019, pp. 237–246

Daria I. Novokhrestova

Lecturer, Department of Complex Information Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., 634050, Tomsk, Russia
Phone: +7 (382-2) 70-15-29 (main 29-66)
Email: ndi@fb.tusur.ru

Evgeny Y. Kostyuchenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Complex Information Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., 634050, Tomsk, Russia
Phone: +7 (382-2) 70-15-29 (main 29-66)
Email: key@keva.tusur.ru

Elena S. Kataeva

Senior Lecturer, Department of Complex Information Security, TUSUR
40, Lenin pr., 634050, Tomsk, Russia
Phone.: +7 (382-2) 70-15-29 (main 29-66)
Email: kes@keva.tusur.ru

Arkady G. Buymov

Dr. Tech. of Sciences, Professor,
Department of Economics, TUSUR
40, Lenin pr., 634050, Tomsk, Russia
Phone: +7 (382-2) 70-15-29 (main 2966)
Email: arkadii.g.buimov@tusur.ru

Dmitry N. Buintsev

Candidate of Technical Sciences, Vice-Rector for University Infrastructure Development and Social Work, TUSUR
40, Lenin pr., 634050, Tomsk, Russia
Phone: +7 (382-2) 90-01-01
Email: buintsev-dn@tusur.ru

УДК 519.25

Е.С. Катаева, А.Ю. Якимук

Применение метода выделения синхронности при оценке сходства вокальных исполнений

Рассматриваются результаты применения метода выделения синхронности, разработанного специально для оценки степени синхронности временных рядов. Результаты получены для рядов частот основного тона при обработке вокальных записей одной и той же мелодии разными исполнителями. В рамках исследования были рассмотрены шесть вариантов ядерных функций для осуществления задачи аппроксимации. Эмпирическим путем было определено, что при использовании ядер Валле–Пуссена и Фишера точность оценки выше, что позволяет применить данный метод в сфере обучения пению с помощью специализированных программ и при автоматизации оценки качества речи пациентов после лечения онкологических заболеваний речеобразующего тракта.

Ключевые слова: вокальное исполнение, синхронность, аппроксимация временных рядов, речевые технологии.
doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-49-54

Важной задачей при статистической обработке сигналов, полученных из разных источников, является оценка степени их сходства, или синхронности, если говорить о представлении сигнала в виде временного ряда. Два временных ряда будем считать синхронными, если их динамика сходна. Выявление синхронности поведения временных рядов является важной задачей – ее решение позволяет выдвигать гипотезу о наличии общих факторов. Известные способы определения синхронности, такие как применение кластерного анализа в вычислительных пакетах или нахождение коэффициента корреляции, могут быть недоступны или не давать необходимой информации. Более того, среди методов кластерного анализа практически нет подходов, разработанных для временных рядов, а использование обучения с учителем зачастую неприменимо.

В данной работе при исследовании аудиозаписей с вокальным исполнением был применен метод выделения синхронности [1], разработанный для оценки степени синхронности временных рядов.

Исследование подходов к оценке сходства

При оценке степени сходства вокальных исполнений одной и той же мелодии разными певцами полагаться на слух не всегда возможно, поэтому возникает задача программного решения этой проблемы. Для ее решения удобно исследовать временной ряд, составленный из последовательности частот основного тона (ЧОТ), соответствующих исполненным нотам. Авторами был проведен анализ современной научной литературы, связанной с оценкой сходства вокальных исполнений.

В работе [2] рассматривается анализ сходства вокального исполнения одной и той же взрослой птицей (зяблика). Зяблики поют песню, состоящую из повторяющихся слогов, которые формируют мотивы, образующие бои. После подсчета спектрального подобия применялась иерархическая кластеризация, генерировалась дендрограмма, которая показывает сходство между слогами. Для проверки сходства после кластеризации слогов для каждого кластера рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона. В статье [3] изучается влияние шума на пение птиц путем сходства пения воробьев за городом и в

городской структуре. В целях чистоты эксперимента записи были перемешаны. Для проверки гипотезы о влиянии шума на пение птиц исследователи провели кластерный анализ с использованием метода k -средних для группировки воробьев по их средним признакам пения, в результате были выявлены 2 группы, после чего были изучены остаточные графики, выполнены корреляционный тест для диаграмм с нормальным вероятностным графиком остатков и тест на постоянство дисперсии ошибок. Сходство исполнений сравнивалось по максимальным частотам и шириной полос пропускания.

Исследование, описанное в статье [4], рассматривает методы для количественной оценки пространственно-временной синхронизации и причинности между популяциями насекомых-вредителей. Для определения взаимосвязи между временными рядами применялись статистические методы: кросс-корреляция, частичная кросс-корреляция, индексы причинности Грейнджера. Синхронность оценивалась с помощью коэффициента корреляции.

В исследовании, описанном в [5], исследуется сходство вокализации у домашних мышей. Для этого рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона, а также исследовались наклоны линии регрессии.

В статье [6] проводится оценка синхронности и асинхронности, основанная на способе сглаживания скользящего среднего (по заданному количеству точек), где искомая величина получается путем осреднения нескольких значений, непосредственно принадлежащих к центральному значению текущей группы. Синхронность определяется визуально по графику. Для определения степени синхронности (асинхронности) проводится исследование параметров. Целью является оценивание зависимости между параметрами с помощью расчета «дельта», в результате которого можно заключить, что параметры изменяются по определенному критерию. Как рассчитывалась дельта, авторы не указывают.

Помимо исследований, направленных на определение закономерностей в звуках, которые издают представители фауны, существует несколько работ, в которых изучают пение человека. Так, например, в

статье [7] проводится оценка хорового пения с помощью автокорреляционной функции и вычисления нестационарных «корреляционных портретов» звучания хора и их визуального сравнения.

При проведении анализа современной научной литературы, связанной с оценкой сходства вокальных исполнений [2–7], было выявлено, что для этой цели используется в основном корреляционный анализ.

Условия, в которых осуществлялось сравнение вокальных исполнений

Для сравнения сходства вокальных исполнения был выбран эталон – исполнение мелодии человеком с музыкальным образованием и 7 вариантов исполнений другими людьми, которые прослушивали аудиозапись эталона и пытались ее воспроизвести. Все исполнители – женщины возраста от 22 до 28 лет. Всего было записано 8 локаций – 4 вида

мелодий, исполненных плавными и отрывистыми звуками.

Для определения ЧОТ вокальных исполнений была выбрана программа «Amadeus», разработанная на кафедре КИБЭВС ТУСУР [8], которая определяет частоты основного тона вокального исполнения и на основе которой будет разрабатываться ПО для обучения пению. Данная программа использует алгоритм идентификации частот основного тона, основанный на модели слуховой системы человека [9]. Ниже представлен пример графика распределения частот основного тона для обработанных аудиозаписей одной из анализируемых локаций (рис. 1). В данной локации необходимо было спеть стаккато без произношения названий следующие ноты первой октавы: до, ре, ми, фа, соль, фа, ми, ре, до.

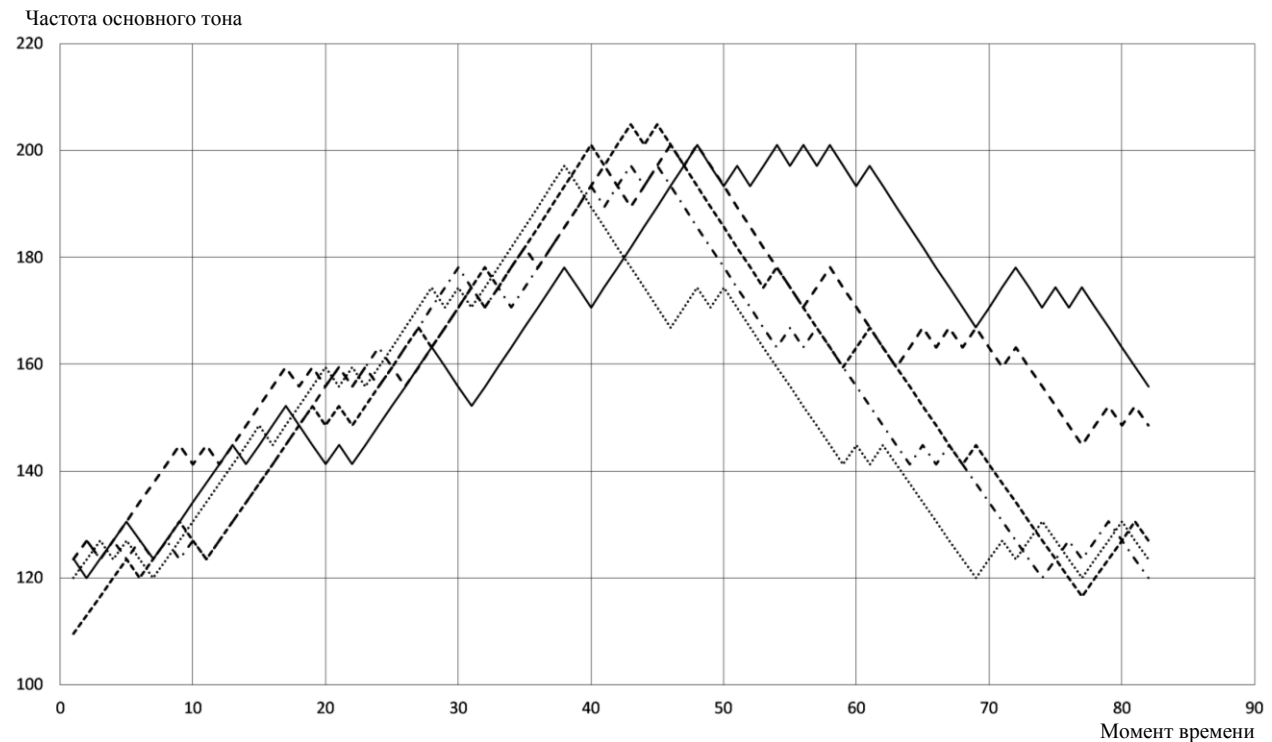


Рис. 1. Распределение ЧОТ обработанных аудиозаписей для 1-й локации

Постановка задачи аппроксимации временного ряда

Так как в процессе применения метода выделения синхронности производилось сравнение не самих значений ЧОТ, а коэффициентов или значений аппроксимирующих их функций, необходимо было выбрать метод аппроксимации и произвести оценку. Для большей универсальности была выбрана группа методов непараметрической статистики, так как неизвестен истинный вид аппроксимирующей функции и она по каким-либо причинам не может быть параметризована. В результате из-за простоты и положительных результатов была выбрана одна из самых известных непараметрических оценок – регрессия Надарая–Ватсона.

Задача аппроксимации временного ряда была поставлена следующим образом: Пусть существует

ряд, где X – моменты времени, а Y – множество значений частот основного тона, $y_i = y(x_i)$, $f: X \rightarrow Y$ – неизвестная зависимость. Требуется построить функцию, аппроксимирующую неизвестную зависимость f .

Для вычисления было решено воспользоваться оценкой Надарая–Ватсона [10]:

$$f(x, h_n) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i K\left(\frac{x - X_i}{h_n}\right)}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h_n}\right)}, \quad (1)$$

где K – невозрастающая, гладкая, ограниченная функция, которая называется ядром; h_n – параметр размытости.

Было использовано шесть видов ядер:

1. Треугольное:

$$\begin{cases} 1-|u|, & |u| \leq 1, \\ 0, & |u| > 1. \end{cases} \quad (2)$$

2. Епанечникова оптимальное:

$$\begin{cases} \frac{3}{4\sqrt{5}}(1-u^2/3), & |u| \leq 0,5, \\ 0, & |u| > \sqrt{5}. \end{cases} \quad (3)$$

3. Фишера:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{\sin(u/2)}{u/2}. \quad (4)$$

4. Валле–Пуссена:

$$\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sin(u/2)}{u/2} \right)^2. \quad (5)$$

5. Трикватратное:

$$\frac{35}{36} (1-|u|^2)^3, \quad |u| \leq 1. \quad (6)$$

6. Трикубическое:

$$\frac{70}{81} (1-|u|^3)^3, \quad |u| \leq 1. \quad (7)$$

Оценка точности полученных значений будет проводиться с помощью расчета абсолютной и относительной средней ошибок аппроксимации.

Для средней абсолютной ошибки аппроксимации используется формула [11]

$$E_{абс} = \sum_{i=1}^n |y_i - a_i| / n, \quad (8)$$

где y_i – i -е значение исходного временного ряда; a_i – значение временного ряда, полученное после аппроксимации; n – длина временного ряда.

Для расчета средней относительной ошибки аппроксимации используется следующая формула:

$$E_{отн} = \frac{E_{абс}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)}}, \quad (9)$$

где \bar{y} – среднее значение исходного временного ряда.

Оценка сходства вокальных исполнений

В результате была выполнена программная реализация алгоритма оценки сходства вокальных исполнений (рис. 2).

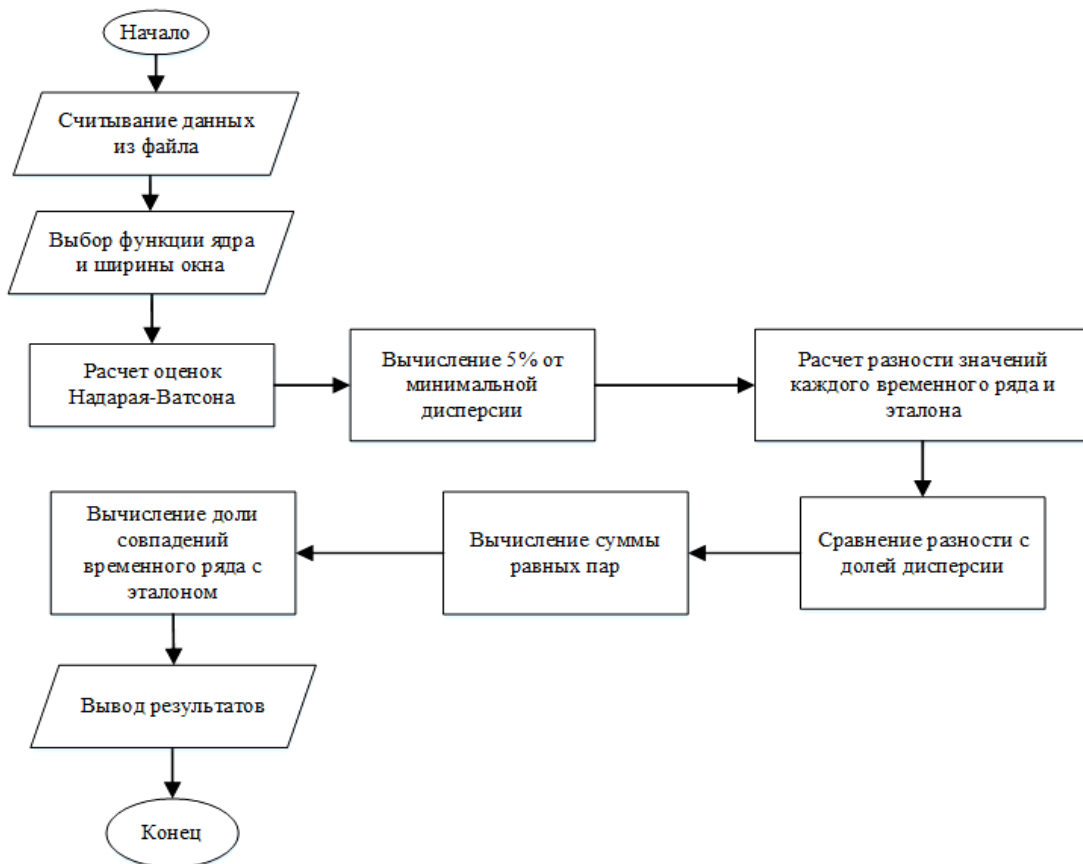


Рис. 2. Алгоритм оценки сходства вокальных исполнений

Разработанный алгоритм оценки, основанный на методе выделения синхронности [12], сходства вокальных исполнений, содержит два этапа. На первом этапе эталонный и оцениваемый ряды частот аппроксимируются; второй этап заключается в сравнении каждого значения аппроксимированного оцениваемого ряда с соответствующим значением ап-

проксимированного эталонного ряда, определении количества равных пар и вычислении доли совпадений временного ряда с эталоном.

При исследовании значений ошибок при выборе различных ядер [13] выдвинуты следующие рекомендации: для треугольного, трикватратного и трикубического ядер следует выбирать ширину окна, равную 2.

Для остальных ядер – ширину окна, равную 1. Минимальные ошибки были получены при ядре Валле–Пуссена и составили менее 5%.

В таблице приведены результаты оценок сходства вокальных исполнений каждой локации каждым исполнителем.

Результаты оценок сходства вокальных исполнений

Локация	Ядро, %	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 4	Исп. 5	Исп. 6	Исп. 7
1	Треугольное	99,87	100	99,74	99,74	100	100	99,61
	Епанечникова	99,61	100	99,08	98,56	100	100	99,61
	Фишера	100	100	100	100	100	100	100
	Валле–Пуссена	100	100	100	100	100	100	100
	Триквадратное	99,87	100	99,87	99,87	100	100	99,74
	Трикубическое	99,87	100	99,61	99,61	100	100	99,61
2	Треугольное	99,17	96,99	96,83	96,83	97,33	97,997	98,16
	Епанечникова	96,66	93,49	90,82	92,32	93,82	95,16	95,16
	Фишера	100	100	100	100	100	100	100
	Валле–Пуссена	100	100	100	100	100	100	100
	Триквадратное	99,33	97,99	97,33	98,49	98,498	98,83	98,83
	Трикубическое	98,33	95,66	95,993	96,49	95,83	97,66	97,496
3	Треугольное	76,53	82,05	70,81	73,57	74,36	81,26	79,68
	Епанечникова	71,2	78,69	66,27	70,02	70,81	80,47	76,33
	Фишера	91,32	93,49	88,17	92,5	91,32	95,86	91,72
	Валле–Пуссена	98,42	98,03	95,46	97,24	96,06	98,62	97,44
	Триквадратное	77,32	82,84	71,99	75,15	75,54	82,25	79,49
	Трикубическое	77,32	82,84	71,99	75,15	75,54	82,25	79,49
4	Треугольное	44,11	45,02	35,95	24,47	45,32	51,06	32,93
	Епанечникова	39,58	36,25	32,93	17,52	38,67	47,73	23,57
	Фишера	73,41	72,81	71,9	68,88	74,02	80,36	74,62
	Валле–Пуссена	83,99	79,15	83,69	76,13	80,97	88,52	83,99
	Триквадратное	45,92	47,13	38,97	26,59	48,04	54,38	34,74
	Трикубическое	46,53	41,69	35,05	23,26	45,02	51,66	29,3
5	Треугольное	79,35	79,92	81,64	73,42	87,19	85,85	77,25
	Епанечникова	72,66	69,79	77,63	65,01	86,81	82,6	69,22
	Фишера	98,47	97,32	97,13	97,51	99,24	99,43	98,85
	Валле–Пуссена	99,23	100	98,47	99,81	100	100	100
	Триквадратное	80,31	81,45	82,22	77,44	88,34	85,85	80,11
	Трикубическое	78,39	77,63	80,49	72,66	86,62	85,09	76,48
6	Треугольное	29,91	21,99	29,03	13,49	30,49	32,55	20,82
	Епанечникова	25,22	18,48	22,29	9,09	28,45	29,33	18,18
	Фишера	62,76	60,41	63,34	43,99	73,31	68,33	63,05
	Валле–Пуссена	77,71	77,13	73,31	68,04	80,35	80,35	78,59
	Триквадратное	31,38	23,46	28,45	13,19	31,67	35,48	21,7
	Трикубическое	29,32	20,23	28,15	12,02	32,55	34,89	20,23
7	Треугольное	99,89	100	100	99,56	99,56	99,56	99,67
	Епанечникова	99,89	100	100	99,67	99,56	99,56	100
	Фишера	100	100	100	99,89	100	99,89	100
	Валле–Пуссена	100	100	100	99,89	100	99,89	100
	Триквадратное	100	100	100	99,67	99,56	99,56	99,67
	Трикубическое	99,89	100	100	99,45	99,56	99,56	99,67
8	Треугольное	99,87	99,6	99,87	100	99,87	99,87	99,87
	Епанечникова	100	99,47	100	100	100	100	99,6
	Фишера	99,87	100	100	100	100	100	100
	Валле–Пуссена	99,87	100	100	100	100	100	100
	Триквадратное	99,87	99,74	100	100	99,87	100	99,87
	Трикубическое	100	99,6	99,87	100	99,74	99,74	99,87

Как видно из полученных результатов, наиболее точно исполнены 1, 2, 7 и 8-я локации – степень сходства свыше 90%, результаты почти одинаковы для всех видов ядер. Различия при выборе ядер особенно заметны для оценки исполнения 4-й и 6-й локаций – применение ядер Валле–Пуссена и Фишера заметно увеличивает степень сходства для всех исполнителей.

При прослушивании исполнений четвертая и шестая локации действительно исполнены почти всеми певцами хуже, но их степень сходства достаточно велика – больше 50%. Учитывая, что точность оценки с ядром Валле–Пуссена больше, чем у остальных, полученные результаты показывают, что

данный способ оценки степени сходства при использовании ядер Валле–Пуссена или Фишера может разрабатываться далее и использоваться при определении сходства вокальных исполнений.

Одним из вариантов использования данного способа оценки сходства может служить проверка качества выполнения задания по исполнению последовательности нот при обучении вокалу. Как указывается в [14], попадание в ноту зависит от высоты голоса, которая складывается из физиологических особенностей человека [15]. Именно из-за этих особенностей человек может не попадать в определенную октаву ноты. На первоначальных этапах обучения пению это не должно восприниматься как

ошибка, так как нота спета верно. Поэтому на начальных уровнях обучения необходимо оценивать динамику ЧОТ.

Данный подход может быть применен для поиска и извлечения информации из временного ряда при решении задач прикладной математики [16]. Например, применительно к использованию математических методов для анализа речи можно рассмотреть метод выделения синхронности в задаче оценке сходства произношения диктором ключевых фраз до проведения операции на гортани и после нее [17–19].

Заключение

В результате проведенного исследования было определено, что метод выделения синхронности применим для решения задач определения сходства динамик в речи дикторов. С его помощью возможно определить схожесть пения нескольких дикторов для одной мелодии, а также теоретически возможно определить степень отклонения в ходе реабилитации после операции для больных онкологическими заболеваниями гортани. Эмпирически было определено, что лучшие результаты получаются при применении ядер Валле–Пуссена и Фишера. Ошибки при их использовании составили менее 5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9628.2017/8.9).

Литература

1. Катаева Е.С. Алгоритм обнаружения синхронности временных рядов // Матер. Первой Всерос. молодежной науч. конф. «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем». – Томск, 2013. – С. 62–67.
2. Burkett Z.D. VoICE: A semi-automated pipeline for standardizing vocal analysis across models / Z.D. Burkett, N.F. Day, O. Peñagarikano, D.H. Geschwind, S.A. White // Scientific reports. – 2015. – Vol. 5. – P. 10237.
3. Job J.R. Song adjustments by an open habitat bird to anthropogenic noise, urban structure, and vegetation / J.R. Job, S.L. Kohler, S.A. Gill // Behavioral Ecology. – 2016. – Vol. 27, No. 6. – P. 1734–1744.
4. Damos P. Using multivariate cross correlations, Granger causality and graphical models to quantify spatiotemporal synchronization and causality between pest populations // BMC ecology. – 2016. – Vol. 16, No. 1. – P. 33.
5. Portfors C.V. The role of ultrasonic vocalizations in mouse communication / C.V. Portfors, D.J. Perkel // Current opinion in neurobiology. – 2014. – Vol. 28. – P. 115–120.
6. Ндженге Б.К. Параметрическая диагностика на базе синхронии и асинхронии изменения параметров газотурбинных двигателей одного самолета // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 208. – С. 109–112.
7. Бакаев А.В. Корреляционный анализ ансамблевого пения // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 29, № 2. – С. 123–129.
8. Якимук А.Ю. Программный комплекс для автоматизации моделирования сегментации речевых сигналов и вокальных исполнений / А.Ю. Якимук, А.А. Конев, А.О. Осипов // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 21, № 10(129). – С. 53–64.
9. Конев А.А. Модель и алгоритм анализа и сегментации речевого сигнала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 20 с.
10. Воронцов К.В. Лекции по алгоритмам восстановления регрессии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ccas.ru/voron/download/Regression.pdf> (дата обращения: 20.03.2018).
11. Светульников И.В. Новые коэффициенты оценки качества экономических моделей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/profile/Ivan_Svetunkov/publication/241766927_New_coefficients_of_econometrics_models_quality_estimation/links/563a258108ae45b5d284a0c5/New-coefficients-of-econometrics-models-quality-estimation.pdf (дата обращения: 22.03.2018).
12. Катаева Е.С. Применение алгоритма выделения синхронности для метеорологических временных рядов / Е.С. Катаева, Г.М. Кошкин // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9/2. – С. 229–231.
13. Катаева Е.С. Применение выделения синхронности для оценки сходства вокальных исполнений / Е.С. Катаева, Ю.П. Свешникова, А.Ю. Якимук // Информационно-коммуникационные технологии в педагогическом образовании. – 2019. – № 4(61). – С. 54–58.
14. Холопова, В.Н. Музыка как вид искусства : учеб. пособие. – 4-е изд., испр. – СПб.: Планета музыки, 2014. – 320 с.
15. Швецов А.Г. Анатомия, физиология и патология органов слуха, зрения и речи: учеб. пособие. – Великий Новгород, 2006. – 68 с.
16. Технология прямого поиска при решении задач прикладной математики / В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, И.Г. Боровской, А.А. Шелупанов; под ред. Ю.И. Шокина // Вычислительные технологии: сборник научных трудов. – Новосибирск, 1995. – С. 19–25.
17. Software for an objective evaluation of the quality of syllables's pronunciation in speech rehabilitation / E. Kostyuchenko, R. Meshcheryakov, D. Ignatieva, A. Pyatkov, E. Choynzonov, L. Balatskaya // 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – IEEE, 2017. – P. 267–270.
18. Rakhmanenko I. Fusion of biLSTM and GMM-UBM systems for audio spoofing detection / I. Rakhmanenko, A. Shelupanov, E. Kostyuchenko // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – Vol. 8, No. 4. – 2019. – P. 1741–1746.
19. The evaluation process automation of phrase and word intelligibility using speech recognition systems / E. Kostyuchenko, D. Novokhrestova, M. Tirskaaya, A. Shelupanov, M. Nemirovich-Danchenko, E. Choynzonov, L. Balatskaya // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2019. – Vol. 11658 LNAI. – P. 237–246.

Катаева Елена Сергеевна

Мл. науч. сотр. лаб. медико-биологических исследований (ЛМБИ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID 0000-0002-2329-457X
Тел.: +7-962-777-85-89
Эл. почта: kes@keva.tusur.ru

Якимук Алексей Юрьевич

Мл. науч. сотр. лаб. безопасных биомедицинских технологий ЦТБ КИБЭВС ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID 0000-0001-9736-7658
Тел.: +7-983-235-24-31
Эл. почта: yay@keva.tusur.ru

Kataeva E.S., Yakimuk A.Yu.

Application of synchronous isolation for evaluating the similarity of vocal performances

This paper presents the results of applying the method of extracting synchronism, developed specifically to assess the degree of synchronism of time series. The results for the series of frequencies of the fundamental tone obtained by processing vocal recordings of the same melody by different performers. The study examined six different kernel functions for the approximation problem. Empirically identified kernel, the use of which the accuracy of the assessment above, that allows us to apply this method in the field of singing training with specialized programs and for automating the assessment of speech quality of patients after treatment of oncological diseases of the speech-forming tract.

Keywords: vocal performance, synchronicity, approximation of temporary types, speech technology.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-49-54

References

1. Kataeva E.S. *Algoritm obnaruzheniya sinhronnosti vremennyh ryadov* [Algorithm for detecting the synchronization of time series]. Materials of the First All-Russian Youth Scientific Conference «Mathematical and Software of Information, Technical and Economic Systems». Tomsk, 2013, pp. 62–67 (in Russ.).

2. Burkett Z.D., Day N.F., Peñagarikano O., Geschwind D.H., White S.A. VoICE: A semi-automated pipeline for standardizing vocal analysis across models. *Scientific Reports* /5:10237/, 2015, DOI: 10.1038/srep10237.

3. Job J.R., Kohler S.L., Gill S.A. Song adjustments by an open habitat bird to anthropogenic noise, urban structure, and vegetation. *Behavioral Ecology*, 2016, vol. 27, issue 6, pp. 1734–1744.

4. Damos P. Using multivariate cross correlations, Granger causality and graphical models to quantify spatiotemporal synchronization and causality between pest populations. *BMC Ecol*, 2016, s12898-016-0087-7.

5. Portfors C.V., Perkel D.J. The role of ultrasonic vocalizations in mouse communication. *Current opinion in neurobiology*, 2014, vol. 28, pp. 115–20.

6. Ngenge B.K. *Parametricheskaya diagnostika na baze sinhronii i asinhronii izmeneniya parametrov gazoturbinnnyh dvi-gatelej odnogo samoleta* [Parametric diagnostics based on synchronization and asynchrony of changing parameters of gas turbine engines of one aircraft]. *Civil Aviation High Technologies (Nauchnyi Vestnik MGTU GA)*, 2014, no. 208, pp. 48–52 (in Russ.).

7. Bakaev A.V. *Korreljacionnyj analiz ansamblevogo peniya* [Correlation analysis of ensemble singing]. *Engineering Bulletin of the Don*, 2014, vol. 29, no. 2, pp. 123–129 (in Russ.).

8. Yakimuk A.Yu., Konev A.A., Osipov A.O. *Programmyj kompleks dlya avtomatizacii modelirovaniya segmentacii rechevnyh signalov i vokal'nyh ispolnenij* [Program complex for speech signal and vocal performance segmentation modeling automation]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 10 (129), pp. 53–64.

9. Konev A.A. *Model' i algoritmy analiza i segmentatsii rechevogo signala. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [The model and algorithms for the analysis and segmentation of the speech signal. Dissertation abstract of PhD eng. sci.], Tomsk, 2007, 20 p.

10. Vorontsov K.V. *Lekcii po algoritmam vosstanovleniya regnessii* [Lectures on regression restoration algorithms]. (In Russ.). Available at: <http://www.ccas.ru/voron/download/Regression.pdf> (Accessed: March 22, 2018).

11. Svetunkov I.V. *Novye koefficienty ocenki kachestva ekonomicheskikh modelej* [New coefficients for assessing the

quality of economic models]. (In Russ.). Available at: https://www.researchgate.net/profile/Ivan_Svetunkov/publication/241766927_New_coefficients_of_econometrics_models_quality_estimation/links/563a258108ae45b5d284a0c5/New-coefficients-of-econometrics-models-quality-estimation.pdf (Accessed: March 20, 2018).

12. Kataeva E.S., Koshkin G.M. *Primenenie algoritma vydeleniya sinhronnosti dlya meteorologicheskikh vremennyh ryadov* [The application of synchronism identification algorithm to meteorological time.] *Russian Physics Journal*, vol. 56, no. 9/2, pp. 229–231.

13. Kataeva E.S., Sveshnikova Yu.R., Yakimuk A.Yu. *Primenenie vydeleniya sinhronnosti dlya ocenki skhodstva vokal'nyh ispolnenij* [Application of synchronous isolation for evaluating the similarity of vocal performances.] *Information and communication technologies in teacher education*, 2019, no. 4(61), pp. 54–58.

14. Kholopova, V.N. *Muzyka kak vid iskusstva: uchebnoe posobie* [Music as a kind of art.] The fourth edition, revised. Saint Petersburg: Publishing house «The Planet of Music», 2014, 320 p.

15. Shvetsov A.G. *Anatomiya, fiziologiya i patologiya organov sluha, zreniya i rechi: uchebnoe posobie*. [Anatomy, Physiology, and Pathology of Hearing, Vision, and Speech: A Training Manual.] *Veliky Novgorod*, 2006, 68 p.

16. Arhipov V.A., Bondarchuk S.S., Borovskoy I.G., Shelupanov A.A. *Tekhnologiya pryamogo poiska pri reshenii zadach prikladnoj matematiki* [Direct search technology for solving the problems of applied mathematics]: *Computational technologies. Collection of scientific papers. Edited by Academician of the RAS Yu. I. Shokin. Novosibirsk*, 1995, pp. 19–25 (in Russ.).

17. Kostyuchenko E.Y., Mescheryakov R.V., Novokhrestova D.I., Pyatkov A.V., Balatskaya L.N., Choynzonov E.L. Software for an objective evaluation of the quality of syllables's pronunciation in speech rehabilitation. Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017, 2, 2017, pp. 267–270.

18. Rakhmanenko I., Shelupanov A., Kostyuchenko E. Fusion of biLSTM and GMM-UBM systems for audio spoofing detection. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 8, no. 4, 2019, pp. 1741–1746.

19. Kostuchenko E., Novokhrestova D., Tirskaya M., Shelupanov A., Nemirovich-Danchenko M., Choynzonov E., Balatskaya L. The evaluation process automation of phrase and word intelligibility using speech recognition systems. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 11658 LNAI, 2019, pp 237–246.

Elena S. Kataeva

Junior Research Officer, Laboratory of Biomedical Research, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0002-2329-457X

Phone: +7-962-777-85-89

Email: kes@keva.tusur.ru

Aleksey Yu. Yakimuk

Junior Research Officer, Laboratory of Safe Biomedical Technologies, TUSUR

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0001-9736-7658

Phone.: +7-983-235-24-31

Email: yay@keva.tusur.ru

УДК 519.163

Ю.В. Шабля, Д.В. Кручинин

Модификация метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе применения теории производящих функций

Представлена модификация метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ. В отличие от оригинальной версии метода, в предлагаемой модификации применяется метод получения явных выражений коэффициентов производящих функций для нахождения выражения функции мощности комбинаторного множества по известному выражению производящей функции для последовательности значений функции мощности.

Ключевые слова: комбинаторная генерация, дерево И/ИЛИ, производящая функция, метод, ranking, unranking.
doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-55-60

Комбинаторное множество – это конечное множество, элементы которого имеют некоторую структуру, и имеется процедура построения элементов этого множества [1]. Элементы комбинаторных множеств (комбинаторные объекты), таких как сочетания, перестановки, разбиения, графы, деревья и т.д., играют важную роль в математике и информатике, а также имеют множество приложений [2–4].

Существуют следующие общие подходы к разработке алгоритмов комбинаторной генерации:

- метод поиска с возвратом [5, 6];
- ЕСО-метод [7, 8];
- метод Ф. Флажолле [9, 10];
- метод Б.Я. Рябко [11, 12];
- метод В.В. Кручинина [1, 13].

Проведенный анализ общих методов построения алгоритмов комбинаторной генерации показал:

- часть методов (поиск с возвратом, ЕСО-метод) направлены только на разработку алгоритмов последовательной генерации комбинаторных объектов;
- существуют ограничения на возможность применения части методов (ЕСО-метод, метод Ф. Флажолле) для комбинаторных множеств, описываемых более чем одним параметром;
- большинство методов требуют представления комбинаторного объекта в специальном виде (слово, последовательность, спецификация, дерево И/ИЛИ), что не всегда является тривиальной задачей и требует дополнительного исследования;

– существуют требования к наличию дополнительной информации о комбинаторном множестве.

В таблице представлены результаты сравнения выявленных основных характеристик методов построения алгоритмов комбинаторной генерации:

- «Listing»: имеется возможность построения алгоритмов последовательной генерации комбинаторных объектов;
- «Ranking/Unranking»: имеется возможность построения алгоритмов ранжирования и генерации комбинаторных объектов в соответствии с заданным рангом;
- «Более одного параметра»: имеется возможность применения метода для комбинаторных множеств, описываемых более чем одним параметром;

– «Биекция»: имеется требование представления комбинаторного объекта в специальном виде;

– «Дополнительные требования»: имеются требования к наличию дополнительной информации, описывающей комбинаторное множество.

Сравнение характеристик общих методов построения алгоритмов комбинаторной генерации

Метод	Характеристика				
	Listing	Ranking/Unranking	Более одного параметра	Биекция	Дополнительные требования
Метод поиска с возвратом	+	–	+	–	
ЕСО-метод	+	–	–	+	ЕСО-правило
Метод Ф. Флажолле	+	+	–	+	Функция мощности, производящая функция
Метод Б.Я. Рябко	+	+	+	+	Функция мощности, вспомогательные функции
Метод В.В. Кручинина	+	+	+	+	Функция мощности из алгебры $\{N, +, \times, R\}$

Для дальнейшего исследования выбран метод В.В. Кручинина, основанный на применении деревьев И/ИЛИ, так как данный метод:

- позволяет разрабатывать все типы алгоритмов комбинаторной генерации (listing, ranking и unranking);
- не имеет ограничений на количество параметров, которыми описываются комбинаторные множества, что позволяет рассматривать более сложные дискретные структуры;
- требует в качестве дополнительной информации, описывающей комбинаторное множество, только выражение функции мощности, на основе которой строится структура дерева И/ИЛИ.

Метод построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ

В методе построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ применяется представление комбинаторных множеств в виде

структуры дерева И/ИЛИ, число вариантов которого должно совпадать со значением функции мощности комбинаторного множества. В дальнейшем с помощью такого дерева И/ИЛИ можно построить алгоритмы последовательной генерации объектов комбинаторных множеств, их ранжирования (Rank) и генерации по рангу (Unrank). Эффективность этого метода показана на генерации достаточно большого числа комбинаторных множеств: перестановки, сочетания, разложения, разбиения, композиции, числа Фибоначчи, числа Каталана, деревья, выражения некоторых языков [1].

Дерево И/ИЛИ – это дерево, которое содержит узлы двух типов: И-узел и ИЛИ-узел. Вариант дерева И/ИЛИ – это дерево, которое получается из дерева И/ИЛИ путем отсечения у всех ИЛИ-узлов всех дуг, кроме одной. Пример структуры дерева И/ИЛИ и всех его вариантов представлен на рис. 1.

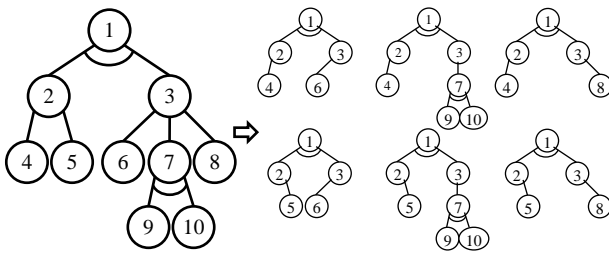


Рис. 1. Дерево И/ИЛИ и его варианты

Если для комбинаторного множества A известно выражение функции мощности $f = |A|$, которое принадлежит алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, где R – оператор примитивной рекурсии, то для такого комбинаторного множества существует возможность построения дерева И/ИЛИ, число вариантов которого будет совпадать со значением функции мощности комбинаторного множества [14]. Для этого необходимо для заданной функции мощности f комбинаторного множества A :

– все операции сложения $+$ из f представить в виде ИЛИ-узла дерева И/ИЛИ, где все слагаемые – это сыновья данного ИЛИ-узла;

– все операции произведения \times из f представить в виде И-узла дерева И/ИЛИ, где все множители – это сыновья данного И-узла;

– все коэффициенты $k \in \mathbb{N}$ из f представить в виде ИЛИ-узла дерева И/ИЛИ, у которого все сыновья являются листьями и их количество равно k ;

– все рекурсивные операции из f представить в виде схемы рекурсивной композиции дерева И/ИЛИ.

Таким образом, метод построения алгоритмов комбинаторной генерации $\text{Rank}(a): A \rightarrow \mathbb{N}$, где $a \in A$, и $\text{Unrank}(r): \mathbb{N} \rightarrow A$, где $r \in \mathbb{N}$, на основе деревьев И/ИЛИ можно записать в следующем виде:

Вход: Функция мощности f комбинаторного множества A , принадлежащая алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$.

Выход: Алгоритмы комбинаторной генерации

$$\text{RankVariant}: W(D) \rightarrow \mathbb{N}_{|W(D)|},$$

$$\text{UnrankVariant}: \mathbb{N}_{|W(D)|} \rightarrow W(D),$$

при этом каждый вариант v дерева И/ИЛИ D , построенного для некоторого комбинаторного множества A , должен однозначно соответствовать конкретному комбинаторному объекту $a \in A$, т.е. должна быть определена биекция $A \leftrightarrow W(D)$, где $W(D)$ – множество вариантов v дерева И/ИЛИ D . Совокупность данной биекции с алгоритмами RankVariant и UnrankVariant представляют собой искомые алгоритмы комбинаторной генерации Rank и Unrank.

Алгоритм RankVariant определяет соответствие между элементами множества $W(D)$ всех вариантов дерева И/ИЛИ D и элементами конечного множества натуральных чисел $\mathbb{N}_{|W(D)|} = \{0, 1, \dots, |W(D)| - 1\}$.

Данный алгоритм ранжирования позволяет для каждого варианта $v \in W(D)$ дерева И/ИЛИ D поставить в соответствие некоторый уникальный порядковый номер $r \in \mathbb{N}_{|W(D)|}$, называемый рангом.

Алгоритм UnrankVariant выполняет обратное действие к алгоритму RankVariant.

Если для комбинаторного множества A построена структура дерева И/ИЛИ D , то возникает проблема определения биекции между элементами комбинаторного множества A и множества вариантов дерева И/ИЛИ D (для каждого варианта $v \in W(D)$ должен однозначно соответствовать единственный комбинаторный объект $a \in A$ и наоборот). Для решения данной проблемы не существует формализованного подхода, так как каждое комбинаторное множество обладает своими и зачастую совершенно уникальными характеристиками, но при этом можно использовать следующие рекомендации: провести анализ изменений в структуре комбинаторных объектов, которые проявляются при переходе от одного узла дерева И/ИЛИ к другому, и отразить данные изменения в биекции. В качестве возможных путей исследования можно рассмотреть изменение параметров при переходе по разным ветвям дерева или при переходе с одного уровня на другой [15, 16].

Если выражение функции мощности $f = |A|$, принадлежащее алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, не известно, тогда структура дерева И/ИЛИ для такого комбинаторного множества не будет построена и, соответственно, применение метода построения алгоритмов комбинаторной генерации становится невозможным. Предлагается решить эту проблему за счет применения математического аппарата производящих функций, так как он является основополагающим в современной комбинаторике и для многих комбинаторных множеств уже известны выражения производящих функций или существует возможность получения таких выражений.

Метод получения явных выражений коэффициентов производящих функций

Производящие функции позволяют находить решения для задач из самых разных областей математических наук, таких как комбинаторика, теория чисел, теория вероятностей и др. Основное преимуще-

щество использования производящих функций заключается в том, что они позволяют представить бесконечные числовые последовательности в компактной форме и при этом имеется соответствующий математический аппарат для исследования таких числовых последовательностей через их производящие функции.

В работе [17] для коэффициентов степеней производящих функций введено понятие композиты производящей функции, которое легло в основу математического аппарата степеней производящих функций. Композитой обыкновенной производящей функции $G(t) = \sum_{n>0} g_n t^n$ называется функция $G^\Delta(n, k)$,

которая является функцией коэффициентов k -й степени производящей функции $G(t)$:

$$(G(t))^k = \sum_{n \geq k} G^\Delta(n, k) t^n.$$

Математический аппарат степеней производящих функций обеспечивает такие операции над композитами, как сдвиг, сложение, умножение, композиция, а также определение взаимных и обратных композит. Такой набор операций над композитами позволяет получать явные выражения для коэффициентов производящих функций.

Например, если для заданной производящей функции $G(t) = \sum_{n>0} g_n t^n$ известна ее композита

$G^\Delta(n, k)$, тогда значения коэффициентов g_n могут быть вычислены как $g_n = G^\Delta(n, 1)$.

Также если существует возможность представления заданной производящей функции $G(t)$ в виде композиции двух производящих функций

$$G(t) = R(F(t)) = \sum_{n \geq 0} g_n t^n,$$

где $R(t) = \sum_{n \geq 0} r_n t^n$ и $F(t) = \sum_{n > 0} f_n t^n$, тогда значения коэффициентов g_n могут быть вычислены как

$$g_n = \begin{cases} r_0, & n = 0; \\ \sum_{k=1}^n F^\Delta(n, k) r_k, & n > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, для нахождения явных выражений коэффициентов производящих функций с использованием математического аппарата степеней производящих функций необходимо декомпозировать производящую функцию на функции, для которых известны значения композит, и затем применить к ним соответствующие операции. В работе [18] представлено алгоритмическое и программное обеспечение для данного метода получения явных выражений коэффициентов производящих функций.

Если для некоторого комбинаторного множества A рассмотреть его подмножество $A_n \subset A$, которое содержит только комбинаторные объекты размерности n , тогда функция мощности $f(n) = |A_n|$ такого комбинаторного множества A_n может быть описана некоторой производящей функцией

$$F(t) = \sum_{n \geq 0} f_n t^n = \sum_{n \geq 0} f(n) t^n = \sum_{n \geq 0} |A_n| t^n.$$

Следовательно, для получения выражения функции мощности $f(n)$ комбинаторного множества, для которого известна производящая функция, можно использовать описанный выше метод получения явных выражений коэффициентов производящих функций. Однако если рассматриваемый комбинаторный объект описывается более чем одним параметром (например, сочетание из n элементов по m), тогда применение данного метода становится невозможным, так как соответствующий ему математический аппарат степеней производящих функций определен только для одномерных производящих функций. По результатам проведенных исследований композиций производящих функций, в которых внешняя функция описывается двумя формальными переменными, данный метод был дополнен для следующих случаев:

1. Композиция двух производящих функций

$$G(x, y) = R(F(x), y) = \sum_{n \geq 0} \sum_{m \geq 0} g_{n,m} x^n y^m,$$

где $R(x, y) = \sum_{n \geq 0} \sum_{m \geq 0} r_{n,m} x^n y^m$ и $F(t) = \sum_{n > 0} f_n t^n$.

Если зафиксировать переменную y как константу, то $R(x, y) = R_y(x) = \sum_{n \geq 0} r_n x^n$, где $r_n = \sum_{m \geq 0} r_{n,m} y^m$.

Тогда, используя (1), значения коэффициентов $g_{n,m}$ могут быть вычислены как [19]

$$g_{n,m} = \begin{cases} r_{0,m}, & n = 0; \\ \sum_{k=1}^n F^\Delta(n, k) r_{k,m}, & n > 0. \end{cases}$$

2. Композиция двух производящих функций

$$G(x, y) = R(F_1(x), F_2(y)) = \sum_{n \geq 0} \sum_{m \geq 0} g_{n,m} x^n y^m,$$

где $R(x, y) = \sum_{n \geq 0} \sum_{m \geq 0} r_{n,m} x^n y^m$, $F_1(t) = \sum_{n > 0} a_n t^n$ и

$$F_2(t) = \sum_{n > 0} b_n t^n.$$

Тогда значения коэффициентов $g_{n,m}$ могут быть вычислены как

$$g_{n,m} = \begin{cases} r_{0,0}, & m = 0, n = 0; \\ \sum_{k=1}^n F_1^\Delta(n, k) r_{k,0}, & m = 0, n > 0; \\ \sum_{l=1}^m F_2^\Delta(m, l) r_{0,l}, & m > 0, n = 0; \\ \sum_{l=1}^m F_2^\Delta(m, l) \sum_{k=1}^n F_1^\Delta(n, k) r_{k,l}, & m > 0, n > 0. \end{cases}$$

Аналогичные соотношения могут быть получены и для более сложных вариантов композиций производящих функций. При этом основным ограничением является требование того, что декомпозирова-

ние заданной производящей функции должно осуществляться в рамках одной формальной переменной, а остальные переменные в этот момент фиксируются как константы (т.е. в качестве внутренних производящих функций композиции должны быть одномерные производящие функции).

Модификация метода построения алгоритмов комбинаторной генерации

Применение метода получения явных выражений коэффициентов производящих функций для нахождения выражения функции мощности заданного комбинаторного множества позволяет воспользоваться методом построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ для таких комбинаторных множеств, для которых не известно выражение функции мощности, принадлежащее алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, но известно выражение производящей функции для последовательности значений функции мощности. Также расширение данного метода получения явных выражений коэффициентов производящих функций для случая композиции производящих функций, в которой внешняя функция является функцией нескольких переменных, делает возможным нахождение выражений функций мощности для комбинаторных множеств, которые описываются более чем одним параметром.

Однако существуют ограничения на возможность применения данного метода, так как выражение функции мощности заданного комбинаторного множества, получаемое в результате применения метода получения явных выражений коэффициентов производящих функций, не всегда соответствует требуемой алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$. Например, такая ситуация может возникнуть, когда композита производящей функции не принадлежит алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$.

Достоинством применения данного метода является то, что по виду структуры композиции производящих функций, полученной для производящей функции последовательности значений функции мощности заданного комбинаторного множества, зачастую можно получить некоторое представление о свойствах элементов данного комбинаторного множества.

Запишем модифицированный метод построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ в виде последовательности шагов:

Шаг 1. Если известно выражение функции мощности f комбинаторного множества A , принадлежащее алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, то переход на шаг 4.

Шаг 2. Если известно выражение производящей функции F для последовательности значений функции мощности f комбинаторного множества A , то применить метод получения явных выражений коэффициентов производящих функций, иначе дальнейшее применение метода невозможно.

Шаг 3. Если получено выражение функции мощности f комбинаторного множества A , принадлежащее алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, то переход на шаг 4, иначе дальнейшее применение метода невозможно.

Шаг 4. На основе выражения функции мощности f комбинаторного множества A построить структуру дерева И/ИЛИ D .

Шаг 5. Определить биекцию $A \leftrightarrow W(D)$ между элементами комбинаторного множества A и множества всех вариантов v дерева И/ИЛИ D в виде алгоритмов $\text{ObjectToVariant}(a, D) : A \rightarrow W(D)$, где $a \in A$, и $\text{VariantToObject}(v, D) : W(D) \rightarrow A$, где $v \in W(D)$.

Шаг 6. Определить биекцию $W(D) \leftrightarrow \mathbb{N}_{|W(D)|}$ между элементами множества всех вариантов v дерева И/ИЛИ D и конечного множества натуральных чисел $\mathbb{N}_{|W(D)|} = \{0, 1, \dots, |W(D)| - 1\}$ с помощью алгоритмов

$$\text{RankVariant}(\text{root}, v, D) : W(D) \rightarrow \mathbb{N}_{|W(D)|},$$

где root – корень дерева И/ИЛИ D , $v \in W(D)$, и

$$\text{UnrankVariant}(r, D) : \mathbb{N}_{|W(D)|} \rightarrow W(D),$$

где $r \in \mathbb{N}_{|W(D)|}$.

Совокупность алгоритмов, определенных на последних двух шагах модифицированного метода (шаг 5 и 6), формирует биекцию $A \leftrightarrow \mathbb{N}$ и представляет собой алгоритмы комбинаторной генерации $\text{Rank}(a) : A \rightarrow \mathbb{N}$ и $\text{Unrank}(r) : \mathbb{N} \rightarrow A$. Разработанная модификация метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ отличается применением метода получения явных выражений коэффициентов производящих функций для нахождения выражения функции мощности комбинаторного множества. Изменение оригинального метода заключается в наличии дополнительных шагов (шаг 2 и 3), которые в случае успешного их выполнения позволяют воспользоваться методом построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ.

Заключение

В данной статье представлена модификация метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ. В отличие от оригинальной версии метода, в предлагаемой модификации применяется метод получения явных выражений коэффициентов производящих функций для нахождения выражения функции мощности комбинаторного множества. Данное дополнение позволяет воспользоваться методом построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ для комбинаторных множеств, для которых известно выражение производящей функции для последовательности значений функции мощности.

Разработка модификации метода построения алгоритмов комбинаторной генерации выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект №18-71-00059). Исследование свойств композиций производящих функций, в которых внешняя функция описывается двумя переменными, выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-31-00201).

Литература

1. Кручинин В.В. Методы, алгоритмы и программное обеспечение комбинаторной генерации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.11. – Томск, 2010. – 387 с.
2. Кнут Д.Э. Искусство программирования. – Т. 4А: Комбинаторные алгоритмы, ч. 1. – М.: Вильямс, 2013. – 960 с.
3. Ruskey F. Combinatorial generation. Working version (1j-CSC 425/520). – 2003. – 311 p. – URL: <http://page.math.tu-berlin.de/~felsner/SemWS17-18/Ruskey-Comb-Gen.pdf> (дата обращения: 01.06.2019).
4. Loehr N. Combinatorics: Discrete mathematics and its applications. – USA: CRC Press, 2017. – 610 p.
5. Рейнгольд Э. Комбинаторные алгоритмы: Теория и практика / Э. Рейнгольд, Ю. Нивергельт, Н. Део. – М.: Мир, 1980. – 433 с.
6. Kreher D.L. Combinatorial algorithms: Generation, enumeration, and search / D.L. Kreher, D.R. Stinson. – USA: CRC Press, 1999. – 329 p.
7. ECO method and the exhaustive generation of convex polyominoes / E. Barucci, A. Del Lungo, E. Pergola, R. Pinzani // *Journal of Difference Equations and Applications*. – 1999. – Vol. 5. – P. 435–490.
8. Exhaustive generation of combinatorial objects by ECO / S. Vacchelli, E. Barucci, E. Grazzini, E. Pergola // *Acta Informatica*. – 2004. – Vol. 40, No. 8. – P. 585–602.
9. Flajolet P. A calculus for the random generation of combinatorial structures / P. Flajolet, P. Zimmerman, B. Cutsem // *Theoretical Computer Science*. – 1994. – Vol. 132, No. 1–2. – P. 1–35.
10. Martinez C. A generic approach for the unranking of labeled combinatorial classes / C. Martinez, X. Molinero // *Random Structures and Algorithms*. – 2001. – Vol. 19, No. 3–4. – P. 472–497.
11. Рябко Б.Я. Быстрая нумерация комбинаторных объектов // *Дискретная математика*. – 1998. – Т. 10, № 2. – С. 101–119.
12. Медведева Ю.С. Быстрая нумерация комбинаторных объектов, находящая применение в системах передачи и хранения информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.17. – Новосибирск, 2015. – 113 с.
13. Кручинин В.В. Методы построения алгоритмов генерации и нумерации комбинаторных объектов на основе деревьев И/ИЛИ. – Томск: В-Спектр, 2007. – 200 с.
14. Кручинин В.В. Представление множеств деревьями И/ИЛИ // *Доклады ТУСУР*. – 2008. – № 1(17). – С. 107–112.
15. Шабля Ю.В. Исследование метода построения алгоритмов генерации комбинаторных объектов на основе деревьев И/ИЛИ / Ю.В. Шабля, В.С. Мельман, А.С. Репкин // *Электронные средства и системы управления: матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. (28–30 ноября 2018 г.)*. – Томск: ТУСУР, 2018. – Ч. 2. – С. 20–22.
16. Технология прямого поиска при решении задач прикладной математики / В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, И.Г. Боровской, А.А. Шелупанов // *Вычислительные технологии*. – 1995. – Т. 4, № 10. – С. 19–25.
17. Кручинин В.В. Степени производящих функций и их применение / В.В. Кручинин, Д.В. Кручинин. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2013. – 236 с.
18. Перминова М.Ю. Алгоритмы и программный модуль получения явных выражений коэффициентов производящих функций: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.17. – Томск, 2017. – 113 с.
19. Shablya Y.V. Euler-Catalan's number triangle and its application / Y.V. Shablya, D.V. Kruchinin // *Proceedings book*

of the Mediterranean International Conference of Pure & Applied Mathematics and Related Areas (26–29 October 2018). – Antalya, 2018. – P. 212–216.

Шабля Юрий Васильевич

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Красноармейская ул., д. 146, г. Томск, Россия, 634034
ORCID 0000-0002-9695-7493
Тел.: +7-906-949-03-07
Эл. почта: shablya-yv@mail.ru

Кручинин Дмитрий Владимирович

Канд. физ.-мат. наук, с.н.с. каф. КИБЭВС ТУСУРа
Красноармейская ул., д. 146, г. Томск, Россия, 634034
ORCID 0000-0003-3412-432X
Тел.: +7-913-845-99-04
Эл. почта: kruchinindm@gmail.com

Shablya Y.V., Kruchinin D.V.

Modification of the algorithm development method for combinatorial generation based on the application of the generating functions theory

In this article, a modification of the method for developing algorithms for combinatorial generation on the basis of and-or trees is presented. In contrast to the original version of the method, the proposed modification uses the method aimed at obtaining explicit expressions for the coefficients of generating functions. This method is applied to find an expression of the cardinality function of a combinatorial set by using the known expression of the generating function for the sequence of values of this cardinality function.

Keywords: combinatorial generation, and-or tree, generating function, method, ranking, unranking.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-55-60

References

1. Kruchinin V.V. *Metody, algoritmy i programnoye obespechenie kombinatornoj generacii. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Methods, algorithms and software for combinatorial generation. Dr. eng. sci. diss.]. Tomsk, 2010, 387 p. (in Russ.).
2. Knuth D.E. *The art of computer programming. Vol. 4A: Combinatorial Algorithms, Part 1*. USA: Addison-Wesley, 2011, 883 p.
3. Ruskey F. *Combinatorial generation. Working version (1j-CSC 425/520)*. 2003. 311 p. Available at: <http://page.math.tu-berlin.de/~felsner/SemWS17-18/Ruskey-Comb-Gen.pdf> (Accessed: June 1, 2019).
4. Loehr N. *Combinatorics: Discrete mathematics and its applications*. USA: CRC Press, 2017, 610 p.
5. Reingold E.M., Nievergelt J., Deo N. *Combinatorial Algorithms: Theory and Practice*. Pearson Education Canada, 1977, 433 p.
6. Kreher D.L., Stinson D.R. *Combinatorial algorithms: Generation, enumeration, and search*. USA: CRC Press, 1999, 329 p.
7. Barucci E., Del Lungo A., Pergola E., Pinzani R. ECO method and the exhaustive generation of convex polyominoes. *Journal of Difference Equations and Applications*, 1999, vol. 5, pp. 435–490.

8. Bacchelli S., Barcucci E., Grazzini E., Pergola E. Exhaustive generation of combinatorial objects by ECO. *Acta Informatica*, 2004, vol. 40, no. 8, pp. 585–602.
9. Flajolet P., Zimmerman P., Cutsem B. A calculus for the random generation of combinatorial structures. *Theoretical Computer Science*, 1994, vol. 132, no. 1–2, pp. 1–35.
10. Martinez C., Molinero X. A generic approach for the unranking of labeled combinatorial classes. *Random Structures and Algorithms*, 2001, vol. 19, no. 3–4, pp. 472–497.
11. Ryabko B. Ya. [Fast enumeration of combinatorial objects]. *Discrete Mathematics and Applications*, 1998, vol. 8, no. 2, pp. 163–182 (in Russ.).
12. Medvedeva Yu.S. *Bystraja numeracija kombinatornykh obektov, nahodjashhaja primenenie v sistemah peredachi i hranenija informacii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Fast numbering of combinatorial objects, which is used in information transmission and storage systems. Cand. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2015, 113 p. (in Russ.).
13. Kruchinin V.V. *Metody postroenija algoritmov generacii i numeracii kombinatornykh obektov na osnove derev I/ILI* [Methods for developing algorithms for ranking and unranking combinatorial objects based on and-or trees]. Tomsk, 2007, 200 p. (in Russ.).
14. Kruchinin V.V. *Predstavlenie mnozhestv derevjami I/ILI* [Representation of sets by and-or trees]. *Proceedings of TUSUR University*, 1998, no. 1(17), pp. 107–112 (in Russ.).
15. Shablya Y.V., Melman V.S., Repkin A.S. [Analysis of the method for developing algorithms for combinatorial generation on the basis of and-or trees]. *Proceedings of the International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems (28-30 November 2018)*. Tomsk, TUSUR, 2018, vol. 2, pp. 20–22 (in Russ.).
16. Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Borovskoy I.G., Shelupanov A.A. *Tekhnologiya pryamogo poiska pri reshenii zadach prikladnoy matematiki* [Direct search technology for solving problems of applied mathematics]. *Vychislitelnyye tekhnologii*, 1995, vol. 4, no. 10, pp. 19–25.
17. Kruchinin V.V., Kruchinin D.V. *Stepeni proizvodjashhikh funkciy i ih primenenie* [Powers of generating functions and their application]. Tomsk, 2013. 236 p. (in Russ.).
18. Perminova M.Yu. *Algoritmy i programnyj modul poluchenija javnykh vyrazhenij koeficientov proizvodjashhikh funkciy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Algorithms and software module for obtaining explicit expressions for the coefficients of generating functions. Cand. eng. sci. diss.]. Tomsk, 2017. 113 p. (in Russ.).
19. Shablya Y.V., Kruchinin D.V. Euler-Catalan's number triangle and its application. *Proceedings book of the Mediterranean International Conference of Pure & Applied Mathematics and Related Areas (26-29 October 2018)*. Antalya, 2018, pp. 212–216.

Yuriy V. Shablya

PhD student, Department of Complex Information Security of Computer Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
146, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
ORCID 0000-0002-9695-7493
Phone: +7-906-949-03-07
Email: shablya-yv@mail.ru

Dmitry V. Kruchinin

Candidate of Science in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Department of Complex Information Security of Computer Systems, TUSUR
146, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
ORCID 0000-0003-3412-432X
Phone: +7-913-845-99-04
Email: kruchinindm@gmail.com

УДК 004.021:681.5

А.Н. Горитов, А.А. Бодрухин

Сравнение методов выделения особых точек объектов на изображениях рабочей сцены робота-манипулятора

Методы поиска особых точек находят широкое распространение в задачах сравнения изображений, совмещения панорамных снимков, распознавания объектов. В настоящее время разработано большое число методов, позволяющих выделять особые точки. Среди них можно отметить методы, предложенные такими авторами, как Н. Moravec, С.Г. Harris, J. Shi, С. Tomasi, W. Förstner, S.M. Smith, J.M. Brady, E. Rosten, Т. Drummond и др. Методы, успешно выполняющие поиск особых точек в одной предметной области, часто показывают более низкие результаты на изображениях из другой предметной области. В работе проведен сравнительный анализ наиболее известных методов выделения особых точек.

Ключевые слова: промышленный робот, техническое зрение, обработка изображения, особые точки.
doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-61-66

Современные манипуляционные роботы позволяют выполнять сложные операции и обладают высокой точностью позиционирования. Благодаря этим свойствам роботы находят широкое применение в промышленности [1]. Роботы могут выполнять как простые операции, такие как сортировка, укладка в заранее подготовленную тару, так и сложные операции, требующие высокой точности. Объекты, с которыми взаимодействует робот, могут иметь сложную форму. Выполнение операций с такими объектами требует точного определения их положения в рабочем пространстве робота. Ошибки в определении пространственного положения объектов могут иметь негативные последствия как для окружающего оборудования, так и для обслуживающего персонала.

Система управления адаптивным роботом получает информацию о расположении объектов во внешней среде. В качестве основы для построения системы управления адаптивным роботом в настоящее время широко используются системы технического зрения (СТЗ) [2, 3]. Для получения информации об объектах внешней среды в СТЗ применяют видеокамеры [4]. Как правило, изображение, полученное с помощью видеокамеры, содержит много избыточной информации и требует предварительной обработки [5, 6].

Предварительная обработка изображения является важным этапом работы с изображением внешней среды манипуляционного робота [7]. На этапе предварительной обработки изображения выполняются удаление шума, переход от цветного к полутоновому изображению и т.д. [5, 6].

Одной из актуальных задач промышленной робототехники является возможность выделения на изображении объектов, имеющих сложную форму, и проведения классификации выделенных объектов [8].

Одним из подходов для решения этой задачи является выделение особых точек на изображении объекта.

Особые точки, выделенные из объектов, обладают такими свойствами, как инвариантность относительно смещения, поворот, изменение масштаба,

изменение яркости. Эти свойства позволяют использовать особые точки при классификации объектов.

В настоящее время разработано большое число методов поиска особых точек на изображениях. Наиболее известными среди методов поиска особых точек следует отметить методы, разработанные такими авторами, как Н. Moravec, С.Г. Harris, J. Shi, С. Tomasi, W. Förstner, S.M. Smith, J.M. Brady, E. Rosten, Т. Drummond и др.

Разработанные методы широко используются в различных проблемных областях. Так как изображения в каждой проблемной области имеют свои особенности, то необходимо провести анализ известных методов с тем, чтобы определить наиболее эффективные методы выделения особых точек на изображениях рабочего пространства манипуляционного робота.

Обзор методов выделения особых точек

В 1981 г. Моравец предложил метод нахождения особых точек на изображении [9]. Детектор рассматривает изменение яркости окна W на 1 пиксель в восьми направлениях: $\{(-1, 1), (0, 1), (1, 1), (-1, 0), (0, 1), (-1, -1), (0, -1), (1, -1)\}$. Изменение яркости рассчитывается по следующей формуле:

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) (I_{x+u, y+v} - I_{x, y})^2,$$

где I – яркость изображения, E – изменение, вызванное сдвигом (u, v) , w – окно изображения (как правило, используются окна размерами 3×3 , 5×5 , 7×7 пикселей).

Локальные минимумы точек E , значения которых выше некоторого порогового значения, являются угловыми точками изображения.

К недостаткам детектора Моравца относятся большое количество ошибок при наличии диагональных ребер и отсутствие инвариантности к поворотам изображения.

В 1988 г. Харрис предложил [10] модификацию детектора Моравца.

Харрис предложил рассматривать производные яркости по всем направлениям, что значительно снизило количество ошибок при наличии диаго-

нальных ребер. Формула для расчета изменения яркости в детекторе Харриса имеет вид

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) (I_x^2 u^2 + I_y^2 v^2 + 2I_x I_y uv)^2,$$

где I_x и I_y – производные по направлениям x и y соответственно.

Для достижения инвариантности к поворотам изображения было предложено использовать матричную форму записи:

$$M = \sum_{u, v} w(u, v) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}.$$

Матричная форма используется для расчета меры отклика R :

$$R = \det(M) - k * \text{tr}(M)^2 = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2,$$

где $\det(M)$ – определитель матрицы; $\text{tr}(M)$ – след матрицы; λ_1, λ_2 – характеристические числа матрицы M ; k – константа (используется значение от 0,04 до 0,06).

Результат работы детектора Harris на тестовом изображении представлен на рис. 4, а.

На практике оказалось, что детектор Harris является достаточно нестабильным. Причиной этому был используемый метод расчета отклика R .

Детектор Shi–Tomashi был опубликован в 1994 г. [11] и является модификацией детектора Харриса. Модификация заключается в изменении метода подсчета меры отклика R :

$$R = \min(\lambda_1, \lambda_2).$$

Сравнить функцию отклика детектора Shi–Tomashi с функцией отклика детектора Харриса можно, построив график этих функций (рис. 1).

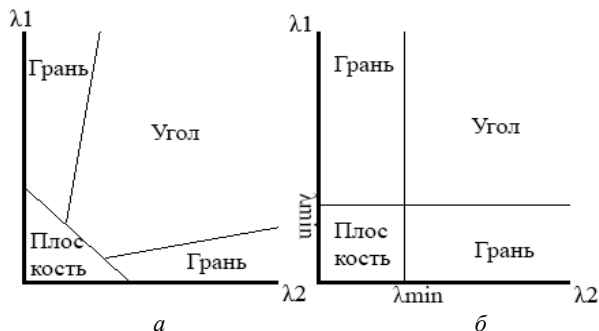


Рис. 1. Графики функций отклика. Детекторы: Харриса – а; Shi–Tomashi – б

Результат работы детектора Shi–Tomashi на тестовом изображении представлен на рис. 4, б.

Детектор Förstner был опубликован [12] в 1986 г. и использует ту же меру угловатости, что и детектор Харриса. Этот детектор использует следующую функцию отклика:

$$R = \frac{\det(M)}{\text{tr}(M)^2} = \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2.$$

Помимо этого, детектор дополнительно рассчитывает меру округлости угла C , что крайне положи-

тельно сказывается на поиске отверстий на изображении:

$$C = \frac{4 \det(M)}{\text{tr}(M)^2} = 1 - \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2.$$

Результат работы детектора Förstner на тестовом изображении представлен на рис. 4, в.

Детектор SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilation Nucleus) [13] существенно отличается от алгоритмов, рассмотренных ранее.

Для каждого пикселя изображения рассматривается круговой регион некоторого фиксированного радиуса. Далее сравнивается интенсивность пикселей этого региона с интенсивностью центрального пикселя (ядра). В итоге сравнения пиксели региона разделяются на две категории, интенсивность которых близка к интенсивности ядра (такие области называются USAN) и остальные. Формула сравнения интенсивности ядра с другой точкой региона имеет вид

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = e^{-\left(\frac{I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)}{t} \right)^6},$$

где \vec{r}_0 – ядро; \vec{r} – другая точка региона; I – функция интенсивности точки; t – пороговое значение.

В зависимости от занимаемой области регионам USAN можно судить о типе ядра (рис. 2):

- если USAN занимает большую часть региона, то ядро является частью однородного участка изображения;
- если USAN занимает примерно 50% региона, то ядро является ребром;
- если USAN занимает меньшую часть региона, то ядро является углом.

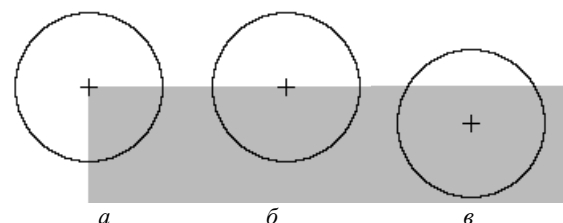


Рис. 2. Поиск регионов USAN. Ядро является: углом – а; ребром – б; частью однородного участка – в

Результат работы детектора SUSAN на тестовом изображении представлен на рис. 4, г.

Детектор FAST [14] разрабатывался с целью обеспечить наилучшее быстродействие среди детекторов поиска углов. Принцип работы этого детектора схож с принципом работы SUSAN.

Вокруг каждого пикселя изображения строится окружность, состоящая из 16 пикселей. Центральная точка считается углом, если построенная окружность содержит последовательность, состоящую из n точек, интенсивность которых больше, чем интенсивность центральной точки (рис. 3).

Результат работы детектора FAST на тестовом изображении представлен на рис. 4, д.

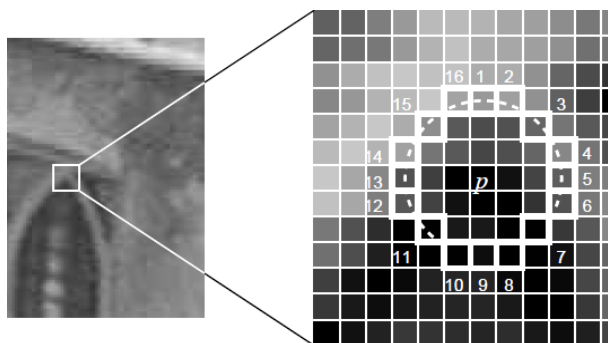


Рис. 3. Построение окружности из 16 точек вокруг центра p ; p – угловая точка, так как существует последовательность точек (точки с 6 по 11), интенсивность которых больше интенсивности центральной точки

Детектор CSS был опубликован в 1992 г. [15]. Основан на принципе кривизны масштабного пространства. Алгоритм поиска углов состоит из следующих шагов:

1. Найти границы объектов на изображении, используя метод Canny.
2. Выделить контуры на изображении. Соединить концы смежных контуров. Если конец контура соединяется с границей, то отметить точку как Т-связный угол.
3. Для каждого контура вычислить значения кривизны при наибольшем масштабе σ_{high} . Начальными углами считаются локальные максимумы, значения которых больше некоторого порогового значения и вдвое больше значений соседних локальных минимумов.
4. Отследить углы от наибольшего масштаба до наименьшего для улучшения свойства локализации.
5. Сравнить Т-связные углы с остальными углами. Если угол расположен рядом с другим углом, то удалить один из углов.

На основе детектора CSS были предложены различные модификации, которые используют другие методики для расчета значения кривизны (шаг № 3). К этим модификациям относятся детекторы CPDA и GLCP.

Детектор CPDA (Chord-to-Point Distance Accumulation) был опубликован в 2008 г. Mohammad Awrangjeb [16].

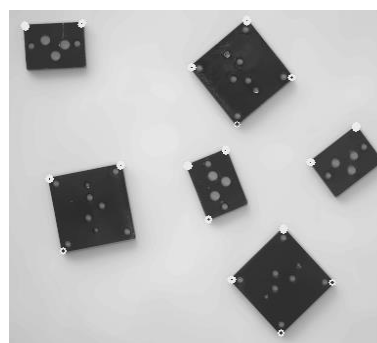
Детектор использует дискретную оценку кривизны, устойчивую к локальным изменениям. Используется 3 хорды различной длины для оценки 3 нормированных дискретных значений кривизны в каждой точке сглаженной кривой.

Результат работы детектора CPDA на тестовом изображении представлен на рис. 4, е.

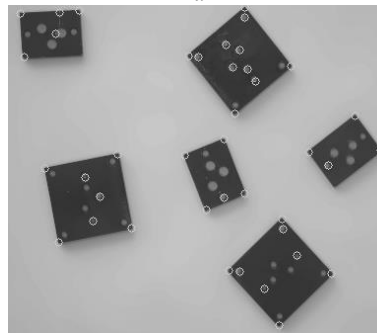
Детектор GLCP (оригинальное название Corner detector based on global and local curvature properties) [17] был опубликован в 2008 г.

Основная идея детектора состоит в использовании глобальных и локальных свойств кривизны и балансировке их влияния при поиске углов.

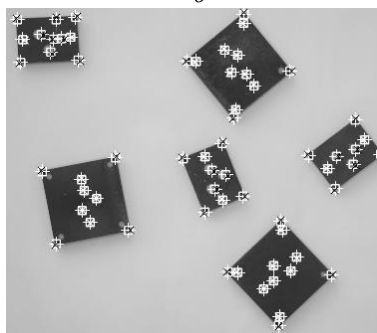
Результат работы детектора GLCP на тестовом изображении представлен на рис. 4, ж.



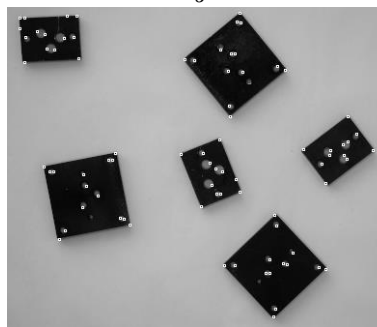
а



б



в



г



д

Рис. 4 (начало)

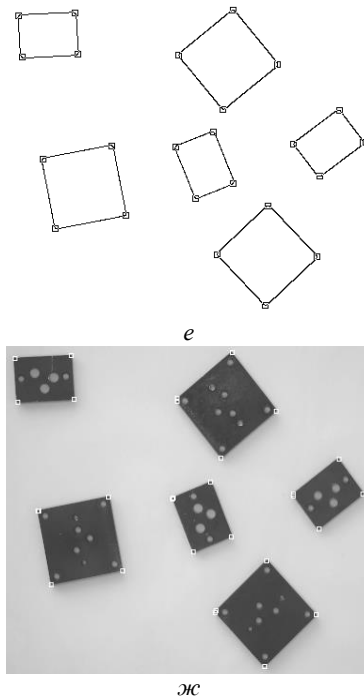


Рис. 4 (окончание). Результаты работы детекторов на тестовом изображении. Детекторы: Harris – а; Shi–Tomashi – б; Förstner – в; SUSAN – з; FAST – д; CPDA – е; GLCP – жс

Методика сравнения

Для сравнения методов выделения особых точек использовалась серия из 28 снимков, на которых находились объекты квадратной (40×40 мм) и прямоугольной (24×32 мм) формы. Объекты имели отверстия диаметром 2,5; 3,5 и 5 мм.

В сравнении участвовали семь алгоритмов: Harris, Shi–Tomashi, Förstner, SUSAN, FAST, CPDA, GLCP. Оценка методов проводилась по следующим критериям:

1. Количество верно отмеченных угловых точек.
2. Количество пропущенных угловых точек.
3. Количество верно отмеченных отверстий.
4. Количество пропущенных отверстий.
5. Количество ложных отметок.

Для количественной оценки анализируемых методов проведем сравнение по следующим величинам:

1. Ошибка нахождения угловой точки E_c рассчитывалась следующим образом:

$$E_c = \frac{C_m}{C_a},$$

где C_m – количество пропущенных углов; C_a – всего углов.

2. Ошибка нахождения отверстия E_h рассчитывалась следующим образом:

$$E_h = \frac{H_m}{H_a},$$

где H_m – количество пропущенных отверстий; H_a – всего отверстий.

3. Вероятность ложной точки E_f рассчитывалась следующим образом:

$$E_f = \frac{M_f}{M_a},$$

где M_f – количество ложных отметок; M_a – всего отметок.

Дополнительно учитывались критерии качества методов поиска угловых точек [13], а именно:

1. Хорошее определение: количество ложных и пропущенных углов должно быть минимально.
2. Хорошая локализация: чем ближе найденная детектором особая точка к своему действительному расположению, тем лучше.
3. На один действительный угол или отверстие должна приходиться одна особая точка.

Результаты

В таблице приведены вычисленные значения ошибок для рассматриваемых в статье методов.

Рассчитанные ошибки

Алгоритм	E_c	E_h	E_f
Harris	0,3285	0,9989	0
Shi–Tomashi	0,0178	0,4957	0,0321
Förstner	0,0017	0,1324	0,0391
SUSAN	0,0250	0,0836	0,0772
FAST	0,0017	0,0487	0,0267
CPDA	0	1	0
GLCP	0,0017	1	0,1538

На основе результатов из таблицы, учитывая критерии качества методов поиска угловых точек (см. рис. 4), можно сделать следующие выводы:

- детектор Harris справился с задачей хуже всего: несмотря на хорошую локализацию, детектор допускает большое количество пропусков углов и почти полностью игнорирует отверстия (см. рис. 4, а);
- детектор Shi–Tomashi справился с задачей лучше, чем детектор Харриса: количество пропущенных углов и отверстий намного меньше (см. рис. 4, б);
- детектор Förstner отличился хорошим распознаванием углов и отверстий. Хорошая локализация и отсутствие дубликатов найденных углов (см. рис. 4, в);
- детектор SUSAN хоть и имеет большой процент найденных углов, показывает плохую локализацию этих углов. Отмечает большое количество дубликатов при поиске отверстий (см. рис. 4, з);
- детектор FAST имеет один из лучших показателей найденных углов и отверстий, однако детектор отмечает огромное количество дубликатов рядом с действительным углом; плохая локализация найденных точек (см. рис. 4, д);
- детектор CPDA идеально справился с задачей поиска углов: отсутствие ложных точек и дубликатов, отличная локализация. Однако детектор полностью игнорирует отверстия (см. рис. 4, е);
- детектор GLCP справился чуть хуже детектора CPDA: случаются пропуски угловых точек, а также присутствует большое количество дубликатов найденных точек (см. рис. 4, жс).

Для повышения эффективности определения особых точек предлагается использовать комбинированный метод, который включает в себя: детектор CPDA для поиска углов и детектор Förstner, специально настроенный для наилучшего поиска отверстий. Объединение этих детекторов позволяет получить новый метод с лучшими свойствами поиска особых точек, а именно:

- ошибка нахождения угла – 0;
- ошибка нахождения отверстия – 0,1016;
- вероятность ложной точки – 0,0007.

В соответствии с проведенным анализом можно сделать вывод, что в данной предметной области наилучшие результаты показал комбинированный метод поиска особых точек.

Литература

1. Корендясов А.И. Теоретические основы робототехники: в 2 кн. – Кн. 2 / А.И. Корендясов, Б.П. Саламандрa, Л.И. Тывес. – М.: Наука, 2006. – 376 с.
2. Клевалин В.А. Системы технического зрения в промышленной робототехнике / В.А. Клевалин, А.Ю. Поливанов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 9. – С. 26–36.
3. Техническое зрение роботов / под ред. А. Пью. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
4. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.
5. Хорн Б.К.П. Зрение роботов. – М.: Мир, 1989. – 487 с.
6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
7. Горитов А.Н. Предварительная обработка изображений в системах технического зрения // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4-1. – С. 53–58.
8. Горитов А.Н. Выделение на изображении низкого разрешения параметрически задаваемых объектов / А.Н. Горитов, С.И. Яковченко // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 88–90.
9. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance // Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 1981. – P. 785–790.
10. Harris C.G. Determination of Ego-motion from Matched Points // Alvey Vision Conference. – 1987. – P. 189–192.
11. Shi J. Good features to track / J. Shi, C. Tomasi // Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2004. – P. 593–600.
12. Förstner W. A feature based correspondence algorithm for image matching // Intl. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1986. – Vol. 26. – P. 150–166.
13. Smith S.M. SUSAN – A New Approach to Low Level Image Processing / S.M. Smith, J.M. Brady // International Journal of Computer Vision. – 1997. – Vol. 23, No. 1. – P. 45–78.
14. Rosten E. Machine learning for high-speed corner detection / E. Rosten, T. Drummond // Proc. European Conference on Computer Vision. – 2006. – Vol. 1. – P. 430–443.
15. Rattarangsi A. Scale-based detection of corners of planar curves / A. Rattarangsi, R.T. Chin // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – 1992. – P. 430–449.
16. Awrangjeb M. Robust image corner detection based on the chord-to-point distance accumulation technique / M. Awrangjeb, G. Lu // Multimedia, IEEE Transactions. – 2008. – Vol. 10, No. 6. – P. 1059–1072.

17. He X.C. Corner detector based on global and local curvature properties / X.C. He, H.C. Yung // Optical Engineering. – 2008. – Vol. 47, No 5. – P. 057008-1–057008-12.

Горитов Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (382-2) 70-15-36
Эл. почта: ang@asu.tusur.ru

Бодрухин Александр Александрович

Магистрант каф. АСУ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (382-2) 70-15-36
Эл. почта: bodro96@gmail.com

Goritov A.N., Bodrukhin A.A.

Comparison of feature points detection methods

Methods of selecting feature points are widely used in tasks of comparing images, combining panoramic images, object recognition. Currently, a large number of methods have been developed that detect feature points. Among them are methods proposed by such authors as H. Moravec, C.G. Harris, J. Shi, C. Tomasi, W. Förstner, S.M. Smith, J.M. Brady, E. Rosten, T. Drummond and others. Methods that successfully detect feature points on images in one subject area often show lower results on images from another subject area. This paper compares the best-known methods of selecting feature points.

Keywords: industrial robot, computer vision, image processing, feature points.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-61-66

References

1. Korendyas A.I. Salamander B.P., Tyves L.I. *Teoreticheskiye osnovy robototekhniki* [Theoretical foundations of robotics]. Moscow, Science, 2006, vol. 2, 2006, 376 p. (in Russ.).
2. Klevalin V.A., Polivanov A.Yu. [Vision systems in industrial robotics]. *Mechatronics, automation, control*, 2010, no. 9, pp. 26–36. (in Russ.).
3. *Tekhnicheskoye zreniye robotov* [Technical vision of robots]. Ed. A. Pugh. M., Engineering, 1987, 320 p. (in Russ.).
4. Vorotnikov S.A. *Informatsionnyye ustroystva robototekhnicheskikh sistem* [Information devices of robotic systems]. Moscow, Publishing House of Moscow State Technical University, N.E. Bauman, 2005, 384 p. (in Russ.).
5. Horn B.K.P. *Zreniye robotov* [Robot vision]. M., World, 1989, 487 p. (in Russ.).
6. Gonzalez R., Woods R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. M., Technosphere, 2005, 1072 p. (in Russ.).
7. Goritov A.N. [Preliminary image processing in vision systems]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4-1, pp. 53–58 (in Russ.).
8. Goritov A.N., Yakovchenko S.I. [Highlighting of parametrically specified objects on the low resolution image]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 88–90 (in Russ.).

9. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance. *Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, pp. 785–790.

10. Harris C.G. Determination of Ego-motion from Matched Points. *Alvey Vision Conference*, 1987, pp. 189–192.

11. Shi J., Tomasi C. Good features to track. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004, pp. 593–600.

12. Förstner W. A feature based correspondence algorithm for image matching. *Intl. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1986, vol. 26, pp. 150–166.

13. Smith S.M., Brady J.M. SUSAN – A New Approach to Low Level Image Processing. *International Journal of Computer Vision*, 1997, vol. 23, no. 1, pp. 45–78.

14. Rosten E., Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection. *Proc. European Conference on Computer Vision*, 2006, vol. 1, pp. 430–443.

15. Rattarangsi A., Chin R.T. Scale-based detection of corners of planar curves. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1992, pp. 430–449.

16. Awrangjeb M., Lu G. Robust image corner detection based on the chord-to-point distance accumulation technique. *Multimedia, IEEE Transactions*, 2008, vol. 10, no. 6, pp. 1059–1072

17. He X.C., Yung H.C. Corner detector based on global and local curvature properties. *Optical Engineering*, 2008, vol. 47, no 5, pp. 057008-1–057008-12.

Aleksandr N. Goritov

Doctor of Engineering Science, Professor,
Department Automated Control Systems (ACS),
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: ang@asu.tusur.ru

Aleksandr A. Bodrukhin

Master Student, Department Automated Control Systems
(ACS), Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: bodro96@gmail.com

УДК 519.862.6

С.И. Носков, А.С. Вергасов

Прогнозирование по регрессионной модели с применением элементов теории сходства

Рассматривается одно из основных направлений практического применения математических моделей регрессионного типа, связанное с прогнозированием будущих значений зависимых переменных. Для повышения точности этих значений предлагается при оценивании неизвестных параметров регрессионной модели вместо обычного метода наименьших квадратов (МНК) использовать взвешенный метод наименьших квадратов (ВМНК). При этом при расчете весов наблюдений периода основания прогноза привлекается разработанная профессором Ю.А. Ворониным теория сходства, в соответствии с которой, чем более сходен вектор значений независимых переменных наблюдения периода упреждения с соответствующим вектором наблюдения периода основания, тем большим весом последнее должно обладать. Это соображение положено в основу предлагаемого в работе алгоритма вычисления весов. Подробно рассмотрен численный пример.

Ключевые слова: регрессионная модель, метод наименьших квадратов, взвешенный метод наименьших квадратов, теория сходства, прогнозирование.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-67-70

Одним из основных направлений практического использования регрессионной модели является прогнозирование будущего развития исследуемого объекта.

Рассмотрим составной элемент такой модели – линейное регрессионное уравнение

$$y_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y_k и x_{ki} – k -е значения соответственно зависимой и i -й независимой переменных; $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)^T$ – вектор подлежащих оцениванию параметров; ε_k – ошибки аппроксимации; n – количество наблюдений (длина выборки).

Представим уравнение (1) в векторной форме:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\alpha + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2)$$

где $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)^T$, $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T$, $\mathbf{X} = \|x_{ki}\|$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$.

Методам оценки параметров уравнения (1) посвящена весьма обширная литература (см., в частности, [1–9]). В рамках регрессионного анализа глубоко проработаны вопросы оценки адекватности моделей (см., например, [10–12]).

При известных оценках параметров уравнения (1) процесс прогнозирования будущих значений зависимой переменной состоит в подстановке в уравнение значений независимых переменных и последующем простом расчете \mathbf{y} . Формально эта процедура выглядит следующим образом.

Пусть известны значения независимых переменных на периоде упреждения прогноза \tilde{x}_{ki} , $k = \overline{n+1, n+\tau}$, $i = \overline{1, m}$. Тогда прогнозные значения зависимой переменной рассчитываются по формуле

$$\tilde{y}_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i \tilde{x}_{ki}, k = \overline{n+1, n+\tau}, i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где τ – длина периода упреждения.

Такая простая расчетная схема прогнозирования применяется для большинства известных регрессионных моделей.

Вместе с тем? эта схема не учитывает одно крайне важное обстоятельство, а именно, в какой мере векторы $\tilde{\mathbf{x}}_k = (\tilde{x}_{k1}, \dots, \tilde{x}_{km})$, $k = \overline{n+1, n+\tau}$ соответствуют (подобны, сходны) каждому из векторов предыстории процесса $\mathbf{x}_k = (x_{k1}, \dots, x_{kn})$, $k = \overline{1, n}$, то есть каждой строке матрицы \mathbf{X} , поскольку вполне естественно полагать, что чем выше такое соответствие, тем в большей степени тенденции, характерные для данного наблюдения исходной выборки, проявятся и на периоде упреждения прогноза.

Формализовать такой учет соответствия тенденций на периодах основания $\{1, 2, \dots, n\}$ и упреждения $\{n+1, n+2, \dots, n+\tau\}$ можно, используя взвешенные методы оценивания параметров уравнения (1), например, взвешенный метод наименьших квадратов (ВМНК) и теорию сходства, разработанную Ю.А. Ворониным [13].

Вектор параметров α в уравнении (2) при использовании ВМНК рассчитывается по формуле

$$\tilde{\alpha} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{y}, \quad (4)$$

где $\mathbf{W} = \text{diag}(w_k)$, $k = \overline{1, n}$, $w_k > 0$ – веса наблюдений выборки.

Выявление упомянутого сходства можно осуществлять следующим образом. Заметим, что впервые идея такого подхода предложена в [14].

Введем в рассмотрение матрицу \mathbf{Z}_{ki} , $k = \overline{1, n+\tau}$, $i = \overline{1, m}$ элементы которой имеют вид

$$z_{ki} = x_{ki}, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m},$$

$$z_{ki} = \tilde{x}_{ki}, k = \overline{n+1, n+\tau}, i = \overline{1, m}.$$

Введем также в рассмотрение переменные z_i^{\min} и z_i^{\max} по правилу

$$z_i^{\min} = \min_{k=1, n+\tau} z_{ki}, \quad z_i^{\max} = \max_{k=1, n+\tau} z_{ki}.$$

Преобразуем матрицу \mathbf{Z} в $\tilde{\mathbf{Z}}$ следующим образом:

$$\tilde{z}_{ki} = \frac{z_{ki} - z_i^{\min}}{z_i^{\max} - z_i^{\min}}, \quad k = \overline{1, n+\tau}, i = \overline{1, m}.$$

Очевидно, что $\tilde{z}_{ki} \in [0, 1]$ для всех k и i .

Для того чтобы оценить, в какой степени s -е наблюдение периода упреждения прогноза сходно (подобно) с k -м наблюдением периода основания, воспользуемся одной из описанных в [13] мер сходства. Например, такой:

$$\omega(s, k) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\tilde{z}_{si} - \tilde{z}_{ki}|,$$

$$s \in \{n+1, \dots, n+\tau\}, k \in \{1, \dots, n\}.$$

Отметим, что в [13] приведено еще девять возможных мер сходства.

После этого для расчета прогнозного значения зависимой переменной y_s необходимо вначале рассчитать оценку $\tilde{\mathbf{a}}$ по формуле (4) с матрицей весов \mathbf{W} , где

$$w_k = \omega(s, k), \quad (5)$$

с фиксированной s , а затем вычислить \tilde{y}_s по формуле (3) с этой оценкой, т.е. при $\mathbf{a} = \tilde{\mathbf{a}}$.

Эту операцию необходимо проделать τ раз для всего периода упреждения прогноза.

Рассмотрим пример применения предложенного способа прогнозирования с использованием опубликованных в работе [15] известных данных, которые описывают работу установки для окисления аммиака в азотную кислоту и состоят из 21 наблюдения. Переменными модели при этом являются так называемый Stackloss (\mathbf{y}), который зависит от скорости работы установки x_1 , температуры охлаждающей воды на входе x_2 и концентрации кислоты x_3 .

Статистическая информация представлена в табл. 1.

Прежде всего разобьем эту выборку на периоды основания и упреждения прогноза с номерами 1–13 и 14–21 соответственно. То есть положим $n = 13$, $\tau = 8$. На первой из них построим трехфакторную регрессию без свободного члена с помощью МНК:

$$y = 0,83x_1 + 1,17x_2 - 0,65x_3, \quad (6)$$

$$R = 0,98, F = 180, \mathbf{T} = (4,1; 2,3; -6,4),$$

где R – критерий множественной детерминации, F – критерий Фишера, \mathbf{T} – вектор значений критерия Стьюдента для каждого из параметров. Анализ значений этих критериев указывает на высокую адекватность уравнения (6).

Применим далее для прогнозирования значений зависимой переменной на периоде упреждения с использованием как обычного МНК, так и ВМНК на основе вычисления весов наблюдений по формуле (5). Весовые коэффициенты для каждого из 13 наблюдений периода основания и каждого наблюдения периода упреждения приведены в табл. 2.

Таблица 1

Статистическая информация				
№	y	x_1	x_2	x_3
1	42	80	27	89
2	37	80	27	88
3	37	75	25	90
4	28	62	24	87
5	18	62	22	87
6	18	62	23	87
7	19	62	24	93
8	20	62	24	93
9	15	58	23	87
10	14	58	18	80
11	14	58	18	89
12	13	58	17	88
13	11	58	18	82
14	12	58	19	93
15	8	50	18	89
16	7	50	18	86
17	8	50	19	72
18	8	50	19	79
19	9	50	20	80
20	15	56	20	82
21	15	70	20	91

Таблица 2

Весовые коэффициенты наблюдений												
ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9	ω_{10}	ω_{11}	ω_{12}	ω_{13}
0,29	0,27	0,46	0,61	0,68	0,65	0,77	0,77	0,71	0,63	0,86	0,80	0,68
0,36	0,34	0,46	0,61	0,68	0,64	0,56	0,56	0,69	0,68	0,91	0,85	0,73
0,28	0,31	0,38	0,64	0,70	0,67	0,48	0,48	0,71	0,75	0,83	0,82	0,80
0,13	0,14	0,23	0,46	0,52	0,49	0,36	0,36	0,53	0,75	0,60	0,59	0,71
0,16	0,18	0,26	0,50	0,57	0,54	0,36	0,36	0,58	0,85	0,63	0,63	0,80
0,20	0,22	0,29	0,55	0,62	0,58	0,40	0,40	0,63	0,84	0,61	0,60	0,79
0,25	0,27	0,36	0,65	0,72	0,68	0,50	0,50	0,74	0,85	0,72	0,71	0,90
0,56	0,53	0,73	0,64	0,70	0,67	0,69	0,69	0,61	0,46	0,70	0,64	0,52

В табл. 3 и 4 приведены нижние и верхние значения весовых коэффициентов для наблюдений периода основания и упреждения.

В табл. 5 приведены восемь значений вектора параметров уравнения (6), оцененных по ВМНК.

Таблица 3

Нижние и верхние значения весовых коэффициентов наблюдений периода основания													
Вес	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9	ω_{10}	ω_{11}	ω_{12}	ω_{13}
Нижняя граница	0,13	0,14	0,23	0,46	0,52	0,49	0,36	0,36	0,53	0,46	0,6	0,59	0,68
№ наблюдения	4	4	4	4	4	4	4,5	4,5	4	8	4	4	1
Верхняя граница	0,56	0,53	0,73	0,65	0,72	0,68	0,77	0,77	0,74	0,85	0,91	0,85	0,9
№ наблюдения	8	8	8	7	7	7	1	1	7	5,7	2	2	7

Таким образом, значения параметров при использовании ВМНК лежат в интервалах:

$$\alpha_1 \in [0, 71; 0, 88],$$

$$\alpha_2 \in [1, 07; 1, 23],$$

$$\alpha_3 \in [-0, 65; -0, 62].$$

В табл. 6 приведены фактические и расчетные прогнозные \tilde{y}_k (МНК), \tilde{y}_k (ВМНК), $k = 14, 21$ значения зависимой переменной, вычисленные с использованием обычного МНК и ВМНК.

Таблица 4
Нижние и верхние значения весовых коэффициентов наблюдений периода упреждения

№ наблюдения	1	2	3	4	5	6	7	8
Нижняя граница	0,27	0,34	0,28	0,13	0,16	0,20	0,25	0,53
Верхняя граница	0,86	0,91	0,83	0,75	0,85	0,84	0,90	0,73

Таблица 5
Значения параметров уравнения

α_1	α_2	α_3
0,84	1,09	-0,64
0,84	1,08	-0,64
0,81	1,12	-0,63
0,77	1,20	-0,62
0,77	1,22	-0,63
0,78	1,23	-0,64
0,79	1,21	-0,64
0,86	1,07	-0,65

Таблица 6
Фактические и расчетные значения y

№	y_k (факт.)	\tilde{y}_k (МНК), (расч.)	\tilde{y}_k (ВМНК), (расч.)
14	12	9,535	9,809
15	8	4,331	4,545
16	7	6,297	6,425
17	8	16,640	16,405
18	8	12,053	11,980
19	9	12,568	12,494
20	15	16,249	15,976
21	15	21,999	22,617

Из последней таблицы следует, что для семи наблюдений периода упреждения из восьми ВМНК дает более точный прогноз, чем МНК. И лишь для последнего, 21-го, наблюдения – это не так.

Анализ результатов расчетов указывает на то, что предложенный в работе способ взвешивания наблюдений выборки, основанный на теории сходства, позволяет получать более точные прогнозы по сравнению с обычным МНК. Вместе с тем авторы отдают себе отчет в том, что на других данных такое «подавляющее преимущество» ВМНК над МНК может и не иметь места. В любом случае чем более широким арсеналом методов моделирования исследователь располагает, тем более точную модель анализируемого объекта он построит.

Литература

1. Носков С.И. Точечная характеристика множества Парето в линейной многокритериальной задаче // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – № 1 (17). – С. 99–101.
2. Golovchenko V.B. Estimation of an econometric model using statistical data and expert information / V.B. Golovchenko, S.I. Noskov // Automation and Remote Control. – 1991. – No. 4. – P. 123–132.

3. Базилевский М.П. Идентификация неизвестных параметров линейно-мультипликативной регрессии / М.П. Базилевский, С.И. Носков // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – № 3. – С. 14.

4. Лакеев А.В. Метод наименьших модулей для линейной регрессии: число нулевых ошибок аппроксимации / А.В. Лакеев, С.И. Носков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 2 (34). – С. 48–50.

5. Носков С.И. Регрессионная модель динамики эксплуатационных показателей функционирования железнодорожного транспорта / С.И. Носков, И.П. Врублевский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 2(50). – С. 192–197.

6. Носков С.И. Оценивание параметров аппроксимирующей функции с постоянными пропорциями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 2 (38). – С. 135–136.

7. Носков С.И. Множественное оценивание параметров линейного уравнения / С.И. Носков, А.В. Баенхаева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 3(51). – С. 133–138.

8. Головченко В.Б. Прогнозирование на основе дискретной динамической модели с использованием дискретной информации / В.Б. Головченко, С.И. Носков // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 4. – С. 140.

9. Ильина Н.К. Идентификация параметров некоторых негладких регрессий / Н.К. Ильина, С.А. Лебедева, С.И. Носков // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2016. – № 17. – С. 111.

10. Носков С.И. Обобщенный критерий согласованности поведения в регрессионном анализе // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2018. – № 1 (1). – С. 14–20.

11. Баенхаева А.В. Выбор структурной спецификации регрессионной модели валового регионального продукта Иркутской области / А.В. Баенхаева, М.П. Базилевский, С.И. Носков // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2016. – № 16. – С. 31–38.

12. Носков С.И. Построение регрессионных моделей с использованием аппарата линейно-булевого программирования / С.И. Носков, М.П. Базилевский. – Иркутск, 2018. – 176 с.

13. Воронин Ю.А. Начало теории сходства. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1989. – 224 с.

14. Носков С.И. Реализация взвешенного метода наименьших квадратов с использованием мер сходства / С.И. Носков, А.С. Вергасов // Вестник науки и образования. – 2018. – № 18-1 (54). – С. 29–32.

15. Dodge Y. The guinea pig of multiple regression. In Robust Statistics, Data Analysis, and Computer Intensive Methods // Springer Lecture Notes in Statistics (New York, Springer-Verlag). – 1999. – Vol. 109. – P. 91–117.

Носков Сергей Иванович

Д-р тех. наук, профессор каф. информационных систем и защиты информации Иркутского государственного ун-та путей сообщения Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, Россия, 664074
Тел.: +7-914-902-24-94
Эл. почта: noskov_s@irgups.ru

Вергасов Александр Сергеевич

Ассистент каф. информационных систем
и защиты информации
Иркутского государственного ун-та путей сообщения
Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, Россия, 664074
Тел.: +7-999-641-93-46
Эл. почта: tluck@inbox.ru

Noskov S.I., Vergasov A.S.

Predicting a regression model using elements of the theory of similarity

The article discusses one of the main directions of practical application of mathematical models of regression type, associated with the prediction of future values of dependent variables. To improve the accuracy of these values, it is proposed, when estimating unknown parameters of the regression model, instead of the usual least squares method (LSM), to use the weighted least squares method (HMSC). At the same time, when calculating the weights of observations of the base period of the forecast, the theory of similarity developed by Professor Yu.A. Voronin is used, according to which the more similar the vector of values of independent variables of the lead-time observation is with the corresponding vector of observation of the base period, the greater the weight the latter must possess. This consideration is the basis of the weighting algorithm proposed in the paper. Considered in detail a numerical example.

Keywords: regression model, least squares method, weighted least squares method, theory of similarity, forecasting.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-67-70

References

1. Noskov S.I. Tochechnaya karakterizaciya mnozhestva Pareto v linejnoj mnogokriterial'noj zadache. [*Sovremennye tekhnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie*], 2008, no. 1(17), pp. 99–101 (in Russ.).
2. Golovchenko V.B., Noskov S.I. Estimation of an econometric model using statistical data and expert information. *Automation and remote control*, 1991, no. 4, pp. 123–132 (in Russ.).
3. Bazilevsky M.P., Noskov S.I. Identification of unknown parameters of linear-multiplicative regression. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2012, no. 3, 14 p. (in Russ.).
4. Lakeev A.V., Noskov S.I. The method of least modules for linear regression: the number of zero approximation errors. *Technologies. System analysis. Modeling.*, 2012, no. 2(34), pp. 48–50 (in Russ.).
5. Noskov S.I., Vrublevsky I.P. Regression model of the dynamics of operational indicators of railway transport functioning. *Modern technologies. System analysis. Modeling.*, 2016, no. 2 (50), pp. 192–197 (in Russ.).
6. Noskov S.I. Estimation of parameters of an approximating function with constant proportions. *Modern technolo-*

gies. System analysis. Modeling, 2013, no. 2(38), pp. 135–136 (in Russ.).

7. Noskov S.I., Baenkhaeva A.V. Mnozhestvennoe ocenivanie parametrov linejnogo uravneniya. *Modern technologies. System analysis. Modeling.*, 2016, no. 3(51), pp. 133–138 (in Russ.).

8. Golovchenko V.B., Noskov S.I. Prognozirovaniye na osnove diskretnoj dinamicheskoj mo-deli s ispol'zovaniem diskretnoj informacii *Automation and Remote Control*, 1991, no. 4, p. 140 (in Russ.).

9. Ilina N.K., Lebedeva S.A., Noskov S.I. Identification of parameters of some non-smooth regressions [*Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modeliro-vanie v upravlenii slozhnymi sistemami*], 2016, no. 17, p. 111 (in Russ.).

10. Noskov S.I. The generalized criterion for the consistency of behavior in regression analysis [*Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modeliro-vanie v upravlenii slozhnymi sistemami*], 2018, no. 1 (1), pp. 14–20 (in Russ.).

11. Baenkhaeva A.V., Bazilevsky M.P., Noskov S.I. The choice of the structural specification of the regression model of the gross regional product of the Irkutsk region [*Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modeliro-vanie v upravlenii slozhnymi sistemami*], 2016, no. 16, pp. 31–38 (in Russ.).

12. Noskov S.I. Bazilevsky M.P. *Building regression models using linear-boolean programming*. Monograph, Irkutsk, 2018, 176 p. (in Russ.).

13. Voronin Yu.A. [*Nachalo teorii skhodstva*], Novosibirsk: EC of the USSR Academy of Sciences Academy of Sciences, 1989. 224 p. (in Russ.).

14. Noskov SI, Vergasov AS Implementation of the weighted least squares method using measures of similarity. *Bulletin of science and education*, 2018, no. 18–1(54), pp. 29–32 (in Russ.).

15. Dodge Y. The guinea pig of multiple regression. In *Robust Statistics, Data Analysis, and Computer Intensive Methods*. Springer Lecture Notes in Statistics (New York, Springer-Verlag), 1996, vol. 109, pp. 91–117.

Sergey I. Noskov

Doctor of Engineering Science, Professor, Sub-department
Information Systems and Information Security,
Irkutsk State Transport University
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, Russia, 664074
Phone: +7-914-902-24-94
Email: noskov_s@irgups.ru

Aleksandr S. Vergasov

Applicant, Department of Information Systems and
Information Protection, Irkutsk State Transport University
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, Russia, 664074
Phone: +7-999-641-93-46
Email: tluck@inbox.ru

УДК 62-529

Д.С. Торгаева, М.П. Сухоруков, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, Н.А. Шалыпина

Имитационное моделирование установки штангового глубинного насоса для добычи нефти

Разработана имитационная модель, описывающая установку штангового глубинного насоса как замкнутую систему. Разработка модели производилась с целью исследования влияния изменения положения динамического уровня в затрубном пространстве нефтяной скважины и различных неисправностей погружного оборудования на форму сигнала ваттметрограммы для разработки алгоритмов управления и диагностики УШГН.

Ключевые слова: имитационная модель, штанговый глубинный насос, электромеханический привод, система управления, ваттметрограмма, динамический уровень жидкости.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-71-78

Большинство современных систем управления установками штанговых глубинных насосов (УШГН) используют методы, основанные на косвенном измерении динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины для управления подачей установки, а также методы динамометрирования для диагностики неисправностей штангового глубинного насоса и ваттметрирования для диагностики наземного оборудования [1, 2]. Недостатком такого подхода является необходимость использования большого количества датчиков физических величин, что ведет к увеличению стоимости системы управления и снижению ее надежности.

В настоящее время все большую популярность набирают «бездатчиковые» системы управления установками штанговых глубинных насосов [3, 4]. Данные системы предполагают выполнение алгоритмов управления только на основании измерения и обработки сигналов датчиков электрических величин (напряжение и ток обмоток двигателя, потребляемая приводом мощность (ваттметрограмма)). Поскольку ваттметрограмма отражает изменение нагрузки на установку штангового глубинного насоса во времени, метод ваттметрирования позволяет создавать на его основе алгоритмы управления и диагностики, требующие наличия в системе только датчиков электрических величин [5]. Однако существенным недостатком ваттметрирования как метода является сложность математического анализа. В связи с этим существующие решения в области создания алгоритмов управления и диагностики требуют либо реализации сложных математических моделей объекта управления, что подразумевает предварительное измерение и ввод в систему большого количества параметров этого объекта, зачастую переменных во времени, либо предварительного исследования каждого конкретного объекта с целью выявления различных диагностических параметров и коэффициентов.

Предлагаемым авторами решением обозначенных проблем является разработка методов и алгоритмов управления, позволяющих управлять установкой штангового глубинного насоса, исходя из анализа реакции объекта управления на изменение

управляющего воздействия. Для изучения реакции объекта управления (установки штангового глубинного насоса и подсистемы «пласт – скважина») на изменение различных параметров оборудования и скважины, а также для выявления характерных для различных неисправностей изменений формы ваттметрограммы необходима разработка имитационной модели объекта управления.

Обзор литературы показал, что в настоящее время существует множество работ, направленных на создание имитационных моделей отдельных узлов УШГН. Однако имитационных моделей, описывающих УШГН как замкнутую систему в совокупности с подсистемой «пласт – скважина» и системой управления, достаточно мало. Известна модель [6], описывающая систему с использованием элементарной теории, которая имеет низкую степень адекватности, что не позволит получать ваттметрограммы, отражающие всю необходимую информацию о состоянии объекта управления.

Имитационная модель, описывающая установку с использованием точной теории, представлена в работе [7]. Существенным недостатком этой модели является то, что она не учитывает возможное выравнивание забойного и пластового давлений и срыв подачи насоса при снижении динамического уровня до приема ШГН, а также то, что имитационная модель ШГН представлена в виде электрической схемы замещения, что ограничивает возможность моделирования различных неисправностей ШГН. В связи с этим существует необходимость создания имитационной модели УШГН, описывающей ее как замкнутую систему с возможностью моделирования различных неисправностей данной установки.

Описание имитационной модели

Управляющим воздействием для УШГН является изменение частоты фазного напряжения на обмотках асинхронного электродвигателя. Исходя из этого, разработана имитационная модель, отражающая изменение динамического уровня жидкости и потребляемой приводом мощности в ответ на изменение частоты фазного напряжения. Объект управления представляет собой сложную систему пласт – скважина – ШГН – электромеханический привод,

параметры и состояния которой связаны между собой (рис. 1). Для упрощения математического описания объекта каждый узел рассматривается как отдельная подсистема (отдельный объект управления). Связи с другими элементами УШГН являются для

такого объекта входными сигналами (управляющими и возмущающими воздействиями). Реакция объекта на входные воздействия, в свою очередь, является входным сигналом для других элементов системы.



Рис. 1. Структурно-функциональная схема объекта управления: Q – подача ШГН; s_A – закон движения полированного штока; ω_d – угловая скорость вращения вала двигателя; f_y – частота управляющего сигнала, задаваемая системой управления; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя; $G_{шт}$ – усилия на полированном штоке; $H_{дин}$ – динамический уровень жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины; P – величина средней за период качания балансира потребляемой приводом мощности

Имитационная модель пласт – скважина

Модель описывает подсистему «пласт – скважина – штанговый глубинный насос». Управляющим воздействием для данной подсистемы является изменение количества откачиваемой жидкости (расход жидкости ШГН), а реакцией на воздействие – изменение уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины.

Описание данного взаимодействия неоднократно приводилось в работах, посвященных разработке систем управления УШГН [2, 10], но разработанные модели учитывают лишь влияние параметров, характеризующих производительность ШГН (количество двойных ходов в минуту, длина хода полированного штока, диаметр плунжера и коэффициент заполнения насоса), и теоретического дебита на положение динамического уровня. Однако изменение динамического уровня оказывает существенное влияние на величину забойного давления, что в свою очередь влияет на скорость притока пластовой жидкости, а значит, и на дебит скважины.

Исходя из уравнения расхода жидкости в системе и формулы Дюпюи, получено следующее уравнение для динамического уровня жидкости в затрубном пространстве [11]:

$$H_{дин}(t) = \frac{1}{\pi(r_c - r_{НКТ})^2} \times \int_0^t \left(\frac{2\pi kh(p_0 - p_{заб}(t))}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} - v_{пл} S_{пл} \beta \right) dt + H_{дин}(0), \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости (Па*с); k – коэффициент проницаемости пласта (мД); h – толщина продуктивного пласта (м), через который происходит фильтрация; p_0 – пластовое давление (давление на приеме контура питания скважины) (Па); $p_{заб}$ – забойное давление (давление на границе зоны фильтрации) (Па); R_k – радиус контура питания (м), r_c – радиус скважины (м); $S_{пл}$ – площадь сечения плунжера (м²); n – число двойных ходов в минуту;

$v_{пл}$ – скорость плунжера (м/с); β – коэффициент наполнения насоса ($\beta \in [0, 1]$) [12]; $H_{дин}$ – положение динамического уровня (м); $r_{НКТ}$ – внешний радиус колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) (м); S_3 – площадь сечения пространства между внутренней поверхностью скважины и внешней поверхностью колонны НКТ (м²); $H_{дин}(0)$ – начальное значение динамического уровня (м). Имитационная модель узла системы «пласт – скважина» представлена на рис. 2.

Имитационная модель штангового глубинного насоса

Имитационная модель штангового глубинного насоса представляет собой математическую модель подсистемы «скважина – штанговая колонна – плунжер – столб жидкости – колонна насосно-компрессорных труб – станок-качалка». Управляющим воздействием для системы является изменение закона перемещения полированного штока (точки подвеса штанг (ТПШ)). Возмущающим воздействием является изменение динамического уровня в затрубном пространстве нефтяной скважины, а реакцией системы на управляющее воздействие – изменение длины хода и скорости плунжера, которое вызывает изменение расхода жидкости (1), а также усилия в ТПШ. Имитационная модель штангового глубинного насоса построена на базе математической модели ШГН, описанной в ряде работ [13, 14]. Имитационная модель штангового глубинного насоса представлена на рис. 3.

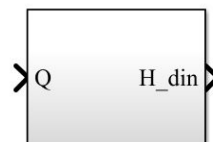


Рис. 2. Имитационная модель «пласт – скважина»: Q – подача ШГН; $H_{дин}$ – динамический уровень жидкости

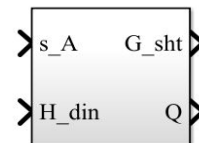


Рис. 3. Имитационная модель штангового глубинного насоса: s_A – положение полированного штока; $H_{дин}$ – динамический уровень жидкости; G_{sht} – усилие, действующее на шток; Q – подача ШГН

Имитационная модель станка-качалки

Имитационная модель станка-качалки (СК) описывает взаимодействие подсистемы «полированный шток – балансир – четырехзвенный механизм – система уравнивания – кривошип – вал электродвигателя». Данная подсистема показывает взаимосвязь между усилием, приложенным к полированному штоку, и моментом сопротивления на валу электродвигателя. При этом управляющим воздействием является изменение угловой скорости вращения вала электродвигателя, возмущающим воздействием – изменение усилия в ТПШ, а реакцией системы на управляющее воздействие – изменение закона перемещения ТПШ и момента сопротивления на валу электродвигателя. Модель разделена на два блока: блок задания закона движения точки подвеса штанг и блок расчета момента сопротивления на валу электродвигателя.

Зачастую для построения имитационной модели ШГН закон движения точки подвеса штанг принимается за гармонический, однако на практике движение этой точки подвеса штанг подчиняется более сложному закону и напрямую зависит от параметров и кинематической схемы используемого станка-качалки. Для устранения данного допущения необходимо ввести закон движения ТПШ при заданном законе движения кривошипа станка-качалки, т.е. привести решение прямой задачи кинематики [15].

На рис. 4 представлена кинематическая схема станка-качалки с двуплечим балансиром. Закон движения точки подвеса штанг (точка А) для данной схемы описывается системой уравнений (2) [16].

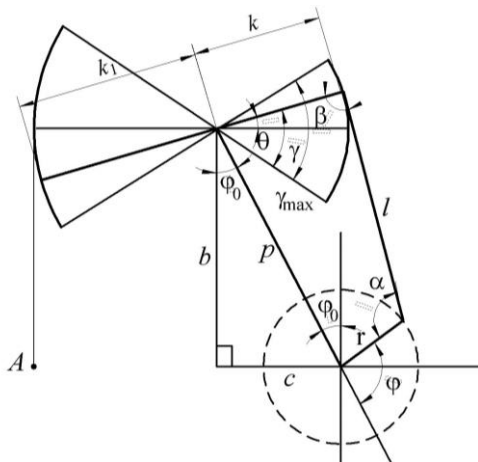


Рис. 4. Кинематическая схема станка-качалки с двуплечим балансиром: k_1 – длина переднего плеча балансира; k – длина заднего плеча балансира; l – длина штанга; p – кратчайшее расстояние между центром качания балансира и центром вращения кривошипа; r – радиус кривошипа; $\varphi_{кр}$ – угол поворота кривошипа относительно направления p ; φ_0 – угол между вертикалью и направлением p ; c – проекция p на горизонтальную плоскость; b – проекция p на вертикальную плоскость; γ – угол поворота заднего плеча балансира относительно p ; α – угол между кривошипом и штангом; β – угол между задним плечом балансира и штангом; θ – угол отклонения балансира от горизонтального положения

$$\begin{cases} s_A(t) = k_1 \left(\arccos \frac{k^2 + p^2 - (l+r)^2}{2kp} - \gamma(t) \right); \\ \varphi_0 = \arctg \frac{c}{b}; \\ \varphi = \pi - \arccos \left(\frac{p^2 - k^2 + (l+r)^2}{2p(l+r)} \right) - \omega_{кр}t; \\ \gamma(t) = \arctg \frac{\sin \varphi(t)}{\frac{p}{r} + \cos \varphi(t)} + \arctg \frac{\sin \beta(t)}{\frac{k}{l} - \cos \beta(t)}; \\ \beta(t) = \arccos \left(\frac{(l^2 - p^2) + (k^2 - r^2)}{2lk} - \frac{pr}{lk} \cos \varphi(t) \right). \end{cases} \quad (2)$$

Для расчета момента сопротивления на валу электродвигателя необходимо произвести динамический анализ станка-качалки для определения крутящего момента на кривошипе. Условно теории динамического анализа балансирных станков качалок можно разделить на элементарную, уточненную и точную. Метод расчета динамики станка-качалки, использующий элементарную теорию, приведен в [17], метод является наиболее простым и справедлив только с учетом следующих допущений:

- точка сочленения штанга и заднего плеча балансира движется по прямой;
- угол отклонения штанга от вертикали принимается равным 0.

Данные допущения справедливы только для аксиальных кинематических схем станков-качалок с длиной балансира много меньше радиуса кривошипа. Следовательно, для построения универсальной модели объекта управления необходимо воспользоваться уточненной теорией. Наибольшее распространение получил метод расчета динамики, описанный в [18], однако, его существенным недостатком является необходимость расчета проекций всех сил, приложенных к СК, на вертикальную и горизонтальную плоскости с последующим итерационным расчетом уравнивающих моментов, что в значительной степени увеличивает сложность разрабатываемой модели.

Для решения поставленной задачи применен метод Н.Е. Жуковского [7, 19]. Суть метода заключается в выводе уравнения баланса сил, приложенных к системе, условно находящейся в равновесии:

$$\sum_{i=1}^n G_i v_i \cos(\vec{G}_i, \vec{v}_i) = 0, \quad (3)$$

где G_i – силы, приложенные к уравновешенной системе; v_i – скорости точек приложения сил; \vec{G}_i, \vec{v}_i – угол между векторами сил и скоростей точек приложения сил.

Схема приложения сил в различных точках СК с двуплечим балансиром представлена на рис. 5.

Момент на валу кривошипа рассчитывается как

$$M_{кр} = G_{ш}r. \quad (4)$$

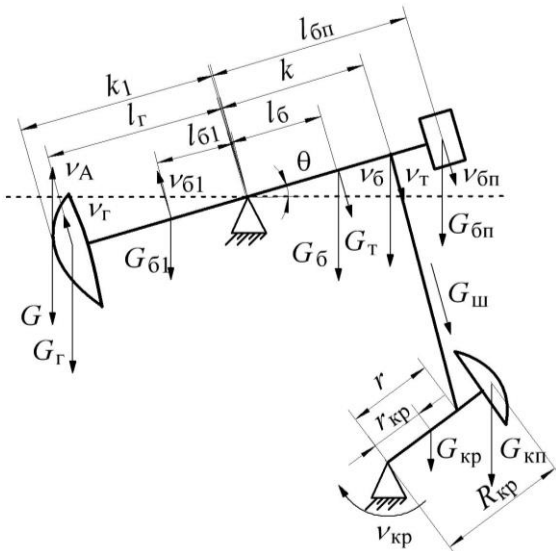


Рис. 5. Схема приложения сил в различных точках СК с двухплечим балансиром: G , $G_{б1}$, $G_{б}$, $G_{т}$, $G_{бп}$, $G_{кр}$, $G_{кп}$ – вес головки, переднего плеча балансира, заднего плеча балансира, траверсы, балансирного противовеса, кривошипа, кривошипного противовеса, соответственно; $l_{г}$, $l_{б1}$, $l_{б}$, $l_{бп}$ – расстояния от оси качания балансира до центров масс головки балансира, переднего плеча балансира, заднего плеча балансира, балансирного противовеса, соответственно; $R_{кр}$, $r_{кр}$ – расстояния от оси вращения кривошипа до центров масс кривошипного противовеса и кривошипа, соответственно

Вал электродвигателя связан с кривошипом СК посредством клиноременной передачи, имеющей передаточный коэффициент i и КПД $\eta_{п}$, следовательно, момент сопротивления на валу электродвигателя M_c , а также полезная мощность двигателя $P_{п}$ определяются как [20]:

$$M_c = \frac{M_{кр}}{i_{п}\eta_{п}}; \tag{5}$$

$$P_{п} = \frac{M_{кр}\omega_{кр}}{\eta_{п}}. \tag{6}$$

Имитационная модель станка-качалки представлена на рис. 6.

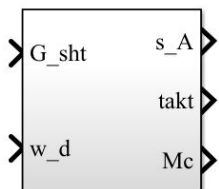


Рис. 6. Имитационная модель станка-качалки: G_{sht} – усилие, действующее на шток; w_d – угловая скорость вращения вала двигателя; s_A – положение полированного штока; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя

Имитационная модель асинхронного электродвигателя

Для вычисления потребляемой приводом мощности необходимо привести математическое описание подсистемы «редуктор – электродвигатель – система управления». При этом управляющим воз-

действием является изменение частоты управляющего сигнала (частоты фазного напряжения на обмотках статора электродвигателя), возмущающим воздействием – изменение момента сопротивления на валу электродвигателя, реакцией системы на изменение входных воздействий является изменение частоты вращения вала электродвигателя.

Для определения потребляемой электродвигателем мощности в зависимости от изменения момента сопротивления на валу электродвигателя необходимо реализовать его Т-образную схему замещения (рис. 7).

Параметры схемы замещения, такие как X_1 , R_1 , X_{μ} , X_2' , R_2' , рассчитываются по методу, описанному в статье [21].

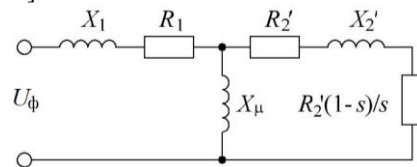


Рис. 7. Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя

Зависимость скольжения s от изменения момента сопротивления M_c определяется по формуле Клосса [22, 23]. Имитационная модель асинхронного электродвигателя представлена на рис. 8.

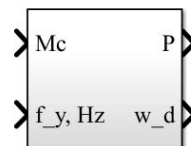


Рис. 8. Имитационная модель асинхронного электродвигателя: ω_d – угловая скорость вращения вала двигателя; f_y – частота управляющего сигнала, задаваемая системой управления; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя; P – мгновенное значение мощности

Результаты

Приведенные зависимости и методы легли в основу имитационной модели, описывающей УШГН (рис. 9). Реализация производилась с использованием среды программирования MATLAB/Simulink.

Представленная модель применима как для разработки алгоритма управления подачей УШГН на основе обработки сигнала ваттметрограммы, так и для разработки методов диагностики неисправностей штангового глубинного насоса.

Для разработки алгоритма управления необходимо рассмотреть поведение системы при неизменных параметрах объекта и системы управления при несоответствии скоростей притока и откачивания скважинной жидкости.

На рис. 10 представлены графики зависимостей различных параметров от времени, полученные с помощью разработанной модели.

На рис. 10, а начальное положение динамического уровня соответствует статическому уровню, давление на забое равно пластовому, соответственно скорость притока равна нулю, система находится в равновесии.

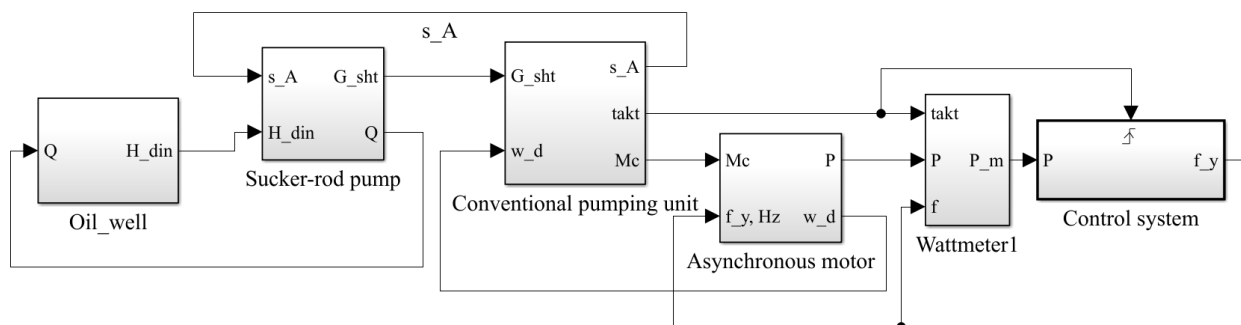


Рис. 9. Имитационная модель УШГН, включающая следующие узлы УШГН: скважина и пласт (Oil Well), штанговый глубинный насос (Sucker-rod pump), станок-качалка (Conventional pumping unit), электродвигатель (Asynchronous Motor)

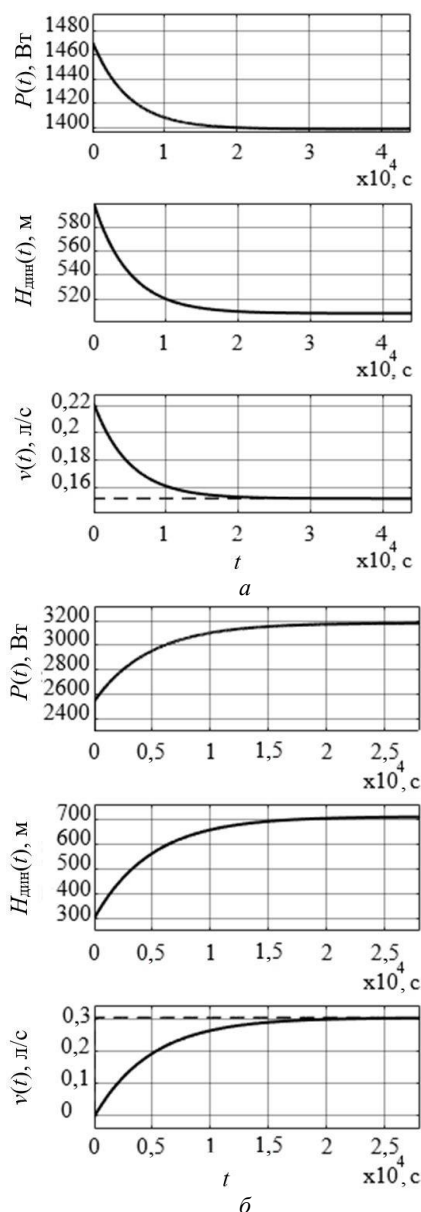


Рис. 10. Графики зависимости средней за период качания балансира потребляемой приводом УШГН мощности $P(t)$, динамического уровня $H_{дин}(t)$ и скоростей v притока (сплошная линия) и откачивания скважинной жидкости

При откачивании жидкости с некоторой постоянной скоростью происходит снижение забойного давления вследствие увеличения динамического

уровня жидкости, что ведет к росту скорости притока. Графики зависимостей, приведенные на рис. 10, б, иллюстрируют ситуацию, в которой скорость откачивания скважинной жидкости несколько меньше скорости притока, что ведет к уменьшению динамического уровня и снижению скорости притока и дебита скважины.

Приведенные зависимости подтверждают выводы, представленные в работе [24], что подсистема «пласт – скважина – штанговый глубинный насос» является самоорганизующейся, поскольку при несоответствии скорости притока скорости откачивания происходит изменение динамического уровня, приводящее к изменению забойного давления и скорости притока. Спустя некоторое время происходит естественное выравнивание этих скоростей. Однако новое установившееся значение динамического уровня может отличаться от оптимального, что чревато негативными последствиями. При уменьшении динамического уровня уменьшается значение перепада давления Δp , что приводит к снижению притока жидкости и искусственному занижению дебита скважины. Увеличение динамического уровня приводит к соответствующему снижению давления на приеме глубинного насоса, что приводит к увеличению нагрузок на полированный шток. Также при значительном превышении скорости откачивания скорости притока может произойти снижение уровня жидкости до приема насоса, что приведет к срыву подачи [25]. Приведенные зависимости также показывают, что значение средней за период потребляемой мощности отражает изменение динамического уровня. Разрабатываемые алгоритмы управления УШГН должны учитывать данные особенности поведения системы при выводе скважины на режим.

Разработанная имитационная модель также позволяет производить исследования влияния различных неисправностей ШГН на форму ваттметрограммы, в частности: обрыв и отворот штанг, заклинивание плунжера в верхнем и нижнем положении, удар о приемный клапан, удар о верхнюю гайку, попадание газа в цилиндр насоса, утечка в приемном клапане, утечка в нагнетательном клапане, запарафинивание.

Метод ваттметрирования для диагностики неисправностей в отличие от динамометрирования в настоящее время является недостаточно изученным,

поэтому для изучения характерных признаков возникновения той или иной неисправности на ваттметрограмме необходимо строить вспомогательную динамограмму. В качестве примера на приведенных графиках отражены формы ваттметрограммы (рис. 11, а) и динамограммы (рис. 11, б), соответствующие нормальной работе ШГН (пунктирная линия), а также утечке в нагнетательном клапане (сплошная линия).

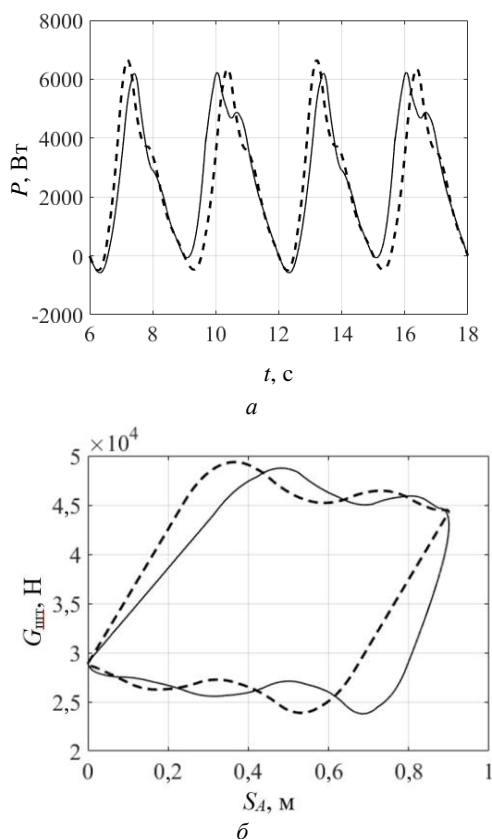


Рис. 11. Динамограммы (а) и ваттметрограммы (б), полученные с помощью имитационной модели

Заключение

Разработанная имитационная модель подробно описывает узлы установки штангового глубинного насоса для добычи нефти и позволяет исследовать систему при различных параметрах используемого оборудования и скважины. Модель обеспечивает логику работы замкнутой системы, что необходимо для разработки алгоритмов управления на основании исследования полученных зависимостей. Также модель позволяет имитировать различные неисправности погружного оборудования с целью исследования влияния этих неисправностей на форму ваттметрограммы для разработки алгоритмов диагностики. Все перечисленные возможности модели необходимы для проведения исследований УШГН с целью разработки универсальных бездатчиковых систем управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям разви-

тия научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Соглашение № 14.574.21.0157 (уникальный идентификатор RFMEFI57417X0157).

Литература

1. Ивановский В.Н. Повышение интереса к штанговым насосным установкам – в чем причина? // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 8. – С. 48–49.
2. Исмагулова А. И. Системы автоматического регулирования динамического уровня жидкости в скважине в штанговых глубинно-насосных установках // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 22, № 4. – С. 1–6.
3. Контроллеры автоматизации установок штанговых глубинных насосов / М.И. Хакимьянов, В.Д. Ковшов, А.М. Чикишев, Н.С. Максимов, А.И. Почуев // Нефтегазовое дело. – 2007. – № 1. – С. 1–20.
4. Хакимьянов М. И. Современные станции управления скважинными штанговыми глубинно-насосными установками // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12, № 1. – С. 78–85.
5. Сакаев А.Ф. Контроль и диагностика состояния оборудования штанговых глубинных насосов косвенным методом по ваттметрограмме с использованием искусственных нейронных сетей // Записки горного института. – 2007. – Т. 173. – С. 101–104.
6. Сагдатуллин А.М. Разработка математической модели системы автоматизации электропривода штанговой скважинной насосной установки // Территория Нефтегаз. – 2014. – № 4. – С. 28–35.
7. Сакаев А.Ф. Системы и алгоритмы энергосберегающего управления частотно-регулируемыми электроприводами штанговых скважинных насосных установок: дисс. ... канд. техн. наук. – СПб. гос. горный институт им. Г.В. Плеханова, 2009. – 148 с.
8. Хакимьянов М.И. Управление электроприводами скважинных насосных установок. – М.: Инфра-Инженерия, 2017 – 138 с.
9. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
10. Математическое моделирование эксплуатационной скважины в процессе оптимизации нефтедобычи / С.Г. Воронин, Д.А. Курносков, М.И. Корабельников, Д.В. Коробатов, В.В. Запунный // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Энергетика. – 2005. – №9 (49). – С. 70–74.
11. Миклина О.А. Оценка притока нефти в гидродинамически совершенную скважину: метод. указания / О.А. Миклина, А.А. Мордвинов. – Ухта: УГТУ, 2016. – 22 с.
12. Садов В.Б. Оценка параметров нефтедобычи и управление насосной установкой с использованием динамограмм // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 33–41.
13. Топольников А.С. Моделирование динамических нагрузок на полированный шток станка-качалки при неисправностях в работе штангового насоса // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова, УНЦ РАН. – 2014. – Т. 10. – С. 95–101.
14. Уразаков К.Р. Математическая модель штанговой установки с эжектором для откачки газа из затрубного пространства / К.Р. Уразаков, В.А. Молчанова, А.С. Топольников // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. – 2007. – № 6. – С. 54–60.
15. Вирновский А.С. Теория и практика глубинно-насосной добычи нефти: Избранные труды. – М.: Недра, 1971. – 183 с.
16. Чичеров Л.Г. Глубинно-насосная добыча нефти / Л.Г. Чичеров, Н.Д. Дрэготеску. – М.: Недра, 1966. – 417 с.

17. Ивановский В.Н. Скажинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

18. Чичеров Л.Г. Расчёт и конструирование нефтепромышленного оборудования.: учеб. пособие для вузов / Л.Г. Чичеров, Г.В. Молчанов, А.М. Рабинович и др. – М.: Недра, 1987. – 422 с.

19. Коренько А.С. Теория механизмов и машин: учеб. – К.: Высш. шк., 1976. – 438 с.

20. Молчанов А.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы / А.Г. Молчанов, В.Л. Чичеров. – М.: Недра, 1976. – 308 с.

21. Мощинский Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Киракин // *Электричество*. – 1998. – Т. 34, № 98. – С. 38–42.

22. Лиходедов А.Д. Построение механической характеристики асинхронного двигателя и её апробация // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 5. – С. 99.

23. Соловьев В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы привода». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44 с.

24. Садов В.Б. К вопросу автоматического управления приводом глубинного штангового насоса // *Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 46–53.

25. Латыпов Б.М. Установка штангового винтового насоса для добычи нефти в осложненных условиях // *Нефтегазовое дело* – 2012. – Т. 10, № 1. – С. 13–15.

Торгаева Дарья Сергеевна

Мл. науч. сотр. лаб. цифровых систем управления НИИ космических технологий (НИИ КТ) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7-923-425-70-35
Эл. почта: belial1349@mail.ru

Сухоруков Максим Петрович

Зав. лаб. цифровых систем управления НИИ КТ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 90-01-06
Эл. почта: max_sukhorukov@mail.ru

Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7 (382-2) 51-05-30
Эл. почта: office@tusur.ru

Шняков Юрий Александрович

Д-р техн. наук, директор НИИ КТ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7 (382-2) 90-01-62
Эл. почта: shua@main.tusur.ru

Шалыпина Наталия Андреевна

Инж. лаб. цифровых систем управления
НИИ космических технологий ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7-952-806-37-26
Эл. почта: nat.shalyapina@gmail.com

Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Shurygin Yu.A.,
Shinyakov Yu.A., Shalyapina N.A.

Simulation of a sucker rod pump for oil production

The paper is devoted to the development of a simulation model that describes the installation of a sucker rod pump as a closed-loop system. The development of the model was carried out with the aim of studying the influence of changes in the position of the dynamic level in the well annular and various faults of submersible equipment on the shape of the wattmeter card for the development of control algorithms and diagnostics of SRPU.

Keywords: simulation model, sucker rod pump, electromechanical drive, control system, wattmeter program, dynamic fluid level.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-71-78

References

1. Ivanovsky V.N. *Povyshenie interesa k shtangovym nasosnym ustanovkam-v chem prichina?* [Increased interest in sucker rod pump installations – what is the reason?]. *Oil and Gas Territory*, 2013, no. 8, pp. 48–49 (in Russ.).

2. Ismagulova A.I. [Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise]. *Engineering journal of Don*, 2012, vol. 22, no. 4-1, pp. 87–92 (in Russ.).

3. Hakim'janov M.I., Kovshov V.D., Chikishev A.M., Maksi-mov N.S., Pochuev A.I. *Kontrollery avtomatizacii ustanovok shtangovyh glubinyh nasosov* [Controllers for automation of sucker rod pump installations]. *Petroleum engineering*, 2007, no. 1, pp. 1–20 (in Russ.).

4. Hakimyanov M.I. [Modern control stations for sucker rod pump units]. *Petroleum engineering*, 2014, vol. 12, no. 1, pp. 78–85 (in Russ.).

5. Sakaev A.F. *Kontrol' i diagnostika sostojanija oborudovaniya shtangovyh glubinyh nasosov kosvnyim metodom po vattmetrogramme s ispol'zovaniem iskusstvennyh nejronnyh setej* [Monitoring and diagnostics of the state of equipment of deep-well sucker-rod pumps by the indirect method according to the wattmeter program using artificial neural networks]. *Journal of Mining Institute*, 2007, vol. 173, pp. 101–104 (in Russ.).

6. Sagdatullin A.M. *Razrabotka matematicheskoj modeli sistemy avtomatizacii jelektroprivoda shtangovoj skvazhinnoj nasosnoj ustanovki* [Development of a mathematical model of an automation system for an electric drive of a sucker rod pumping unit] // *Oil and Gas Territory*, 2014, no. 4, pp. 28–35 (in Russ.).

7. Sakaev A.F. *Sistemy i algoritmy jenergosberegajushhego upravlenija chastotno-reguliruemymi jelektroprivodami shtangovyh skvazhinnyh nasosnyh ustanovok* [Systems and algorithms for energy-saving control of variable-frequency electric drives of sucker-rod pumping units. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2009, 149 p. (in Russ.).

8. Khakimyanov M.I. *Upravlenie jelektroprivodami skvazhinnyh nasosnyh ustanovok* [Control of electric drives of downhole pumping units]. M., Infra-Inzhenerija, 2017, 138 p. (in Russ.).

9. Shagiev R.G. *Issledovanie skvazhin po KVD* [KVD well research]. M., Nauka, 1998, 304 p.
10. S.G. Voronin, D.A. Kurnosov, M.I. Korabelnikov, D.V. Korobatov, V.V. Zapunny *Matematicheskoe modelirovanie jekspluatacionnoj skvazhiny v processe optimizacii neftedobychi* [Mathematical modeling of production wells in the process of optimizing oil production]. *Vestnik JuUrGU. Serija: Jenergetika*, 2005, no. 9(49), pp. 70–74 (in Russ.).
11. Miklina, O.A. *Ocenka pritoka nefii v gidrodinamicheski sovershennuju skvazhinu* [Estimation of oil inflow into a hydrodynamically perfect well]. Ukhta, USTU, 2016, 22 p. (in Russ.).
12. Sadov V.B. [Parameter estimation of an oil extracting and pump installation control with use of dynamometer cards]. *Bulletin of the South Ural State University: series «Computer technologies, automatic control & radioelectronics»*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 33–41 (in Russ.).
13. Topolnikov A. S. *Modelirovanie dinamicheskikh nagruzok na polirovannyj shtok stanka-kachalki pri neispravnostjah v rabote shtangovogo nasosa* [Modeling of dynamic loads on a polished rod of a pumping unit during malfunctions in the operation of a sucker rod pump]. *Trudy Instituta mehaniki im. RR Mavljutova UNC RAN*, 2014, vol. 10, pp. 95–101 (in Russ.).
14. Urazakov K.R. *Matematicheskaja model' shtangovoj ustanovki s jezhektorom dlja otkachki gaza iz zatrubnogo prostranstva* [Mathematical model of a rod installation with an ejector for pumping gas from the annulus]. *Advanced oil and gas technology*, 2007, no. 6, pp. 54–60 (in Russ.).
15. Virnovsky A.S. *Teorija i praktika glubinno-nasosnoj dobychi nefii. Izbrannye trudy* [Theory and practice of deep pumping oil production: Selected works]. Moscow, Nedra, 1971, 183 p. (in Russ.).
16. Chicherov L.G., Dragotescu N.D. *Glubinno-nasosnaja dobycha nefii* [Deep pump oil production]. Moscow, Nedra, 1966, 417 p. (in Russ.).
17. Ivanovsky V.N. *Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlja dobychi nefii* [Oil Well Pumping Units]. Moscow, GUP Izd-vo «Nef' i gaz» RGU nefii i gaza im. IM Gubkina, 2002, 824 p. (in Russ.).
18. Chicherov L.G., Molchanov G.V., Rabinovich A.M. *Raschjot i konstruirovanie neftepromyslovogo oborudovanija.: Ucheb. Posobie dlja vuzov* [Calculation and design of oilfield equipment.: Textbook. Manual for universities.]. Moscow, Nedra, 1987, 422 p. (in Russ.).
19. Korenyako A. S. *Teorija mehanizmov i mashin: uchebnik* [Theory of mechanisms and machines: a textbook]. K., Vysshaja shkola, 1976, 438 p. (in Russ.).
20. Molchanov A.G., Chicherov. V.L. *Neftepromyslovye mashiny i mehanizmy* [Oilfield machines and mechanisms]. Moscow, Nedra, 1976, 308 p. (in Russ.).
21. Moshchinsky Yu.A., Bespalov V.Ya., Kiryakin A.A. *Opreделение parametrov shemy zameshenija asinhronnoj mashiny po katalognym dannym* [Determination of the parameters of a circuit for replacing an asynchronous machine from catalog data]. *Electricity*, 1998, vol. 34, no. 98. pp. 38–42 (in Russ.).
22. Likhodedov A.D. [Construction of the mechanical characteristic of the asynchronous engine and its approbation]. *Modern problems of science and education*, 2012, no. 5, pp. 99 (in Russ.).
23. Soloviev V. A. *Raschet karakteristik trehfaznogo asinhronnogo dvigatelja: metodicheskie ukazanija k samostojatel'noj rabote studentov po disciplinam «Jeletrotehnika i jelektronika», «Osnovy privoda»* [Calculation of the characteristics of a three-phase asynchronous motor: guidelines for independent work of students in the disciplines «Electrical Engineering and Electronics», «Fundamentals of Drive»]. Moscow, Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2014, 44 p. (in Russ.).
24. Sadov V.B. [To the question of automatic control of the drive sucker rod pump]. *Bulletin of the South Ural State University: series «Computer technologies, automatic control & radioelectronics»*, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 46–53 (in Russ.).
25. Latypov B.M. [Progressing cavity pump for oil production under complicated conditions. *Petroleum Engineering*], 2012, vol. 10, no. 1, pp. 13–15 (in Russ.).

Daria S. Torgaeva

Junior Researcher, Laboratory of Digital Control Systems, Space Technology Research Institute, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7-923-425-70-35
Email: belial1349@mail.ru

Maxim P. Sukhorukov

Head of the Laboratory of Digital Control Systems, Space Technology Research Institute, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 90-01-06
Email: max_sukhorukov@mail.ru

Yury A. Shurygin

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Computer Control and Design Systems, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7 (382-2) 51-05-30
Email: office@tusur.ru

Yuriy A. Shinyakov

Doctor of Engineering Science, Professor, Director of the Scientific Research Institute of Space Technology, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7 (382-2) 90-01-62
Email: shua@main.tusur.ru

Natalia A. Shalyapina

Engineer, Laboratory of Digital Control Systems, Scientific Research Institute of Space Technology TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7-952-806-37-26
Email: nat.shalyapina@gmail.com

УДК 004.94

М.И. Кочергин, Д.С. Торгаева, М.П. Сухоруков, В.М. Дмитриев, Ю.А. Шурыгин

Многоуровневое моделирование физико-технических задач на примере глубинного насоса

Рассматриваются особенности моделирования физико-технических задач, формулируются критерии для их эффективного моделирования в инструментальных средах. Проводится краткий анализ программных средств для моделирования задач исследования сложных динамических объектов (как надкласса физико-технических задач). Описываются положения разработанного подхода для многоуровневого компьютерного моделирования физико-технических задач в рамках формализма метода многоуровневых компонентных цепей. Демонстрируются особенности и возможности данного подхода на примере задачи моделирования усилий на полированном штоке штангового глубинного насоса для добычи нефти.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод моделирования, штанговый глубинный насос.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-79-86

Физико-технические задачи (ФТЗ) представляют собой постановки некоторых проблем из области техники о сложном динамическом объекте, решаемые с применением знаний из специализированных разделов физики. Под сложностью динамического объекта [1] следует понимать: 1) сложность поведения, подразумевающую наличие дискретно-непрерывного (гибридного) [2, 3] поведения – сочетания дискретного поведения с непрерывным (физическим), которое может быть вызвано рядом причин [4]; 2) сложность структуры, подразумевающую наличие составных компонентов (тел), связанных как жесткой, так и упругой связью; 3) переменный, зависящий от времени и режимов состав моделируемых объектов; 4) взаимодействие объектов различной природы (например, техническое устройство с дискретным поведением и физический объект с непрерывным поведением).

Такие особенности ФТЗ предъявляют ряд требований для инструментальных сред моделирования: 1) наличие инструментов для моделирования как непрерывного, так и дискретно-непрерывного поведения объектов; 2) наличие инструментов для отображения геометрических свойств объектов; 3) возможность постепенной детализации модели; 4) наличие готовых блоков (элементов), содержащих модели из предметной области (позволяющих отображать «физические» свойства объектов); 5) возможность разделения моделей объектов и их систем управления.

Применяемые инструменты для моделирования сложных динамических систем в целом и ФТЗ в частности можно разделить на следующие категории [5]: 1) «универсальные» среды моделирования (LabView, Simulink, VisSim, Rand Model Designer [6], ИСМА [7], SimInTech [8]); 2) системы компьютерной математики (Mathcad, Mathematica (Wolfram), Maxima); 3) программы, реализующие численные методы (Excel, языки программирования); 4) узкоспециализированные пакеты, в том числе САПР (например, SolidWorks для решения задач гидравлики).

В работах [9, 10] отмечаются следующие недостатки существующих систем моделирования: 1) отсутствие средств эффективного моделирования событийно управляемых систем; 2) отсутствие удобного языка планирования и проведения вычислительного эксперимента; 3) отсутствие интерфейсов между различными средами моделирования (отсутствие возможности обмена моделями между пакетами); 4) отсутствие стандартизированных компонентов в разных пакетах.

Анализ существующих сред моделирования в соответствии с выделенными особенностями ФТЗ показывает следующее. Инструменты для моделирования дискретно-непрерывного поведения имеются в таких средах, как Simulink, SimInTech, Rand Model Designer, ИСМА, однако имеют ряд недостатков, основной из которых – возможность задания непрерывного поведения модели, дополняющего дискретное, исключительно в символьной форме, что ограничивает исследователя, особенно при структурном моделировании. В библиотеке компонентов LabView имеются компоненты для отображения геометрических свойств объектов, однако они не позволяют охватить весь спектр решаемых задач – блоки предназначены для выполнения геометрических преобразований (вращение координат, перевод в СИ и пр.) и решения базовых геометрических операций (например, расчёт центра тяжести фигуры). Готовые блоки для отображения физических свойств объектов имеются только в Simulink.

Наиболее подходящим средством для моделирования ФТЗ представляется среда моделирования MAPC [11], предусматривающая возможность разделения моделей объектов и их систем управления и содержащая специальные компоненты для моделирования физических, геометрических свойств объектов и их дискретно-непрерывного поведения в ФТЗ. Отделение непрерывной модели объекта от алгоритма его системы управления (сценария вычислительного эксперимента) является наиболее предпочтительным не только с целью обеспечения

наглядности представления схемы модели, но и повышения эффективности её работы.

Многоуровневый подход к представлению компьютерных моделей

СММ МАРС базируется на методе многоуровневых компонентных цепей (ММКЦ) [12] и обладает открытой для изменений библиотекой компонентов. Модели в среде моделирования МАРС строятся на визуальном (графическом) языке.

ММКЦ предполагает декомпозицию компьютерной модели на 3 уровня:

1. Объектный слой (С-слой) [13], на котором описывается непрерывное поведение объекта средствами аналитического моделирования в виде алгебродифференциальных уравнений или в структурно-компонентной форме.

2. Логический (алгоритмический) слой (L-слой) [14], на котором описывается дискретное поведение объекта средствами имитационного моделирования, осуществляется параметризация модели (из баз данных [15], геоинформационных систем [16]), обработка результатов моделирования, автоматизированное документирование результатов моделирования [17] и пр.

3. Визуальный слой (V-слой) [18] – графический интерфейс модели.

Моделирование усилий на штоке штангового глубинного насоса

Одним из примеров физико-технических задач (как задач о техническом – искусственном – объекте, решаемых с помощью знаний из специализированных разделов физики) является задача моделирования усилия на полированном штоке штангового глубинного насоса (ШГН), структурная схема которого представлена на рис. 1 [20].

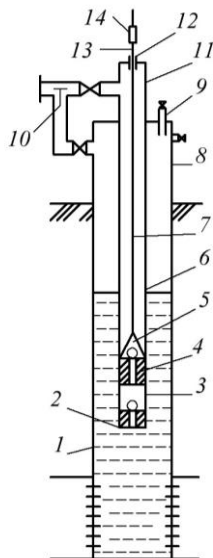


Рис. 1. Структурная схема штангового глубинного насоса.

1 – эксплуатационная колонна; 2 – приемный клапан; 3 – цилиндр насоса; 4 – плунжер; 5 – нагнетательный клапан; 6 – насосно-компрессорные трубы; 7 – насосные штанги; 8 – крестовина; 9 – устьевой патрубков; 10 – обратный клапан для перепуска газа; 11 – тройник; 12 – устьевой сальник; 13 – устьевой шток; 14 – канатная подвеска

Нефтедобывающие установки, оснащенные ШГН, являются наиболее распространенным видом добывающего оборудования. Несмотря на низкую (в сравнении с электроцентробежными насосами) производительность, данные установки нашли широкое применение при добыче из низкодебитных скважин и скважин с различными осложнениями в добыче, такими как высокая обводненность, пескопроявление, высокая вязкость или температура скважинной жидкости, наличие ароматических углеводородов, соле- и парафинообразование, т.е. в тех случаях, когда применение центробежных насосов становится неэффективным [21]. Для определения оптимальной скорости откачивания скважинной жидкости, оптимального закона движения полированного штока, выявления различных неисправностей ШГН и пр. наиболее простым подходом является создание и исследование его математической модели.

Обычно при моделировании ШГН представляется в виде системы последовательно соединенных элементов: плунжерной пары, колонны штанг, штока. Возвратно-поступательное перемещение колонны штанг описывается дифференциальным уравнением продольных колебаний однородного стержня. При этом заданными граничными условиями являются значения перемещений полированного штока и плунжера, а также усилий, приложенных в этих точках [22].

Охарактеризуем формальный портрет [23] рассматриваемой задачи. Основным моделируемым процессом является возвратно-поступательное движение колонны штанг, поэтому в качестве основных взаимодействующих объектов выделим полированный шток (источник движения), плунжер (движущееся тело), насосные штанги (растяжимое тело). Будем считать полированный шток источником скорости в моделируемой системе, рассчитывая его перемещение $S(t)$ по некоторому гармоническому закону. Поставим данному объекту в соответствие компонент «Источник скорости» (рис. 2), математическая модель которого имеет вид

$$B_1 \cdot V_p = S(t), \quad (1)$$

где B_1 – некоторый коэффициент (константа или функциональный параметр), V_p – потенциальная переменная (в нашем случае – скорость), $S(t)$ – некоторая функциональная зависимость.

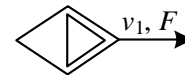


Рис. 2. Компонент «Источник скорости»

Для моделирования движения тел в ММКЦ используются так называемые модели твердых тел (характеризующихся постоянной формой, размерами, массой, моментами инерции), содержащие в себе законы кинематики и динамики движения. Однако в рассматриваемом случае (движение по одной координате) участие тел в модели сводится к инерционному звену – точке, обладающей массой. Будем рассматривать насосные штанги и плунжер в каче-

стве таких объектов, учитывая такие их параметры, как площадь сечения и плотность материала. Математическая модель инерционного звена (рис. 3) имеет вид

$$A_1 \cdot \frac{dV_p}{dt} + B_2 \cdot V_f = 0, \quad (2),$$

где V_f – потоковая переменная (сумма сил F , воздействующих на тело); V_p – потенциальная переменная (скорость тела V); A_1 – параметр модели (масса тела m); B_2 – параметр модели (здесь равен 1); t – время.

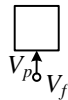


Рис. 3. Компонент «Инерционное звено»

Деформация (растяжение и сжатие) штанг во время их движения может быть смоделирована посредством компонентов типа «Пружина» (рис. 4), имеющими (как и остальные рассматриваемые компоненты) 2 элементарные связи с потенциальными переменными v_1, v_2 (скорости) и потоковой переменной F (сила). Типовая математическая модель компонента имеет вид:

$$\frac{dF}{dt} = k \cdot (v_1 - v_2), \quad (3),$$

в которой коэффициент k может быть как постоянным, так и функциональным параметром. Величину растяжения штанг в таком случае можно рассчитать, исходя из разницы значений скоростей v_1 и v_2 на узлах компонента.



Рис. 4. Компонент «Пружина»

Силы трения, воздействующие при совершении движения на шток, штанги и плунжер, могут быть смоделированы с помощью компонента «Демпфер» (рис. 5). Математическая модель этого компонента имеет вид:

$$F = R \cdot (v_1 - v_2), \quad (4),$$

где коэффициент R аналогичным образом может представлять собой константу или функциональный параметр.

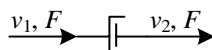


Рис. 5. Компонент «Демпфер»

Давление газожидкостной смеси на плунжер может быть смоделировано с помощью компонента «Источник потоковой переменной», аналогичного «Источник скорости» и имеющего математическую модель:

$$B_2 \cdot V_f = C(t), \quad (5),$$

где B_2 – некоторый коэффициент (константа или функциональный параметр); V_f – потоковая переменная (в нашем случае – сила); $C(t)$ – некоторая функциональная зависимость.

Построим компьютерную модель рассматриваемой задачи из вышеописанных компонентов, указывая на точки приложения сил (объекты их воздействия) путём формирования топологических связей компонентов, опираясь на ранее упомянутые топологические законы.

Многоуровневое моделирование усилий на штоке штангового глубинного насоса в рамках формализма многоуровневого метода компонентных цепей

На V -слое модели (рис. 6) располагается интерфейс для взаимодействия с компьютерной моделью. В качестве варьируемых параметров выступают: 1) длина хода штока, 2) частота откачивания, 3) динамический уровень жидкости. Остальные параметры модели считаются неизменными, так как зависят от конфигурации оборудования и задаются непосредственно в свойствах соответствующих компонентов модели. В качестве измеряемых переменных выступают: 1) нагрузка на плунжер, 2) нагрузка на шток, 3) величина потери хода плунжера при сжатии и растяжении штанг, 4) скорость хода плунжера. Все компоненты этого слоя имеют одноимённые отображения на L -слое, что позволяет реализовать механизм обмена данными между слоями по замкнутой итерационной схеме $V-L-C-L-V$.



Рис. 6. Вид модели на V -слое

На L -слое модели (рис. 7) располагаются:

1. Диаграмма состояний (КЦ «начало» – «вниз (шток)» – «вверх (шток)»), характеризующая направление движения плунжера (вниз или вверх), что необходимо для расчёта величины деформации штанг и сил трения по отличающимся выражениям при движении вниз и вверх, а также для реализации эффекта «запаздывания» плунжера при движении «за» штангами. Диаграммы состояний представляют собой концептуальную модель объекта в виде конечного автомата, характеризующую поведение объекта в форме последовательности его состояний, сменяющих друг друга при выполнении определённых условий [24]. В данной задаче диаграммы состояний дополняют непрерывное поведение системы, описываемое на C -слое, дискретным поведением, тем самым формируя гибридное поведение [25].

Схема работы диаграмм состояний в СММ MAPS следующая: при получении значения true на вход Start компонент начинает передавать значения, подаваемые на вход in через выход out, и продолжает до тех пор, пока не станет истинным вложенное в него условие (математическое выражение), после чего прекращает свою работу, передав значение true на выход End.

2. КЦ, осуществляющая параметрирование основных компонентов модели – «Плунжер», «Штанги», «Трение», «Деформация», «Давление смеси», которые имеют одноимённые отображения на C-слое. Значения переменных на этом слое передаются последовательно от компонента к компоненту (пройдя при необходимости заложенные в компоненты преобразования). После того как завершается инициализация всех переменных (передача значений на C-слой), начинается вычислительный эксперимент на C-слое (решение систем алгебродифференциальных уравнений вычислительным ядром), результаты которого на каждой итерации работы модели возвращаются обратно на L-слой и при необходимости отображаются пользователю на V-слое через компоненты-приёмники (графики и компоненты вида «Цифровое табло»).

Значения параметров модели, принятых за константу (например, площадь сечения штанг, плотность материала штанг и пр.), задаются на данном слое через свойства соответствующих компонентов.

На C-слое (рис. 8) располагается модель непрерывного поведения моделируемой системы (визуально соответствующая виду моделируемого объекта «шток – штанги – плунжер») в виде КЦ, состоящей из следующих компонентов: 1) «плунжер», «штанги» – компоненты, представляющие собой модели инерционных звеньев (тел), осуществляющие возвратно-поступательное движение; 2) «ис-

точник» – компонент, представляющий собой модель штока (источника скорости); 3) «трение» – компонент, содержащий систему уравнений для расчёта величины силы трения плунжера при движении вниз и вверх; 4) «деформация» (упругость) – компонент для расчёта деформации штанг при ходе вниз и вверх; 5) «нагрузка» – компонент для расчёта нагрузки газожидкостной смеси на плунжер; 6) измерители потенциальных переменных V_n , передающие значения на одноимённые отображения на L-слое; 7) интеграторы IN, используемые для расчёта положения штока и плунжера.

Каждый компонент (за исключением измерителей и интеграторов) содержит в себе систему алгебро-дифференциальных уравнений, которая решается на каждой итерации. Рассчитанные скорости плунжера и штока передаются на L-слой через компоненты-измерители, значения других переменных передаются на выходы соответствующих компонентов по ходу решения. Топологические связи компонентов определяют порядок их опроса и, как следствие, порядок решения системы уравнений (которая решается по завершении опроса).

Использование компонентов-интеграторов на этом C-слое позволяет перейти от базисных переменных – силы F и скорости v – к работе силы и перемещению. Аналогичным образом могут использоваться компоненты-дифференциаторы. Для измерения значений потоковых переменных используются соответствующие измерители V_b . На этом слое также возможно моделирование движения многофазных потоков (например, нефть/газ) через компоненты типа «насос», «труба» и пр. за счёт использования неоднородных векторных связей, содержащих несколько пар дуальных переменных (потенциальную и потоковую).

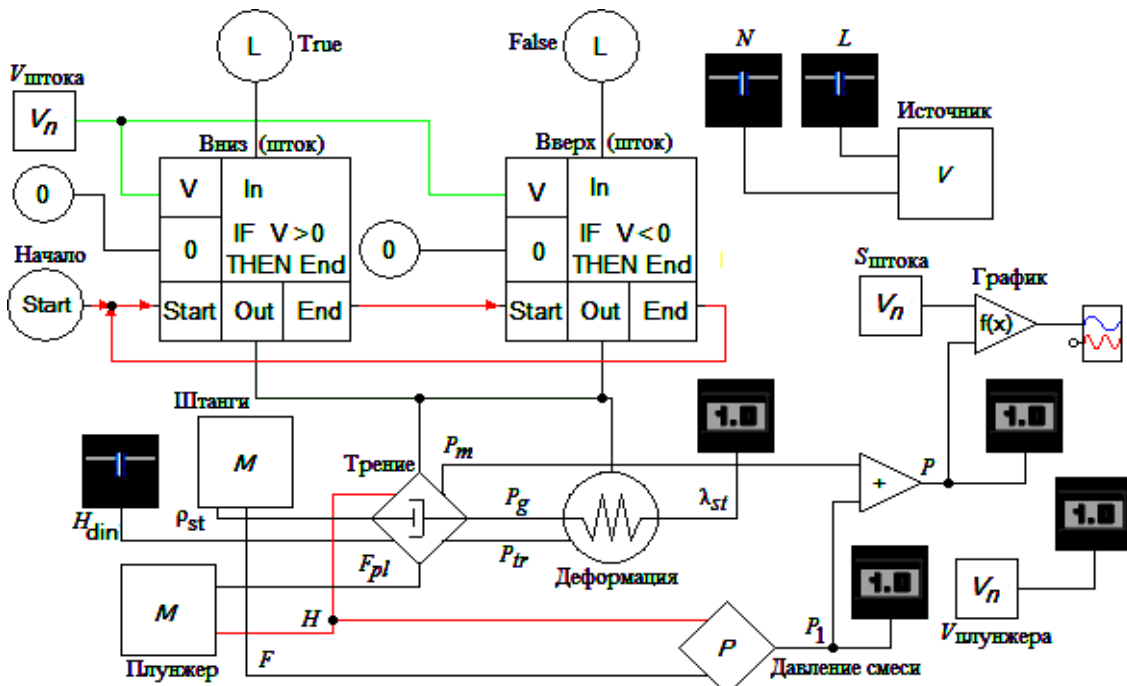


Рис. 7. Вид модели на L-слое

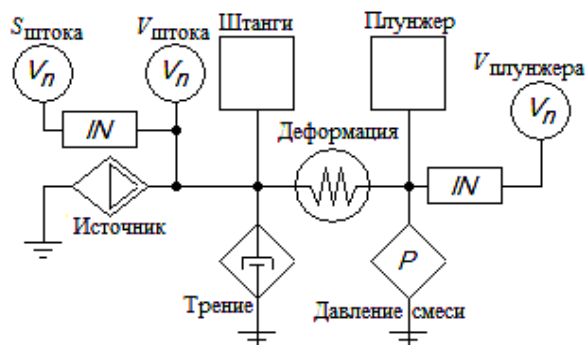
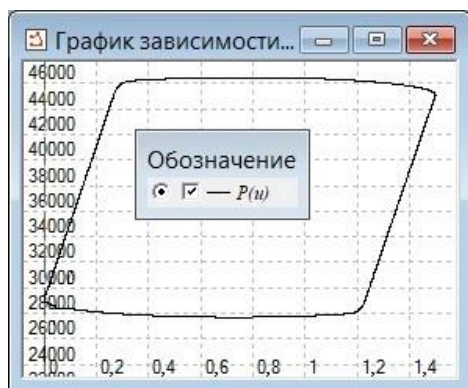


Рис. 8. Вид модели на C-слое

Результатом работы построенной модели является динамограмма $P(u)$ – зависимость усилия, приложенного к штоку, от его перемещения (рис. 9), отражающая состояние погружного оборудования и используемая для его диагностики [26]. Левый нижний угол динамограммы $P(u)$ соответствует крайнему нижнему положению полированного штока, когда плунжер останавливается и закрывается нагнетательный клапан, нагрузка на полированный шток равна весу штанг в жидкости. В следующий момент полированный шток начинает движение вверх, однако плунжер остается неподвижным до тех пор, пока штанги не получают полного растяжения от веса столба жидкости над плунжером и сил трения.

Рис. 9. График зависимости нагрузки в точке подвеса P, H штанг от перемещения этой точки $u, м$

Величина растяжения штанг прямо пропорциональна воспринятой нагрузке, поэтому усилия на штоке нарастают постепенно, положение штока, соответствующее полному растяжению штанг и открытию приемного клапана, соответствует левому верхнему углу $P(u)$. При дальнейшем движении полированного штока вверх нагнетательный клапан закрыт, приемный клапан открыт, жидкость из скважины заполняет пространство под плунжером, нагрузка на полированный шток равна нагрузке от веса столба жидкости, веса штанг в жидкости и сил трения. Правый верхний угол динамограммы соответствует крайнему верхнему положению полированного штока. Далее начинается его движение вниз, приемный клапан закрывается, однако плунжер не может опуститься, поскольку под ним находится практически несжимаемая жидкость, нагнетатель-

ный клапан остается закрытым до тех пор, пока нагрузка со штанг не передается насосно-компрессорным трубам, при этом длина штанг сократится.

Правый нижний угол динамограммы соответствует положению полированного штока, при котором штанги получили максимальное сокращение, и открылся нагнетательный клапан. При движении плунжера вниз приемный клапан закрыт, нагнетательный клапан открыт, нагрузка на полированный шток соответствует нагрузке от веса штанг в жидкости и сил трения. Шток опускается до своего крайнего нижнего положения, нагнетательный клапан закрывается, и цикл повторяется вновь [27, 28].

Заключение

ФТЗ, имеющие широкое распространение в сфере исследовательской, функционально-проектной и образовательной деятельности, обладают рядом особенностей (вызванных в первую очередь сложностью моделируемых в них объектов), что снижает их эффективность моделирования классическими средствами. Описанный в данной работе подход позволяет создавать модель из готовых параметризуемых блоков, отделяя при этом модель непрерывного поведения объекта (представляемую как в блочно-символьном виде, так и в компонентном) от модели (алгоритма) его управления (реализуемого различными средствами, в том числе с помощью диаграмм состояний). Использование готовых блоков при этом не снижает универсальность среды за счёт возможности их гибкой настройки, а также открытости самой библиотеки компонентов. Разделение переменных на дуальную пару (потенциальная и потоковая) и возможность организации между компонентами неоднородных векторных связей позволяет моделировать многофазные энергетические и информационные потоки.

Одним из примеров ФТЗ является рассмотренная в данной работе задача моделирования усилия на полированном штоке ШГН. Она характеризуется как структурной, так и поведенческой сложностью, которые нашли отражение в её многоуровневой компьютерной модели. Проведённая формализация задачи позволила декомпозировать её на 3 уровня: 1) непрерывная модель движения тел при воздействии сил трения и растяжения, учитывающая структурную сложность; 2) дискретная модель движения, разделённая на такты, учитывающая поведенческую сложность; 3) визуальное представление работы модели. Такое разделение позволит быстро проводить дальнейшее развитие и уточнение этой модели: например, учёт внештатных режимов работы или неисправностей оборудования – в таком случае КЦ L-слоя (в виде диаграммы состояний) будет управлять переключениями режимов работы оборудования, модели которых представляются в виде подцепей на C-слое и «активируются» и параметрируются управляющими сигналами с L-слоя. Реализация данной задачи была произведена с применением стандартных компонентов одномерной механики («источник скорости», «пружина», «демпфер»)

с их корректировкой и параметрированием, что подтверждает тезис об универсальности разрабатываемого подхода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Соглашение № 14.574.21.0157 (уникальный идентификатор RFMEFI57417X0157).

Литература

1. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 239 с.
2. Бессонов А.В. Компьютерное моделирование пространственно-временных гибридных систем // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 3-1(61). – С. 123–129.
3. Hybrid systems. Preliminary comparative analysis of Modelica and Model Vision Language / Yu.B. Kolesov, Yu.B. Senichenkov, A. Urquia, C. Martin-Villalba // Университетский научный журнал. – 2014. – № 8. – С. 102–111.
4. Шорников Ю. В. Спецификация и инструментальный анализ гибридных систем / Ю.В. Шорников, А.В. Бессонов, Д.Н. Достовалов // Научный вестник Новосибир. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 4 (61). – С. 101–117.
5. Кочергин М.И. Обзор инструментов для компьютерного моделирования физических процессов // Научная сессия ТУСУР–2017: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвящённой 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 4. – С. 96–99.
6. Senichenkov Yu.B. Rand Model Designer in manufacturing applications / Yu.B. Senichenkov, Yu.B. Kolesov // Университетский научный журнал. – 2014. – № 8. – С. 112–123.
7. Shornikov Yu.V. Modeling and simulation of transients in EPS using ISMA / Yu.V. Shornikov, E.A. Popov // Университетский научный журнал. – 2017. – № 30. – С. 30–38.
8. Хабаров С.П. Использование SimInTech для анализа систем автоматического управления // Информационные системы и технологии: теория и практика. – СПб.: СПбГЛТУ, 2019. – С. 106–116.
9. Инихов Д.Б. Пакеты моделирования в образовании: современная ситуация и нерешенные проблемы / Д.Б. Инихов, Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2012. – № 6. – С. 44–55.
10. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование в среде Rand Model Designer / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков // Неделя науки СПбПУ: матер. научного форума с междунар. участием. Междисциплинарные секции и пленарные заседания институтов. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2015. – С. 18–25.
11. Дмитриев В.М. Среда многоуровневого компьютерного моделирования химико-технологических систем / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа. – Томск: Изд-во НИ ТГУ, 2017. – 332 с.
12. Ганджа Т.В. Развитие метода компонентных цепей для реализации комплекса программ моделирования химико-технологических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18. – Томск, 2017. – 457 с.
13. Зайченко Т.Н. Информационное моделирование цифровых устройств в системе MAPC // Вестник Томского гос. пед. ун-та. – 2005. – № 7 (52). – С. 84–90.
14. Synthesis of an automatic control method for major oil pipelines based on inverse dynamics problem concept / A.E. Karelin, A.V. Maystrenko, A.A. Svetlakov, V.M. Dmitriev, T.V. Gandzha, N.V. Aksenova // Petroleum and Coal. – 2018. – Т. 60, № 1. – С. 152–156.
15. Дмитриев В.М. Алгоритм и система поддержки автоматизированного эксперимента в рамках среды многоуровневого компьютерного моделирования / В.М. Дмитриев, С.А. Панов, С.С. Алексеенко // Электронные средства и системы управления. – 2016. – № 1-2. – С. 117–120.
16. Панов С.А. Интеграция среды MAPC с геоинформационной системой с целью автоматизированной параметризации компьютерных моделей / С.А. Панов, Т.Е. Григорьева, А.С. Болденков // Электронные средства и системы управления. – 2018. – № 1-2. – С. 5–8.
17. Панов С.А. Автоматизированное формирование паспортов проектов по разработке новых месторождений нефти и газа / С.А. Панов, Т.Е. Григорьева // Электронные средства и системы управления. – 2017. – № 1-2. – С. 119–122.
18. Компьютерное моделирование визуальных интерфейсов виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, С.А. Панов // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 111–131.
19. Кочергин М.И. Применение интерактивных математических панелей для моделирования физических задач в рамках среды многоуровневого моделирования // Моделирование. Фундаментальные исследования, теория, методы и средства: матер. 17-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 26–27 сент. 2017 г. / Южно-Российский гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 54–59.
20. Вакула Я.В. Нефтегазовые технологии. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2006. – 168 с.
21. Ковшов В.Д. Моделирование динамограммы станка-качалки. Нормальная работа насоса / В.Д. Ковшов, М.Е. Сидоров, С.В. Светлакова // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2. – С. 75–81.
22. Ивановский В. Н. Повышение интереса к штанговым насосным установкам – в чем причина? // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 8. – С. 48–49.
23. Кочергин М.И. Формализация текстовых условий задач по физике / М.И. Кочергин, К.С. Кочергина // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, №1. – С. 65–68.
24. Kochergin M.I. Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 122–125. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-122-125
25. Сениченков Ю.Б. Численное моделирование гибридных систем. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2004. – 206 с.
26. Analysis of methods for measuring the liquid level in the annular space of an oil well / J. Shinyakov, M. Sukhorukov, D. Torgaeva, A. Soldatov, N. Shalyapina, D. Li // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 158.
27. Садов В.Б. Моделирование динамограмм с различными дефектами оборудования нефтяной скважины // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 16–25.
28. Белов И.Г. Исследование работы глубинных насосов динамографами. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 128 с.

Кочергин Максим Игоревич

Ст. преп. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 41-39-15

Эл. почта: max24kochergin@gmail.com

Торгаева Дарья Сергеевна

Мл. науч. сотр. лаб. цифровых систем управления научно-исследовательского института космических технологий (НИИ КТ) ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-923-425-70-35

Эл. почта: belial1349@mail.ru

Сухоруков Максим Петрович

Зав. лаб. НИИ КТ ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-952-88-22-698

Эл. почта: Max_sukhorukov@mail.ru

Дмитриев Вячеслав Михайлович

Д-р техн. наук, профессор каф. КСУП ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 41-39-15

Эл. почта: dmitriewvm@gmail.com

Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. КСУП ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7(382-2) 51-05-30

Эл. почта: office@tusur.ru

Kochergin M.I., Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Dmitriev V.M., Shurygin Yu.A.

Multilevel modeling of physical and technical problems (on the example of the task of modeling forces on the rod of a sucker rod pump)

The article discusses the features of modeling physical and technical problems, formulates criteria for their effective modeling in instrumental environments. A brief analysis of software tools for modeling research problems of complex dynamic objects (as a superclass of physical and technical problems) is carried out. The provisions of the developed approach for multilevel computer modeling of physical and technical problems within the framework of the formalism of the multi-level component circuit method are described. The features and capabilities of this approach are demonstrated by the example of the task of modeling forces on a polished rod of a sucker rod pump for oil production.

Keywords: computer simulation, component circuit method, multi-level modeling, modeling environment, sucker rod pump.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-79-86

References

1. Kolesov Yu.B. *Obektno-orientirovannoe modelirovanie slozhnykh dinamicheskikh sistem* [Object-oriented modeling of complex dynamic systems]. St. Petersburg, Publishing house of SPbSPU, 2004, 239 p.
2. Bessonov A.V. *Komp'yuternoe modelirovanie prostanstvenno-vremennykh gibridnykh sistem* [Computer modeling of spatio-temporal hybrid systems. Control systems and in-

formation technology]. *Control systems and information technology*, 2015, no. 3-1(61), pp. 123–129 (in Russ.).

3. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B., Urquia A., Martin-Villalba C. Hybrid systems. Preliminary comparative analysis of Modelica and Model Vision Language *University Scientific Journal*, 2014, no. 8, pp. 102–111.

4. Shornikov Yu.V., Bessonov A.V., Dostovalov D.N. [Specification and instrumental analysis of hybrid systems]. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State University*, 2015, no. 4 (61), pp. 101–117 (in Russ.).

5. Kochergin M.I. *Obzor instrumentov dlja komp'yuternogo modelirovaniya fizicheskikh processov* [A review of tools for computer modeling of physical processes] Nauchnaja sessija TUSUR–2017: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchjonyh, posvjashhjonnoj 55-letiju TUSURa [Scientific session TUSUR-2017. Materials of the International scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists dedicated to the 55th anniversary of TUSUR], Tomsk: B-Spectr, 2017, Part. 4. pp. 96–99 (in Russ.).

6. Senichenkov Yu.B., Kolesov Yu.B. Rand Model Designer in manufacturing applications. *University Scientific Journal*, 2014, no. 8, pp. 112–123.

7. Shornikov Yu.V., Popov E.A. Modeling and simulation of transients in EPS using ISMA. *University Scientific Journal*, 2017, no. 30, pp. 30–38.

8. Habarov S.P. *Ispol'zovanie SimInTech dlya analiza sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Using SimInTech to analyze automatic control systems] // Informacionnye sistemy i tekhnologii: teoriya i praktika [Information Systems and Technologies: Theory and Practice]. St. Petersburg, Publishing house of LTA, 2019, pp. 106–116 (in Russ.).

9. Inikhov D.B., Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Pakety modelirovaniya v obrazovanii: sovremennaja situacija i nereshennye problemy* [Packages of modeling in education: the current situation and unsolved problems]. *Computer tools in education*, 2012, no. 6, pp. 44–55 (in Russ.).

10. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Obektno-orientirovannoe modelirovanie v srede Rand Model Designer* [Object-Oriented Modeling with Rand Model Designer]. *Nedelja nauki SPbPU: materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem. Mezhdisciplinarnye sekcii i plenarnye zasedaniya institutov* [SPbPU Science Week: Materials of a scientific forum with international participation. Interdisciplinary sections and plenary sessions of institutes]. St. Petersburg, Polytechnic University Publishing House, 2015, pp. 18–25 (in Russ.).

11. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. *Sreda mnogourovnevnogo komp'yuternogo modelirovaniya himiko-tehnologicheskikh sistem* [The environment of multilevel computer modeling of chemical-technological systems], Tomsk, Publishing house of NI TSU, 2017, 332 p.

12. Gandzha T.V. *Razvitie metoda komponentnykh cepej dlja realizacii kompleksa programm modelirovaniya himiko-tehnologicheskikh sistem* [Development of the method of component chains for the implementation of a set of programs for modeling chemical-technological systems. Dr. Diss.], Tomsk, 2017, 457 p.

13. Zaichenko T.N. *Informacionnoe modelirovanie cifrovyykh ustrojstv v sisteme MARS* [Information modeling of digital devices in the MARS system]. *Bulletin of Tomsk State Pedagogical University*, 2005, no. 7 (52), pp. 84–90 (in Russ.).

14. Karelin A.E., Maystrenko A.V., Svetlakov A.A., Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Aksenova N.V. Synthesis of an automatic control method for major oil pipelines based on inverse dynamics problem concept / *Petroleum and Coal*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 152–156 (in Russ.).

15. Dmitriev V.M., Panov S.A., Alekseenko S.S. *Algoritm i sistema podderzhki avtomatizirovannogo eksperimenta v ramkah sredy mnogourovnevnogo komp'yuternogo modelirovaniya* [Algorithm and system for supporting an automated experiment within the framework of a multilevel computer simulation]. *Electronic tools and control systems*, 2018, no. 1-2, pp. 5–8 (in Russ.).
16. Panov S.A., Grigoryeva T.E., Boldenkov A.S. *Integratsiya sredy MARS s geoinformacionnoj sistemoy s cel'ju avtomatizirovannoy parametrizatsii komp'yuternykh modelej* [Integration of the MARS environment with a geographic information system for the purpose of automated parameterization of computer models]. *Electronic tools and control systems*, 2018, no. 1–2, pp. 5–8 (in Russ.).
17. Panov S.A., Grigoryeva T.E. *Avtomatizirovannoe formirovanie pasportov projektov po razrabotke novykh mestorozhdenij nefi i gaza* *Jelektronnye sredstva i sistemy upravleniya* [Automated formation of project passports for the development of new oil and gas fields]. *Electronic tools and control systems*, 2017, no. 1-2, pp. 119–122 (in Russ.).
18. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Panov S.A. *Komp'yuternoe modelirovanie vizual'nykh interfejsov virtual'nykh instrumentov i priborov* [Computer simulation of visual interfaces of virtual instruments and devices]. *Scientific visualization*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 111–131 (in Russ.).
19. Kochergin M.I. *Primenenie interaktivnykh matematicheskikh panelej dlja modelirovaniya fizicheskikh zadach v ramkah sredy mnogourovnevnogo modelirovaniya* [The use of interactive mathematical panels for modeling physical problems within the framework of a multi-level modeling environment]. *Modelirovanie. Fundamental'nye issledovaniya, teorija, metody i sredstva: materialy 17-oj Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Modeling. Basic research, theory, methods and means. Materials of the 17th Intern. scientific-practical conf., Novocheerkassk]*. Novocheerkassk: Lik, 2017, pp. 54–59 (in Russ.).
20. Vakula Y.V. *Neftegazovye tehnologii* [Oil and gas technology]. Almet'yevsk, Almet'yevsk State Oil Institute, 2006, 168 p.
21. Kovshov V.D., Sidorov M.E., Svetlakova S.V. [Simulation of the dynamogram of the sucker rod pump. Normal pump operation]. *Petroleum Engineering*, 2004, vol. 2, pp. 75–81 (in Russ.).
22. Ivanovsky V.N. *Povyshenie interesa k shtangovym nasosnym ustanovkam-v chem prichina?* [Increased interest in sucker rod pump installations – what is the reason?]. *Oil and Gas Territory*, 2013, no. 8, pp. 48–49 (in Russ.).
23. Kochergin M. I., Kochergina K. S. Formalization of text descriptions for physics tasks. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no.1. pp. 65–68 (in Russ.).
24. Kochergin M.I. Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, Vol. 20, no. 4, pp. 122–125. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-122-125
25. Senichenkov Yu.B. *Chislennoe modelirovanie gibridnykh sistem* [Numerical simulation of hybrid systems]. St. Petersburg, Polytechnic University Publishing House, 2004, 206 p.
26. Shinyakov J., Sukhorukov M., Torgaeva D., Soldatov A., Shalyapina N., Li D. Analysis of methods for measuring the liquid level in the annular space of an oil well. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 158, doi: 10.1051/matec-conf/201815801029.
27. Sadov V.B. [Simulation of dynamometer cards with various defects of oil well equipment]. *Bulletin of the South Ural State University: series «Computer technologies, automatic control & radioelectronics»*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 16–25 (in Russ.).
28. Belov I. G. *Issledovanie raboty glubinykh nasosov dinamografami* [Research of the work of deep pumps by dynamographs]. M., Gostoptekhizdat, 1960, p. 128.

Maksim I. Kochergin

Senior lecturer, Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
74, Vershinin str., Tomsk, Russia, 634045
Phone: + 7 (382-2) 51-05-30
Email: maksim.i.kochergin@tusur.ru

Daria S. Torgaeva

Junior Researcher, Laboratory of Digital Control Systems, Space Technology Research Institute, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7-923-425-70-35
Email: belial1349@mail.ru

Maxim P. Sukhorukov

Head, Laboratory of Digital Control Systems, Space Technology Research Institute, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 90-01-06
Email: max_sukhorukov@mail.ru

Vyacheslav M. Dmitriev

Doctor of Engineering Science, Professor, Department of Computer Control and Design Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7(382-2) 51-05-30
Email: office@tusur.ru

Yury A. Shurygin

Doctor of Engineering Science, Professor,
Head of the Department of Computer Control and Design Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7 (382-2) 51-05-30
Email: office@tusur.ru

В.Л. Сергеев, Донг Ван Хоанг

Идентификация диагностических параметров фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин

Рассматривается задача моделирования диагностических параметров для определения моментов времени начала и завершения фильтрационных потоков в процессе проведения гидродинамических исследований горизонтальных скважин по кривой восстановления забойного давления. Приводятся результаты сравнительного анализа предлагаемого и графоаналитического метода выделения фильтрационных потоков по промышленным данным испытаний горизонтальных скважин. В качестве диагностических параметров используются оценки переменных коэффициентов производной забойного давления, полученные методом адаптивной идентификации в процессе проведения гидродинамических исследований скважин.

Ключевые слова: идентификация, диагностические параметры, фильтрационные потоки, горизонтальные скважины, гидродинамические исследования, кривая восстановления давления, дополнительная информация.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-87-92

В связи с тем, что традиционные графоаналитические методы выделения фильтрационных потоков в процессе проведения испытаний горизонтальных скважин в промышленных условиях вызывают значительные трудности, в работе [1] был предложен адаптивный метод диагностики потоков. В основе метода выделения раннего радиального, линейного и позднего радиального потоков использовалась модель логарифмической производной забойного давления (ЛПЗД) вида

$$y(t) = \lg\left(\frac{d\Delta P_3(t)}{d\ln t}\right) = \alpha_1(t) + \alpha_2(t) \lg t \quad (1)$$

с переменными, зависящими от времени, коэффициентами $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$, а в качестве диагностических параметров использовались оценки переменных $y(t)$ и $\alpha_2(t)$, полученные методом адаптивной идентификации в процессе проведения испытаний скважин по измеренным значениям забойного давления.

На рис. 1, для примера, приведен график диагностических параметров, полученных по промышленным данным в процессе испытаний горизонтальной скважины методом адаптивной идентификации [1–8], где линиями 1, 2 изображены фактические $y^*(t)$ и восстановленные $\hat{y}(t) = \alpha_2^*(t) + \alpha_2^*(t) \lg t$ значения ЛПЗД (1) в двойных логарифмических координатах ($y^*(t), y(t)$ – по оси Y ; $\lg t$ – по оси X), а линией (3) – оценки $\alpha_2^*(t)$. На основе диагностических параметров $y^*(t)$ и $\alpha_2^*(t)$ разработаны критерии выделения фильтрационных потоков [1, 9–15]. Так, например, на участке линейного потока фактическая и восстановленная ЛПЗД имеет наклон, равный 0,5, а оценка параметра $\alpha_2^*(t)$ принимает максимальное значение (см. рис. 1).

Следует отметить, что выделение потоков с использованием упомянутых выше диагностических параметров и критериев в процессе испытаний

скважин по мере поступления промышленных данных забойного давления представляет достаточно сложную задачу определения экстремумов и нулевых значений функций в условиях помех.

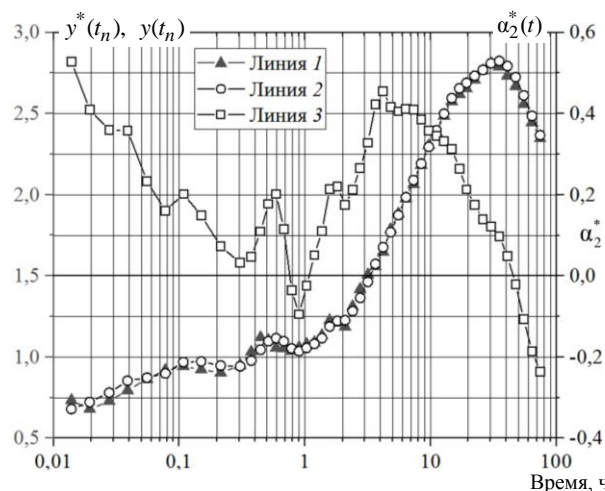


Рис. 1. Фактические (линия 1), восстановленные (линия 2) значения ЛПЗД и оценки параметра $\alpha_2^*(t)$ (линия 3)

В этой связи в данной работе предлагается осуществлять диагностику потоков с использованием математических моделей оценки $\alpha_2^*(t)$, параметры которых связаны с моментами времени начала и завершения фильтрационных потоков, а также их центральных частей. Этот подход обеспечивает дополнительные возможности прогноза времени начала позднего радиального потока, что позволяет планировать время завершения испытаний скважин в процессе их проведения.

Идентификация диагностических параметров фильтрационных потоков

Для решения задачи идентификации диагностического параметра $\alpha_2^*(t)$ [оценки переменного коэффициента $\alpha_2(t)$ (1)] в работе предлагается использовать модели вида

$$\begin{cases} \alpha_2^*(t_n) = \alpha_2(t_n) + \xi(t_n) = \sum_{i=0}^2 c_{i+1} (\ln t_n)^i + \xi(t_n), \\ h_k \bar{\alpha}_2(t_{\min}) = c_1 + \eta, n = \overline{1, n_{\text{pp}}}, 0 < t_n \leq \bar{t}_{n, \text{кpp}}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \alpha_2^*(t_n) = \alpha_2(t_n) + \xi(t_n) = \sum_{i=0}^2 c_{i+1}(t_n) (\ln t_n)^i + \xi(t_n), \\ h_k(t_n) \bar{\alpha}_2(t_{\max}) = c_1(t_n) + \eta(t_n), t_n \geq \bar{t}_{n, \text{кpp}}, n = \overline{1, nk}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{t}_{n, \text{кpp}}$ – экспертная оценка времени завершения раннего радиального потока и начала линейного потока; $\bar{\alpha}_2(t_{\min})$, $\bar{\alpha}_2(t_{\max})$ – экспертные значения диагностического параметра $\alpha_2(t)$; h_k (2) и $h_k(t_n)$ (3) – параметры корректировки экспертных оценок; t_{nk} – момент времени завершения процедуры диагностики потоков; $\xi(t_n)$, $\eta(t_n)$ – случайные величины.

Следует отметить отличительные особенности моделей (2), (3). Модель (2) с постоянными параметрами c_k , $k = \overline{1, 3}$, которые определяются на выделенном диапазоне оценок $\alpha_2^*(t_n)$, $0 < t_n \leq \bar{t}_{n, \text{кpp}}$. Модель (3) с переменными параметрами $c_k(t_n)$, $k = \overline{1, 3}$, которые определяются в процессе проведения испытаний скважин.

Моменты начала и завершения раннего радиального потока согласно (2), (3) определяются по формулам:

$$t_{\text{нpp}}, t_{\text{кpp}} = \exp\left(\frac{-c_2 \pm \sqrt{c_2^2 - 4c_3c_1}}{2c_3}\right). \quad (4)$$

Аналогично (4) имеют место формулы для начала $t_{\text{нл}}$ и завершения $t_{\text{кл}}$ линейного потока, полученные с использованием модели (3).

Моменты времени центральных частей раннего радиального потока t_{\min} , при которых функция $\alpha_2(t_n)$ в (2) принимает минимальное значение, определяется по формуле

$$t_{\min} = \exp(-c_2 / 2c_3). \quad (5)$$

Аналогично (5) определяется момент времени центральной части линейного потока (см. рис. 1), при которых функция $\alpha_2(t_n)$ в (3) принимает максимальное значение.

Преимущество такого подхода к решению задачи выделения фильтрационных потоков заключается в том, что для определения моментов времени начала и завершения раннего радиального и линейного потоков и моментов времени их центральных частей (4), (5), достаточно определить параметры моделей (2), (3).

Приведем решение задачи параметрической идентификации на примере модели (3), которую для удобства представим в матричном виде:

$$\begin{cases} \mathbf{y}_n^* = \mathbf{F}_n(t_n) \mathbf{c}_n + \xi_n, \\ \mathbf{H}(h_{k,n}) \bar{\mathbf{c}} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{c}_n + \eta_n, n = 1, 2, \dots, nk, \end{cases} \quad (6)$$

где $\mathbf{y}_n^* = (\alpha_2^*(t_n), n = \overline{1, nk})^T$ – вектор оценок параметра $\alpha_2^*(t_n)$; $\mathbf{c}_n = (c_{1,n}, c_{2,n}, c_{3,n})$ – вектор переменных параметров модели (3);

$$\mathbf{F}_n^T = \begin{pmatrix} 1, & 1, \dots, 1 \\ x_1, x_2, \dots, x_{nk} \\ x_1^2, x_2^2, \dots, x_{nk}^2 \end{pmatrix} - \text{матрица, в которой } x_n = \ln t_n,$$

$$x_n^2 = (\ln t_n)^2, \quad n = \overline{1, nk}; \quad \mathbf{\Gamma} = \text{diag}(1, 0, 0),$$

$\mathbf{H}(h_0) = \text{diag}(h_{k,n}, 0, 0)$ – диагональные матрицы;

ξ_n, η_n – векторы случайных величин.

Оценки $\mathbf{c}_n^*(\beta_n)$ параметров \mathbf{c}_n модели (6), согласно методу адаптивной идентификации при использовании квадратичных показателей качества

$$\Phi(\alpha_n, \beta_n) = \|\mathbf{y}_n^* - \mathbf{F}_n(t_n) \mathbf{c}_n\|_{\mathbf{W}(h_{3,n})}^2 + h_p \|\mathbf{H}(h_{k,n}) \bar{\mathbf{c}} - \mathbf{\Gamma} \mathbf{c}_n\|^2,$$

могут быть получены, по аналогии с [1–8], путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида:

$$\mathbf{A}_n \mathbf{c}_n^*(\beta_n) = \mathbf{B}_n, \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_n = \mathbf{F}_n^T \mathbf{W}(h_{3,n}) \mathbf{F}_n + h_p \mathbf{I},$$

$$\mathbf{B}_n = \mathbf{F}_n^T \mathbf{W}(h_{3,n}) \mathbf{y}_n^* + h_{p,n} \mathbf{H}(h_{k,n}) \bar{\mathbf{a}},$$

где $\mathbf{W}(h_{3,n}) = \text{diag}(w_n((t_n - t_i) / h_{3,n}), i = \overline{1, nk})$ – диагональная матрица значений весовой функции $w_n(t_n)$ для формирования обучающего интервала обработки; $\beta_n = (h_{3,n}, h_{p,n}, h_{k,n})$ – вектор управляющих параметров забывания $h_{3,n}$, регуляризации $h_{p,n}$ и корректировки $h_{k,n}$ соответственно; \mathbf{I} – единичная матрица; $\|\mathbf{x}\|_{\mathbf{W}}^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{W} \mathbf{x}$ – квадратичная норма вектора \mathbf{x} .

Оценки параметров $c_i, i = \overline{1, 3}$ модели (2) могут быть получены из (7) при $w_n((t_n - t_i) / h_{3,n}) = 1, i = \overline{1, n_{\text{кpp}}}$.

Оценки $\alpha_2^*(t_n)$ (2), (3) диагностического параметра $\alpha_2(t)$ (1) также могут быть получены из (7) при определенных в [1] значениях $\mathbf{A}_n, \mathbf{B}_n$.

Результаты идентификации диагностических параметров для выделения потоков

Результаты параметрической идентификации моделей диагностического параметра (2), (3) и оценок моментов времени начала и завершения фильтрационных потоков в процессе испытаний горизонтальных скважин нефтяного месторождения

приведены на рис. 3–5 и в табл. 2, 3. Исходные данные приведены в табл. 1 и на рис. 2.

На рис. 2 изображены фактические значения забойных давлений $P_3^*(t_i)$, $i = \overline{1, n}$ (2), полученные в процессе проведения испытаний скважин, в полулогарифмических координатах: $P_3^*(t_i)$ – по оси Y , $\lg t_i$ – по оси X .

Т а б л и ц а 1

Исходные данные горизонтальных скважин

Исходные данные	Скважины	
	№ 1	№ 2
1. Радиус скважины r_c , м	0,108	0,108
2. Пористость ϕ	0,13	0,13
3. Эффективная мощность h , м	7,2	4,78
4. Динамическая вязкость μ , сП	3,92	3,92
5. Температура при стандартном условии $T_{ст}$ (+20 °С), К	293	293
6. Пластовая температура $T_{пл}$, К	298	298
7. Сжимаемость системы пласта, c_s , атм ⁻¹	$4,72 \cdot 10^{-4}$	$4,72 \cdot 10^{-4}$
8. Стандартное давление $P_{ст}$, ат	1,033	1,033
9. Дебит скважины до остановки q_0^* , м ³ /сут	163,2	176
10. Экспертная оценка пластового давления, атм	150	150
11. Экспертная оценка эффективной длины горизонтального ствола, L , м	500	500
12. Экспертная оценка времени восстановления забойного давления до пластового \bar{T} , ч	500	500
13. Экспертная оценка латеральной проницаемости, мД	300	350
14. Экспертная оценка времени завершения раннего радиального потока $\bar{t}_{n,кpp}$, ч	2	3
15. Экспертная оценка значения оценок параметра $\alpha_2^*(t_{min})$	-0,1	-0,05
16. Экспертная оценка значения оценок параметра $\alpha_2^*(t_{max})$	0,5	0,45
17. Экспертная оценка проницаемости k_z , мД	12	15
18. Экспертная оценка проницаемости k_y , мД	300	350
19. Наибольшее расстояние между скважиной и границей в направлении оси Z , D_z , м	3,6	2,39

На рис. 3, 4 линией 1 изображены значения оценок диагностического параметра $\alpha_2^*(t_n)$, полученные на основе модели логарифмической производной забойного давления (1) с использованием промысловых данных забойного давления (см. рис. 1) и решения СЛАУ вида (7) [1]. Линией 2 изображены восстановленные на основе моделей (2), (3) значения $\hat{\alpha}_2(t_n)$ диагностического параметра $\alpha_2^*(t_n)$:

$$\alpha_2(t_n) = \begin{cases} \sum_{i=0}^2 c_{i+1}^*(\beta) (\ln t_n)^i & \text{при } 0 < t_n \leq \bar{t}_{n,кpp} \\ \sum_{i=0}^2 c_{i+1}^*(t_n, \beta_n) (\ln t_n)^i & \text{при } t_n \geq \bar{t}_{n,кpp} \end{cases} \quad (8)$$

где оценки $c_{i+1}^*(t_n, \beta_n)$, полученные из решения системы линейных уравнений (7) при постоянных единичных значениях весовой функции $w((t_n - t_{n-i})/h_{3,n})$ в текущем интервале обработки $[t_n - t_{n-4}]$, содержащем 5 значений забойного давления ($h_{3,n} = 5$), ($w_n((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}) = 1$ при $t_n - t_{n-i} \leq h_{3,n} = t_n - t_{n-4}$ и $w_n((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}) = 0$ при $(t_n - t_{n-i}) > h_{3,n}, i = \overline{0, n-1}$). Оценки $c_{i+1}^*(\beta)$ в (8) получены из решения СЛАУ (7) при единичных значениях весовой функции $w((t_n - t_{n-i})/h_{3,n})$ в интервале $0 < t_n \leq \bar{t}_{n,кpp}$.

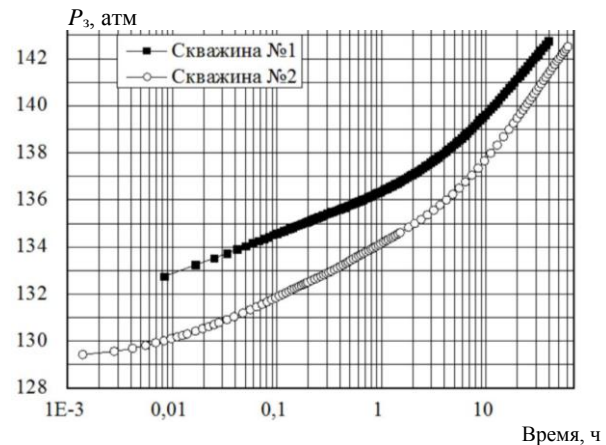


Рис. 2. Фактические значения забойных давлений горизонтальных скважин

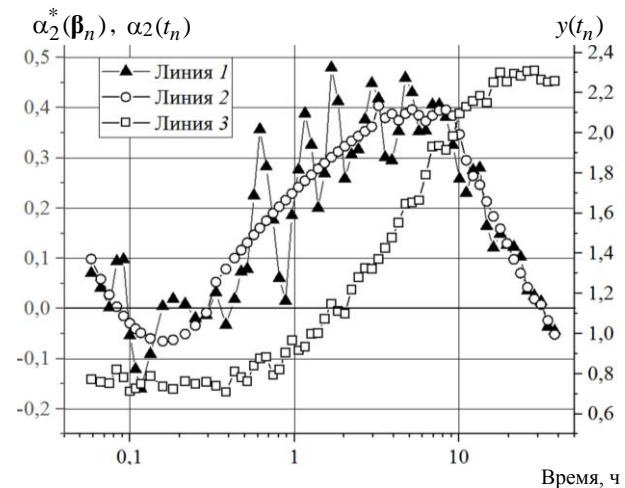


Рис. 3. Значения диагностических параметров $\alpha_2^*(\beta_n)$, $\alpha_2(t_n)$, $y(t_n)$ скважины № 1

Оценки параметров корректировки $h_{к,n}^*$ в векторе управляющих параметров β_n (7) определялись путем решения оптимизационной задачи

$$h_{к,n}^* = \arg \min_{h_{к,n}} \left\| \mathbf{y}_n^* - \mathbf{F}_n \mathbf{c}_n(h_{к,n}) \right\|_{W(h_{3,n})}^2 \quad (9)$$

методом дихотомии [16] при заданном значении параметра регуляризации $h_p = 0,01$.

Для сравнения результатов выделения потоков на рис. 3, 4 линией 3 изображены значения логарифмической производной забойного давления (10):

$$y(t_n) = \alpha_1^*(\beta_n(t_n)) + \alpha_2^*(\beta_n(t_n)) \lg t_n, \quad (10)$$

где оценки $\alpha_1^*(\beta_n(t_n)), \alpha_2^*(\beta_n(t_n))$ получены методом адаптивной идентификации [1] путем решения СЛАУ вида [7].

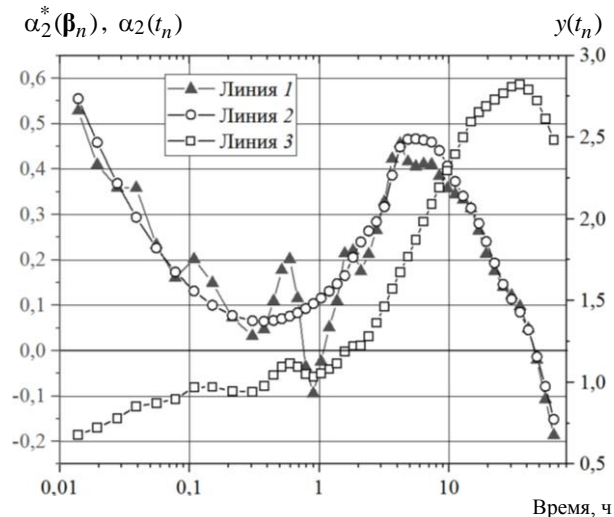


Рис. 4. Значения диагностических параметров $\alpha_2^*(\beta_n), \hat{\alpha}_2(t_n), \hat{y}(t_n)$ скважины № 2

На рис. 5 линией 1 приведены прогнозные значения времени начала позднего радиального потока $t_{нпр}$, полученные по формуле (4) с использованием модели (3). Линия 2 представляет точное значение начала позднего радиального потока, равное 25,5 ч. Из рис. 5 видно, что уже на стадии линейного потока можно достаточно точно определять время начала позднего радиального потока. Относительная ошибка прогноза в данном случае составляет порядка 1–3%.

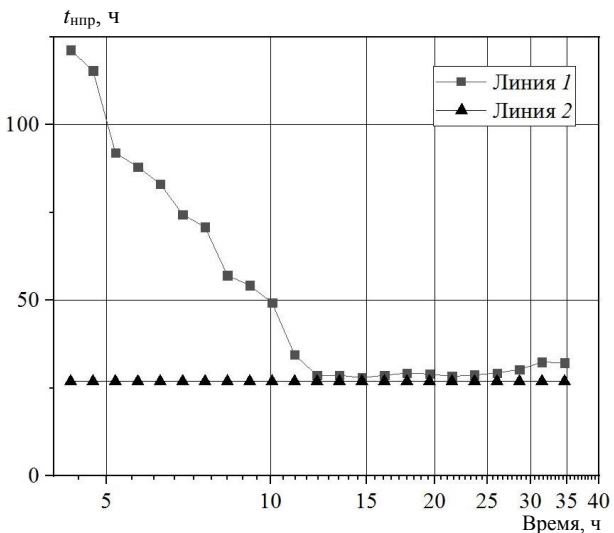


Рис. 5. Прогноз времени начала позднего радиального потока горизонтальной скважины № 1

В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа оценок моментов времени центральных частей раннего радиального и линейного потоков, а также начало позднего радиального потока горизонтальных скважин, полученных предложенным адаптивным методом с идентификацией диагностических параметров (ДП) и традиционным графоаналитическим методом.

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, 4 и в табл. 2, показывает, что рассмотренный адаптивный метод выделения потоков с идентификацией диагностических параметров практически не уступает по точности графоаналитическому методу. Например, для скважины № 1 моменты времени появления линейного потока, полученного адаптивным методом, практически совпадают с моментом времени, полученным на основе графоаналитического метода и составляет 0,62 ч после остановки скважины. Однако, адаптивный метод позволяет не только определять фильтрационные потоки в процессе проведения испытаний скважин, но и прогнозировать наступление позднего радиального потока (см. рис. 5), что важно для планирования времени завершения гидродинамических исследований и сокращения времени простоя скважин.

Таблица 2

Результаты диагностики фильтрационных потоков горизонтальных скважин

№ скважины	Метод диагностики потоков	Время начала потоков, ч		
		Ранний радиальный поток	Линейный поток	Поздний радиальный поток
1	Графоаналитический	0,15	0,65	25,5
	Адаптивный с идентификацией ДП	0,12	0,62	25,1
2	Графоаналитический	0,21	1,02	26,5
	Адаптивный с идентификацией ДП	0,22	1,2	28,6

Выводы

Предложены модели и алгоритмы адаптивной идентификации диагностических параметров в процессе проведения гидродинамических исследований горизонтальных скважин, на основе которых получены аналитические выражения для оценок моментов времени начала и завершения фильтрационных потоков и их центральных частей.

По результатам испытаний двух скважин с горизонтальным окончанием нефтяного месторождения показано, что разработанные модели и алгоритмы диагностики фильтрационных потоков с идентификацией диагностического параметра не уступают по точности графоаналитическому методу выделения потоков и позволяют:

- определять моменты времени фильтрационных потоков в процессе проведения гидродинамических исследований горизонтальных скважин;
- прогнозировать время начала позднего радиального потока.

Литература

1. Сергеев В.Л. Модели и алгоритмы адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков в процессе испытаний горизонтальных скважин / В.Л. Сергеев, Донг Ван Хоанг, Д.Э. Хагай // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 90–95.
2. Романова Е.В. Адаптивная идентификация кривой восстановления давления горизонтальных скважин с диагностикой потоков / Е.В. Романова, В.Л. Сергеев // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2013. – Т. 323, № 5. – С. 20–25.
3. Sergeev V.L. Adaptive identification and interpretation of pressure transient tests of horizontal wells: Challenges and perspectives / V.L. Sergeev, Dong Van Hoang // Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 43, No. 1. – P. 1–6.
4. Сергеев В.Л. Идентификация фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин с трещинами гидроразрыва пласта / В.Л. Сергеев, Донг Ван Хоанг // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 3. – С. 103–110.
5. Сергеев В.Л. К оптимизации адаптивных алгоритмов идентификации и интерпретации гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины / В.Л. Сергеев, К.Д. Ву // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 98–102.
6. Гаврилов К.С. Адаптивная интерпретация нестационарных гидродинамических исследований скважин в системе «пласт–скважина» методом интегрированных моделей / К.С. Гаврилов, В.Л. Сергеев // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2012. – Т. 321, №5. – С. 72–75.
7. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. – 198 с.
8. Сергеев В.Л. Метод адаптивной идентификации гидродинамических исследований скважин с учетом априорной информации / В.Л. Сергеев, А.С. Аниканов // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 317, № 5. – С. 50–52.
9. Кременецкий М.И. Информационное обеспечение и технологии гидродинамического моделирования нефтяных и газовых скважин / М.И. Кременецкий, А.И. Ипатов, Д.Н. Гуляев. – Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 896 с.
10. Kuchuk F.J. Well testing and interpretation for horizontal wells / F.J. Kuchuck // Society of Petroleum Engineers. – 1995. – No. 25232. – P. 36–41.
11. Bourdet D. Well test analysis: The use of advanced interpretation models. – Amsterdam: Elsevier Science, 2002. – 426 p.
12. Escobar F.H. Conventional analysis for the determination of the horizontal permeability from the elliptical flow of horizontal wells / F.H. Escobar, M. Montelegrè // Society of Petroleum Engineers. – 2007. – No. 105928. – P. 1–8.
13. Bourdet D. Use of pressure derivative in well test interpretation / D. Bourdet, J.A. Ayoub, Y.M. Piard // Society of Petroleum Engineers. – 1984. – No. 12777. – P. 293–302.
14. Иктисанов В.А. Определение фильтрационных параметров пластов и реологических свойств дисперсных систем при разработке нефтяных месторождений. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001. – 212 с.
15. Кориков А.М. Технология проектирования адаптивной системы идентификации и прогноза производственных процессов в условиях неопределенности /

А.М. Кориков, В.Л. Сергеев, Д.В. Севостьянов, П.В. Сергеев, А.С. Аниканов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 189–194.

16. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

Сергеев Виктор Леонидович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-905-9-92-92-31
Эл. почта: SergeevVL1947@gmail.com

Донг Ван Хоанг

Аспирант отд. нефтегазового дела инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-1-53-44-99
Эл. почта: hoang.tpu@gmail.com

Sergeev V.L., Dong V.H.

Identification of filtration flow diagnostic parameters during hydrodynamic studies of horizontal wells

The problem of modeling diagnostic parameters is considered to determine beginning and ending points of filtration flows during hydrodynamic studies of horizontal wells by pressure buildup curve. The results of a comparative analysis of the proposed and graph-analytical method for filtration flow diagnostics based on field data of horizontal wells are given. As diagnostic parameters, estimates of variable coefficients of the pressure derivative, obtained by the method of adaptive identification during hydrodynamic studies of wells, are used.

Keywords: identification, diagnostic parameters, filtration flows, horizontal wells, hydrodynamic studies, pressure buildup curve, additional information.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-87-92

References

1. Sergeev V.L., Dong Van Hoang, Khagay D.E. [Models and algorithms of adaptive method for filtration flow diagnostics during horizontal well testing]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no 2, pp. 90–95 (in Russ.).
2. Romanova E.V. Sergeev V.L. [Adaptive interpretation of pressure recovery curve of horizontal well with diagnostic flow]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2013, vol. 323, no 5, pp. 20–25 (in Russ.).
3. Sergeev V.L. Dong Van Hoang. Adaptive identification and interpretation of pressure transient tests of horizontal wells: Challenges and perspectives. *Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no 1, pp. 1–6.
4. Sergeev V.L. Dong Van Hoang. [Identification of filtration flow regimes in hydrodynamic studies of horizontal wells with hydraulic fractures]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no 3, pp. 103–110 (in Russ.).
5. Sergeev V.L., Vu K.D. [Optimization of adaptive algorithms for identification and interpretation of hydrodynamic

ics research considering wellbore storage]. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no 3, pp. 98–102 (in Russ.).

6. Gavrilov K.S., Sergeev V.L. [Adaptive interpretation of transient well test in the «layer–well» system by the method of integrated models]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2012, vol. 321, no 5, pp. 72–75 (in Russ.).

7. Sergeev V.L. *Integrirrovannye sistemy identifikacii* [Integrated identification system]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 198 p.

8. Sergeev V.L., Anikanov A.S. [The method of adaptive identification of wells test with a priori information]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2010, vol. 317, no 5, pp. 50–52 (in Russ.).

9. Kremeneckij M.I., Ipatov A.I., Guljaev D.N. *Informacionnoe obespechenie i tehnologii gidrodinamicheskogo modelirovaniya nefjtjanyh i gazovyh skvazhin* [Information and technology of hydrodynamic modeling of oil and gas deposits]. Moscow, Izhevsk, Institute of computer research Press, 2012. 896 p. (in Russ.).

10. Kuchuk F.J. Well testing and interpretation for horizontal wells. *Society of Petroleum Engineers*, 1995, no. 25232, pp. 36–41.

11. Bourdet D. Well test analysis: The use of advanced interpretation models. Amsterdam, Elsevier Science, 2002, 426 p.

12. Escobar F.H., Montelegre M. Conventional analysis for the determination of the horizontal permeability from the elliptical flow of horizontal wells. *Society of Petroleum Engineers*, 2007, no.105928, pp. 1–8.

13. Bourdet D., Ayoub J.A., Piard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation. *Society of Petroleum Engineers*, 1984, no. 12777, pp. 293–302.

14. Iktisanov V.A. *Opredelenie filtracionnyh parametrov plastov i reologicheskikh svoystv dispersnyh sistem pri razrabotke nefjtjanyh mestorozhdenij* [Determination of reservoir parameters and rheological properties of dispersed systems in oil fields development]. M., VNIIOJENG Publ., 2001. 212 p.

15. Korikov A.M., Sergeev V.L., Sevostyanov D.V., Sergeev P.V., Anikanov A.S. [Adaptive system of identification applied to stochastic models of industrial processes]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2(24), pp. 189–194 (in Russ.).

16. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizacii v primerah i zadachah* [Optimization methods in examples and problems]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2002, 544 p.

Viktor L. Sergeev

Doctor of Engineering Science, Professor,
Department of Automated Control Systems, Tomsk State
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-905-992-92-31
Email: SergeevVL1947@gmail.com

Dong Van Hoang

PhD student, Division for Oil and Gas Engineering,
School of Earth Sciences & Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-153-44-99
Email: hoang.tpu@gmail.com

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.314

А.Г. Юдинцев

Энергопреобразующие комплексы для наземной отработки и подтверждения прогнозируемой надёжности систем электропитания космических аппаратов

Проведен обзор существующих систем электропитания космических аппаратов за последние 20 лет, используя данные передовых отечественных предприятий ракетно-космической отрасли. Сформулированы основные требования, предъявляемые к современным энергопреобразующим испытательным комплексам. Классифицированы этапы наземной отработки систем электропитания и виды контрольно-проверочной аппаратуры. Рассмотрены структурные схемы систем электропитания космических аппаратов, нашедших наибольшее применение. Приведены возможные варианты структурной реализации силовых энергопреобразующих комплексов – автоматизированной испытательной системы, имитаторов элементов систем электропитания космических аппаратов, проанализированы их основные достоинства и недостатки.

Ключевые слова: система электропитания космического аппарата, энергопреобразующая аппаратура, наземные испытания, контрольно-проверочная аппаратура, прогнозируемая надёжность, имитатор аккумуляторной батареи, имитатор солнечной батареи, имитатор нагрузки.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-95-102

Одной из важнейших подсистем, образующих платформу космического аппарата (КА), и во многом определяющих срок его активного существования, является система электропитания (СЭП). Очевидно, что при отсутствии напряжения на общей обеспечивающей шине питания неработоспособными окажутся системы ориентации и терморегулирования, бортовой блок управления перестанет отвечать на команды телеметрии, в итоге – аппарат будет потерян [1].

Как правило, в состав СЭП КА входит следующее бортовое оборудование:

- солнечная батарея (СБ, БС);
- аккумуляторная батарея (АБ);
- энергопреобразующая аппаратура (ЭПА);
- вся бортовая нагрузка – служебная и полезная.

ЭПА является системообразующим элементом СЭП КА и предназначена для обеспечения совместной работы источника (БС) и накопителя (АБ) электрической энергии как по внешним командам управления, так и собственными аппаратными средствами ЭПА с целью электропитания бортовой аппаратуры (БА) КА электроэнергией заданного качества. Основным количественным показателем, отражающим техническое совершенство ЭПА при выполнении целевых функций, является удельная мощность (Вт/кг).

СЭП как составная часть изделия вносит особый вклад в прогнозируемую надёжность КА. Статистика отказов показывает, что, несмотря на многолетний опыт, необходимым является увеличение надёжности СЭП КА. Следует отметить, что большая часть отказов выявляется и устраняется до запуска КА [2–4]. К авариям приводят, как правило, не выявленные до полета причины отказов. Показатели надёжности рассчитываются еще на этапе проектирования, но особым этапом в создании СЭП КА и подтверждении её надёжности являются наземные испытания.

Современное состояние СЭП КА

Анализируя технические данные КА, выпускаемых передовыми отечественными предприятиями в большом объёме, можно сделать вывод, что за все время их разработки и производства непрерывно происходит рост потребляемой мощности бортовой аппаратурой, как следствие – рост мощности СЭП, а также срока активного существования (САС) аппарата [5, 6]. Так, за последние 10–15 лет мощность СЭП КА в среднем увеличилась с 6–7 до 15–25 кВт, САС – до 15 лет (таблица). Кроме того, осуществлено разделение СБ и силовых модулей ЭПА на секции, разработана бортовая аппаратура негерметичного исполнения, никель-водородные АБ заменены на литий-ионные, напряжение на общей обеспечивающей шине прошло эволюцию от 27 до 100 В. При этом число самих КА, работающих на земных орбитах, с каждым годом неуклонно растёт.

Согласно Положению о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов РК-11-КТ, необходимо проводить этап наземной отработки бортовых систем КА, в том числе и СЭП. Испытания с применением бортовых СБ, АБ и всего комплекса нагрузок КА, при длительном прохождении полного диапазона в различных режимах работы СЭП, в наземных условиях не представляются возможными в силу очевидных причин. С учетом этого целесообразно в ходе испытаний заменять элементы СЭП КА их физическими моделями, адекватно отражающими электротехнические свойства элементов СЭП – вольт-амперные и частотные характеристики, внутреннее сопротивление, выходные динамические параметры.

Наземная отработка СЭП КА

С целью проведения комплексных наземных испытаний и подтверждения прогнозируемой надёжности СЭП КА на отечественных предприятиях используется контрольно-проверочная аппаратура

(КПА). Современная КПА – это большой класс устройств, в состав которого входит различное электрооборудование:

- вибростенды;
- системы термостатирования ЭПА;
- оборудование для измерения динамических характеристик СБ;
- температурная и термовакуумная камеры для проведения работ с АБ;
- современная измерительная техника для регистрации характеристик СЭП;
- системы автоматического сбора и обработки информации;
- системы гарантированного электропитания.

Но особое место в составе КПА занимают силовые энергопреобразующие комплексы – имитаторы элементов (ИЭ) СЭП КА и зарядно-разрядные программно-аппаратные комплексы (ЗР ПАК) для наземного обслуживания бортовых АБ.

Мощность СЭП КА

Тип КА	Мощность СЭП, Вт	САС, лет	Начало летных испытаний	Масса, кг
Экспресс-А	2540	7	12.03.2000	2600
SESAT	5300	10	18.04.2000	2600
Молния-ЗК	1470	5	20.07.2001	1740
Глонасс-М	1400	7	10.12.2003	1415
Экспресс-АМ	6300	12	29.12.2003	2600
Экспресс-АМ33	6770	12	28.01.2008	2579
Экспресс-АМ44	6770	12	11.02.2009	2532
Луч-5А	2200	10	11.12.2011	1140
AMOS-5	7600	15	11.12.2011	1972
Ямал-300К	7600	14	03.11.2012	1870
Луч-5Б	2200	10	03.11.2012	1350
Spacebus-4000 C2	8000	15	2011–2012	4850
Spacebus-4000 C3	10000	15	2011–2012	5300
Spacebus-4000 C4	12000	15	2011–2012	5900
SSL/1300	5–25	>15	2013	3700–6400
КАZSAT-3	9320	15	28.04.2014	1740
Экспресс-АМ5	16200	15	21.10.2014	3360
Экспресс-АМ6	16200	15	21.10.2014	3360
Экспресс-АМ8	5880	15	14.09.2015	2100
Ямал-401	16800	14	14.12.2015	2976

Являясь физическими моделями реальных объектов, ИЭ СЭП должны обладать максимально близкими к бортовым характеристиками солнечной и аккумуляторной батареей, а также обеспечивать имитацию статических и динамических токовых нагрузок для отработки профиля мощности, потребляемой бортовой аппаратурой. ЗР ПАК необходимы для проведения контрольных циклов заряда и разряда бортовых (полётных) АБ, их диагностики и предстартового обслуживания на космодроме. В некоторых случаях (определяется заказчиком), предстартовое энергообеспечение СЭП КА может осуществляться имитаторами солнечных, либо аккумуляторных батарей.

Таким образом, энергопреобразующие комплексы, применяемые в ходе наземных испытаний,

должны отвечать ряду требований, самыми важными из которых, как и для самой СЭП КА, также являются энергетическая эффективность, надёжность, оптимальные массогабаритные показатели, точность и длительные сроки безотказной эксплуатации.

Отказы энергопреобразующих комплексов, спроектированных и изготовленных с невыявленными дефектами, при проведении этапов наземной отработки приводят к нежелательным последствиям: создаются аварийные ситуации для ЭПА, АБ либо всего космического аппарата, длительное выяснение причин остановки испытаний, дорогостоящие простои производства и т.д.

В настоящее время отечественными предприятиями ракетно-космической отрасли имитаторы элементов СЭП КА, как правило, комплектуются для следующих типов рабочих мест:

- рабочее место проведения наземной экспериментальной отработки и приемосдаточных испытаний (ПСИ) ЭПА;
- во время лабораторно-отрабочных испытаний (ЛОИ) СЭП;
- для электроиспытаний всего КА в цеховых условиях;
- с целью предстартового энергообеспечения КА, находящихся в капсуле обтекателя ракеты-носителя.

Как отмечалось выше, средняя мощность СЭП КА постоянно увеличивается, поэтому необходимым является увеличение мощности и эффективности силовых энергопреобразующих комплексов. В связи с этим необходимы не только разработка и производство, а также развитие методов и современных подходов к проектированию эффективных энергопреобразующих комплексов для испытаний СЭП КА и АБ. Сегодня существуют различные реализации ИЭ СЭП КА и ЗР ПАК для проведения наземных испытаний, разработанные предприятиями отечественной и зарубежной промышленности. Но их эффективность, точность, показатели надёжности, массогабаритные параметры, гарантийные сроки эксплуатации ставят перед разработчиками ряд задач по проектированию и созданию более эффективных силовых энергопреобразующих комплексов [7–10].

Структурные схемы СЭП КА

За всю историю проектирования и производства космических аппаратов к настоящему времени были разработаны различные структуры СЭП, подходящие под определенные типы задач, рабочие орбиты и массогабаритные параметры спутников. Но из структур, нашедших устойчивое применение, можно выделить следующие (рис. 1): параллельная с шунтовым стабилизатором (*a*), параллельно-последовательные (*b*, *в*) и с экстремальным регулятором мощности (*г*) [11–13].

При этом все существующие структуры СЭП КА обобщенно можно представить в виде Т-образной модели баланса мощностей, состоящей из генерирующего (солнечная батарея – СБ), накапливающего (аккумуляторная батарея – АБ) и потребляющего

шего (обобщённая нагрузка – Н) элементов, объединённых посредством блока ЭПА (рис. 2).

Представленная модель отображает четыре возможных режима передачи мощности через преобразователи ЭПА:

- 1) АБ не задействована, нагрузка питается только от СБ: $P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1}$;
- 2) АБ заряжается избытком мощности СБ:

$$P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1} - P_{СБ2} \cdot \eta_{ЭПА2};$$

- 3) режим пиковой нагрузки – АБ компенсирует недостаток мощности СБ:

$$P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1} + P_{АБ} \cdot \eta_{ЭПА3};$$

- 4) теневой участок орбиты – нагрузка обеспечивается за счёт мощности, передаваемой только от АБ: $P_H = P_{АБ} \cdot \eta_{ЭПА3}$; где $\eta_{ЭПА1} - \eta_{ЭПА3}$, КПД каналов преобразования ЭПА СЭП КА.

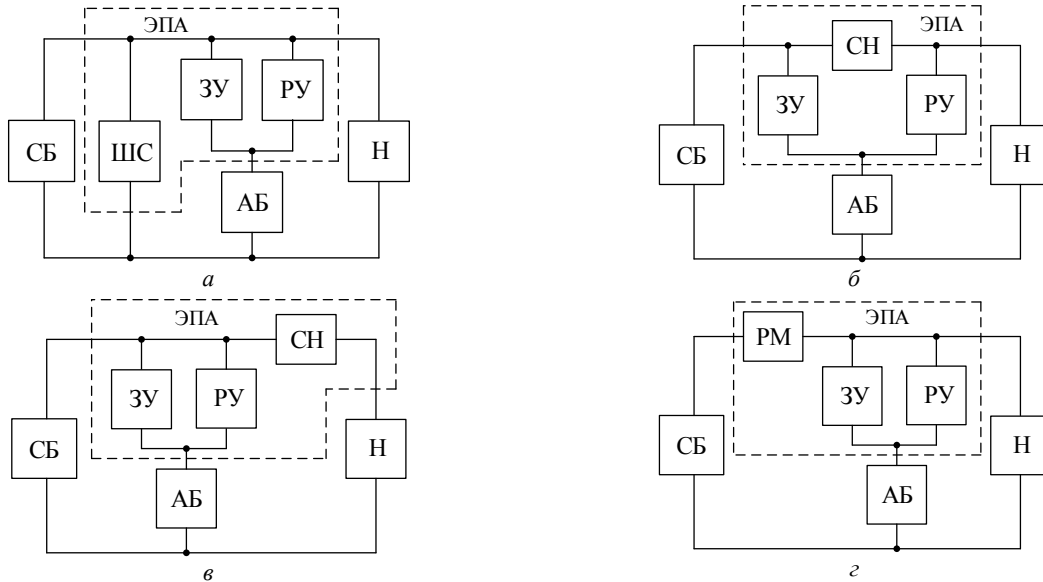


Рис. 1. Структурные схемы СЭП КА

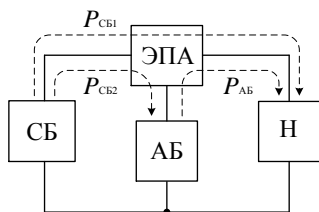


Рис. 2. Т-образная модель баланса мощностей СЭП КА

Блок ЭПА обладает рядом основополагающих функций и в зависимости от структуры СЭП, содержит стабилизатор напряжения, шунтовой стабилизатор, зарядно-разрядные устройства АБ, а также устройство обмена информацией с бортовой ЭВМ. Таким образом, блок ЭПА является системообразующим элементом, который обеспечивает алгоритм работы СЭП КА и является важнейшим элементом, определяющим надёжность функционирования космического аппарата в целом.

Автоматизированная испытательная система

В зависимости от типа рабочего места и соответствующего ему вида испытаний (ПСИ ЭПА, ЛОИ СЭП, электроиспытания КА) имитаторы элементов СЭП могут применяться как по отдельности, так и в составе испытательной системы. Для проведения комплексной наземной отработки ЭПА СЭП КА создается интегрированная испытательная площадка – автоматизированная испытательная система (АИС) (рис. 3) [14, 15]. АИС яв-

ляется физической реализацией Т-образной модели баланса мощностей и состоит из силовых энергопреобразующих комплексов – ИЭ СЭП КА, питающихся от промышленной 3-фазной сети, управляющей ЭВМ и автоматизированной системы контроля, имитирующей формирование команд управления и обработки телеметрии, поступающей от блока ЭПА, а также необходимой для проведения проверок кабельной сети и сопротивления изоляции [16].

Структура АИС в общем виде остается постоянной, изменяются количество и типы имитаторов АБ и СБ, которые определяются мощностью и структурой СЭП, при этом функционал комплекса имитации нагрузки может расширяться дополнительными блоками формирования динамических нагрузочных режимов и гармонических токов.

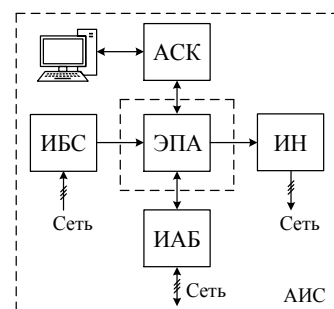


Рис. 3. Структурная схема автоматизированной испытательной системы с имитаторами элементов СЭП КА и автоматизированной системой контроля

Основной вклад в эффективность испытательной системы в целом вносят имитаторы элементов СЭП, приведенные на рис. 3. Поэтому разработка и исследование структур ИЭ, их оптимизация, увеличение энергетических показателей, моделирование, определение общих подходов к проектированию и решению частных задач, являющихся свойством отдельной физической модели элемента СЭП, представляют особый интерес.

Имитатор аккумуляторной батареи

Любой из энергопреобразующих комплексов, применяемых при испытаниях СЭП, можно представить в виде функционального блока, на вход которого подается 3-фазное напряжение промышленной сети, при этом на выходе обеспечивается ВАХ, импеданс и динамические режимы работы элемента СЭП (рис. 4). Идеальная физическая модель, представленная в виде «чёрного ящика», абсолютно адекватна реальному элементу СЭП, обладает точностью выходных параметров, КПД, близким к 1, имеет низкие массогабаритные показатели. Но адекватность имитационно-физических моделей, реализуемых на практике, как правило, далека от идеальной. Это связано со свойствами структурных схем, с потерями в силовых преобразовательных модулях, а также с недостатками систем управления.

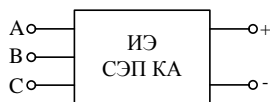


Рис. 4. Имитатор элемента СЭП КА в виде модели «чёрного ящика»

Рассмотрим возможные варианты структурной реализации ИЭ СЭП КА, раскрывая блок чёрного ящика, представленный на рис. 4. Например, один из вариантов структурной схемы имитатора аккумуляторной батареи (ИАБ) – энергопреобразующего комплекса, представленного на рис. 5, содержит два силовых преобразовательных канала – разряд и заряд АБ.

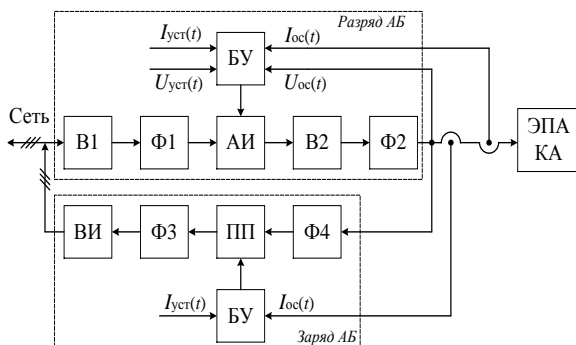


Рис. 5. Структурная схема имитатора АБ

Канал «Разряд АБ» содержит низкочастотный мостовой выпрямитель В1, НЧ-фильтр Ф1, автономный инвертор (АИ), высокочастотный выпрямитель В2, ВЧ-фильтр Ф2. Канал «Заряд АБ» состоит из ведомого инвертора (ВИ), НЧ-фильтра

Ф3, повышающего преобразователя (ПП) и ВЧ-фильтра Ф4. Силовые преобразователи каналов АИ и ПП управляются блоком управления (БУ), на который подаются сигналы уставок от задающего устройства и сигналы обратных связей по входному/выходному току и напряжению выхода ИАБ. При этом одним из основных требований в технических заданиях на разработку и изготовление любого ИЭ СЭП является наличие гальванической развязки между выходом ИЭ и питающей 3-фазной сетью. Очевидно, это возможно обеспечить только с помощью силового трансформатора. Вариант установки последнего в низкочастотную часть схемы, на входе силовой сети в ИЭ, сегодня не имеет смысла для рассмотрения, так как при вышеуказанных мощностях СЭП массогабаритные и экономические показатели такого трансформатора не выдерживают никакой критики. Помимо этого, современная элементная база позволяет преобразовывать данный диапазон мощностей на достаточно высоких частотах (100–400 кГц). Поэтому трансформатор, осуществляющий гальваническую развязку и согласование уровней напряжения, размещают в цепях блоков АИ и ПП, при этом, как известно [13], значительно снижаются его массогабариты.

Основная проблема и цель при создании ИЭ СЭП КА – это адекватность реальному физическому элементу СЭП. В случае с ИАБ основными параметрами, отражающими степень адекватности, являются: ширина диапазона имитируемого выходного напряжения (3–200 В), пульсации напряжения на выходе имитатора (не более 100 мВ), импеданс каналов заряд/разряд (не более 1 Ом), скорость реакции системы на внешнее возмущение (не более 1–2 мс), КПД (не менее 0,9), уровень электромагнитных излучений, соответствующий ГОСТ Р 54148–2010. Для решения этой проблемы необходимо всестороннее исследование структуры ИЭ СЭП – представление и последующий анализ ИЭ как системы автоматического управления, имитационное моделирование, анализ работы силовых преобразовательных модулей в составе имитатора.

Имитатор эквивалентной нагрузки

Обобщенная функциональная схема имитатора эквивалентной нагрузки (ИЭН) СЭП представлена на рис. 6. Основная задача данного энергопреобразующего комплекса – формирование статических и динамических режимов нагрузочных токов в выходной шине ЭПА СЭП КА. Динамические режимы воспроизводит блок формирования нелинейных нагрузок (БФНН), в него, как правило, входят формирователи гармонических токов широкого спектра частот, формирователи фронтов тока, имитаторы подключения ёмкостной нагрузки и т.д. Режим формирования статических (постоянных) токов осуществляет силовой преобразовательный канал, содержащий ВЧ-фильтр Ф1, НЧ-фильтр Ф2, повышающий преобразователь ПП и

ведомый инвертор ВИ. Стабилизацию входного тока имитатора нагрузок обеспечивает блок управления, на который подаются сигналы обратной связи $I_{oc}(t)$ и от задающего устройства $I_{уст}(t)$.

При этом следует отметить, что силовые преобразовательные каналы – канал заряда в ИАБ, канал разряда в ЗР ПАК и канал формирования статических нагрузок в ИЭН могут быть идентичны по своей структуре.

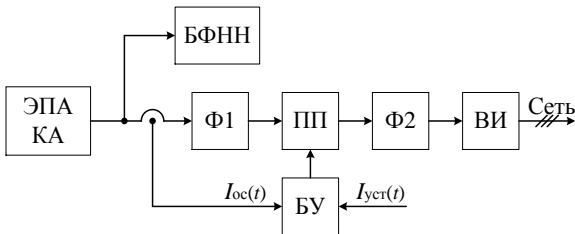


Рис. 6. Структурная схема имитатора эквивалентной нагрузки СЭП КА

В каждом случае энергия, потребляемая от ЭПА СЭП КА либо от бортовой АБ, не рассеивается в окружающее пространство (за исключением собственных потерь), а передается в питающую 3-фазную сеть. Преимущества такого способа формирования потребляемых токов очевидны. Несмотря на это, сегодня существуют нагрузочные комплексы, преобразующие электрическую энергию полностью в тепловую [17, 18].

Имитатор солнечной батареи

Принцип действия имитатора СБ основан на преобразовании электроэнергии переменного тока питающей сети с помощью промежуточных звеньев повышенной частоты, в энергию постоянного тока на выходе ИБС и формировании ВАХ, соответствующей схеме замещения преобразователя солнечной энергии в электрическую (рис. 7, 8) [19]. При этом ИБС должен обладать динамическими характеристиками, обеспечивать формирование линейных и нелинейного участков ВАХ, а также необходима имитация эквивалентной ёмкости бортовой СБ [20–22].

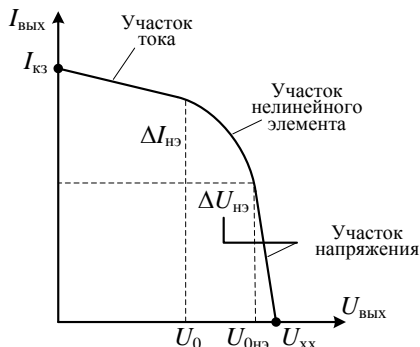


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика имитатора солнечной батареи

Имитаторы солнечных батарей могут быть как одноканальными, так и многоканальными в случае имитации многосекционных солнечных батарей спутника.

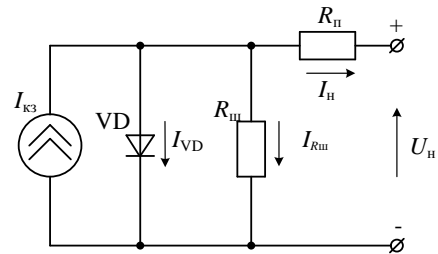


Рис. 8. Схема замещения элемента солнечной батареи

Одна из используемых при проектировании структурных схем энергопреобразующего комплекса – имитатора солнечной батареи КА представлена на рис. 9.

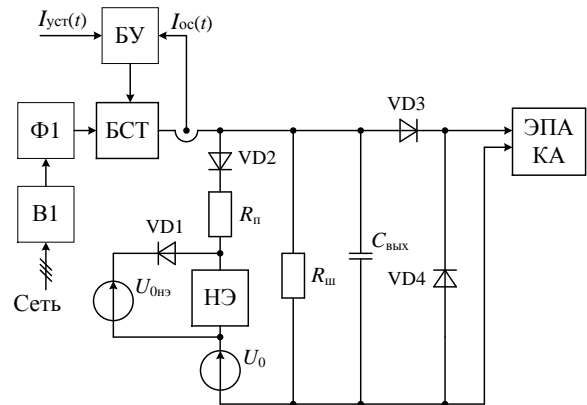


Рис. 9. Структурная схема имитатора солнечной батареи

Аналогично предыдущим структурам ИЭ в данном случае сеть поступает на мостовой выпрямитель В1, затем сглаживается НЧ-фильтром Ф1. Сглаженное напряжение подается на блок стабилизации тока (БСТ), основная задача которого – имитация тока короткого замыкания $I_{кз}$ солнечной батареи. Ток с выхода БСТ поступает в нагрузку, в цепь шунтового сопротивления $R_{ш}$ и в цепь с нелинейным элементом (НЭ), состоящим из диодно-резистивных матриц. Наклон ВАХ на участке напряжения (см. рис. 7) определяется величиной сопротивления $R_{п}$, наклон ВАХ на участке тока – величиной сопротивления $R_{ш}$. Форма ВАХ на нелинейном участке задается блоком НЭ. Последовательно с НЭ включен источник напряжения U_0 , который определяет напряжение холостого хода ИБС. С целью снижения тепловых потерь в блоке НЭ, особенно в режиме холостого хода, в схему включают источник напряжения $U_{0нэ}$. С помощью блока $C_{вых}$ имитируется выходная ёмкость солнечной батареи. Диоды VD1–VD3 выполняют отсекающую функцию, исключая взаимовлияние источников энергии друг на друга, диод VD4 выполняет защитную функцию выхода имитатора.

К основному достоинству данной структуры следует отнести относительную безынерционность, т.е. способность системы в течение не более 1 мс реагировать на внешнее воздействие со стороны ЭПА СЭП КА. Одним из основных недостатков данного энергопреобразующего комплекса

является низкая энергоэффективность, так как участки цепей, формирующие ВАХ ИБС, такие как $R_{ш}$, $R_{п}$, блок НЭ, рассеивают значительную мощность, требуют постоянного контроля температуры и, в случае необходимости, включения системы активного охлаждения.

Представленные структурные схемы энергопреобразующих комплексов не являются единственно возможными и приведены в качестве примеров, иллюстрирующих сложность решаемых задач.

Заключение

1. С целью подтверждения прогнозируемой надёжности космического аппарата необходимо проведение комплексной наземной отработки его системы электропитания.

2. Мощность БА и как следствие мощность СЭП КА постоянно растут. Согласно обработанным данным за последние 10–15 лет, мощность СЭП КА в среднем увеличилась с (6–7) до (15–25) кВт.

3. За последние 20 лет СЭП и КА претерпели изменения: при проектировании СЭП в основном применяются структуры – параллельная с шунтовым стабилизатором, параллельно-последовательные и с экстремальным регулятором мощности, ввиду большей энергетической эффективности и надёжности; с целью увеличения объёма полезной нагрузки выполняется внегермоконтейнерное конструирование КА; никель-водородные АБ заменены на более энергоёмкие литий-ионные; напряжение общей обеспечивающей шины увеличено с 27 до 100 В с целью уменьшения веса бортовой кабельной сети при возросших мощностях потребления.

4. Сегодня используются различные структурные реализации энергопреобразующих комплексов, но учитывая то, что на фоне роста средней мощности СЭП с каждым годом растёт и количество самих КА, функционирующих в околоземном пространстве, существует острая необходимость в увеличении энергоэффективности ЭК и как следствие их надёжности для увеличения качества наземной отработки и предстартового обслуживания СЭП КА.

5. Энергопреобразующие комплексы для наземной отработки СЭП КА являются сложными нелинейными системами. Для увеличения их энергоэффективности и надёжности необходимо проведение всесторонних исследований: построение имитационных и математических моделей, поиск способов снижения теплонагруженности элементов силовых преобразовательных модулей, анализ способов увеличения адекватности ЭК, имитирующих нелинейные ВАХ.

Литература

1. ТАСС. Ангольский телекоммуникационный спутник «Ангосат-1». Досье: портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/info/4847125> (дата обращения: 27.01.2019).

2. Куренков В.И. Надёжность изделий и систем ракетно-космической техники: электронный курс лекций / В.И. Куренков, В.В. Волоцув. – Самара: Самар. гос. аэрокосмический ун-т, 2010. – 55 с.

3. Матвеевский В.Р. Надёжность технических систем: учеб. пособие. – М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2002. – 113 с.

4. Жаднов В.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных и радиоэлектронных средств / В.В. Жаднов, А.В. Сарафанов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 464 с.

5. АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва. Космические аппараты АО «ИСС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft> (дата обращения: 02.02.2019).

6. Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина. Проекты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.laspace.ru/projects> (дата обращения: 02.02.2019).

7. Пат. 2635897 Российская Федерация, МПК51 G 06 G 7/48. Электрический имитатор аккумуляторной батареи с защитой по току и напряжению и устройство защиты электрического имитатора аккумуляторной батареи / Е.А. Мизрах, Д.К. Лобанов, Д.Н. Пойманов, Р.В. Балакирев, Е.А. Копылов, Н.В. Штабель; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва». – №2016148982; заявл. 13.12.16; опубл. 16.11.17. Бюл. № 32.

8. Пат. 2349518 Российская Федерация, МПК51 В 64 G 7/00. Стенд для моделирования системы электропитания космического аппарата / В.И. Пушкин, А.С. Гуртов, С.И. Миненко, В.Н. Фомакин, Ю.Д. Петренко; заявитель и патентообладатель ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». – №2007126588/11; заявл. 12.07.07; опубл. 20.03.09. Бюл. № 8.

9. Холдинг «Информтест». Продукция, Системы функционального контроля: портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.informtest.ru/produksiya/functional-control-systems> (дата обращения: 05.02.2019).

10. Keysight Technologies. Решения для моделирования спутниковых энергосистем: портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/ru> (дата обращения: 05.02.2019).

11. Системы спутников связи: учеб. пособие по курсу «Системы электроснабжения летательных аппаратов» для студентов приборостроительного факультета. КИКТ» / А.Б. Базилевский, А.Г. Козлов, М.В. Лукьяненко, В.Г. Шелудько. – Красноярск, 1989. – 224 с.

12. Куландин А.А. Энергетические системы космических аппаратов / А.А. Куландин, С.В. Тимашев, И.В. Зайцев. – М.: Наука, 1994. – 283 с.

13. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Ислаев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. – 318 с.

14. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, В.А. Пчельников, В.М. Рулевский, Ю.А. Шурыгин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 35–39.

15. Брорин Эд. Варианты решения источник-приемник тока для тестирования системы электропитания спутника // Силовая электроника. – 2014. – № 4. – С. 68–70.

16. Автоматизированная система функционального контроля испытаний энергоснабжения систем электропитания космических аппаратов / В.Н. Мишин, И.В. Целебровский, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, А.Г. Юдинцев, В.М. Рулевский // *Электропитание*. – 2014. – № 3. – С. 56–60.

17. ESC Energy Supplies group. Нагрузочные модули: портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.loadbank.ru/catalog> (дата обращения: 10.05.2019).

18. Силин Е. Программируемые электронные нагрузки Chroma 63800-ТЕСТ // *Силовая электроника*. – 2013. – № 5. – С. 110–111.

19. Проектирование модульных имитаторов солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания автоматических космических аппаратов / Ю.А. Кремзуков, В.Н. Мишин, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 86 с.

20. Шурыгин Ю.А. Нелинейный элемент для имитатора солнечных батарей / Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Андреев, О.В. Бубнов // *Доклады ТУСУР*. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 135–138.

21. Шкуратов А.В. Формирователь аналоговых вольт-амперных характеристик для имитатора солнечной батареи / А.В. Шкуратов, А.В. Петровский // *Доклады ТУСУР*. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 93–97.

22. Шостак В.Ф. Исследование имитатора солнечной батареи на базе источника напряжения с безынерционным ограничением тока / В.Ф. Шостак, Т.В. Горлова, М.Г. Когдась // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – 2012. – Вып. 3. – С. 20–23.

dicted dependability, storage battery simulator, solar array simulator, electric load simulator.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-95-102

References

1. TASS. *Angol'skij telekommunikacionnyj sputnik «Angosat-1»*. Dos'e: portal [TASS. Angolan telecommunication satellite «Angosat-1». Dossier: portal]. Available at: <https://tass.ru/info/4847125> (Accessed: January 27, 2019) (in Russ.).

2. Kurenkov V.I., Volotsuev V.V. *Nadejnost izdeliy i sistem raketno-kosmicheskoy tehniki. Elektronnyy kurs lektsiy Samara* [Reliability of products and systems of rocket and space technology. Lecture course]. Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskij universitet, 2010, 55 p. (in Russ.).

3. Matveevskiy V.R. *Nadejnost tehniceskikh sistem. Uchebnoe posobie* [Reliability of technical systems. Tutorial]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki. 2002. 113 p. (in Russ.).

4. Jadnov V.V., Sarafanov A.V. *Upravlenie kachestvom pri proektirovanii teplonagrujennyih i radioelektronnyih sredstv* [Quality management in the design of heat-loaded and electronic equipment]. Moscow, SOLON-Press, 2004, 464 p. (in Russ.).

5. AO Informatsionnyie sputnikovyie sistemy imeni akademika M.F. Reshetneva. *Kosmicheskie apparaty AO ISS* [JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems]. Available at: <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft> (Accessed: February 02, 2019).

6. Nauchno-proizvodstvennoe obединenie imeni S.A. Lavochkina. *Proekty* [Lavochkin Association. Projects]. Available at: <https://www.laspace.ru/projects> (Accessed: February 02, 2019).

7. Mizrah E.A., Lobanov D.K., Poymanov D.N., Balakirev R.V., Kopylov E.A., Shtabel N.V. *Elektricheskiy imitator akkumulyatornoy baterei s zaschitoy po toku i napryazheniyu i ustroystvo zaschityi elektricheskogo imitatora akkumulyatornoy baterei* [Electric battery simulator with current and voltage protection and protection device for electric battery simulator]. Patent RF, no. 2635897, 2016.

8. Pushkin V.I., Gurtov A.S., Minenko S.I., Fomakin V.N., Petrenko Yu.D. *Stend dlya modelirovaniya sistemy elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [Stand for modeling a spacecraft power system]. Patent RF, no. 2349518, 2009.

9. Holding Informtest. *Produktsiya, Sistemyi funktsionalnogo kontrolya* [Holding Informtest. Products, Functional Control Systems]. Available at: <http://www.informtest.ru/produktsiya/functional-control-systems> (Accessed: February 05, 2019).

10. Keysight Technologies. *Resheniya dlya modelirovaniya sputnikovyih energosistem* [Satellite Power System Simulation Solutions]. Available at: <https://www.keysight.com/ru> (Accessed: February 05, 2019).

11. Bazilevskiy A.B., Kozlov A.G., Lukyanenko M.V., Sheludko V.G. *Sistemyi sputnikov svyazi: Uchebnoe posobie po kursu Sistemyi elektrosnabzheniya letatelnyih apparatov dlya studentov priborostroitel'nogo fakulteta* [Communication satellite systems: A manual for the course Aircraft Power Supply Systems for students of the Instrument Engineering Faculty]. Krasnoyarsk, 1989, 224 p. (in Russ.).

12. Kulandin A.A., Timashev S.V., Zaytsev I.V. *Energeticheskie sistemyi kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft energy systems]. Moscow, Nauka, 1994, 283 p. (in Russ.).

13. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyishev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemyi elektropitaniya kosmicheskikh appa-*

Юдинцев Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, директор
Научно-исследовательского института автоматики
и электромеханики (НИИ АЭМ) ТУСУРа
Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7-960-973-03-03
Эл. почта: yag@niiaem.tomsk.ru

Yudintsev A.G.

Energy conversion complexes for ground testing of spacecraft power supply systems

A review of existing spacecraft power systems over the past 20 years has been carried out, using data from leading domestic enterprises of the rocket and space industry. The basic requirements for modern energy conversion test complexes are formulated. The stages of ground technical testing spacecraft power systems and types of control and test equipment are classified. The block diagrams of the spacecraft power systems that have found the greatest application are considered. The possible variants of the structural implementation of power energy converting complexes – an automated testing system, simulators of the elements of spacecraft power systems are presented, their main advantages and disadvantages are analyzed.

Keywords: spacecraft power systems, energy conversion equipment, technical ground testing, test equipment, pre-

ratov [Spacecraft Power Systems]. Novosibirsk, VO Nauka, Sibirskaya izdatelskaya firma, 1994, 318 p. (in Russ.).

14. Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Pchel'nikov V.A., Rulevskiy V.M., Shurygin Yu.A. [The automated workstation for testing the energy-converting equipment of the spacecraft's power supply system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, v. 20, no. 3, pp. 35–39 (in Russ.).

15. Brorin Ed. [Variants of the solution source-receiver current for testing the power supply system of the satellite]. *Power electronics*, 2014, no. 4, pp. 68–70 (in Russ.).

16. Mishin V.N., Tselebrovskiy I.V., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Yudin'tsev A.G., Rulevskiy V.M. [The automated system for functional control of tests of power supply for spacecraft power systems]. *Power supply*, 2014, no. 3, pp. 56–60 (in Russ.).

17. ESC Energy Supplies group. Nagruzochnyie moduli [ESC Energy Supplies group. Load modules]. Available at: <http://www.loadbank/ru/catalog> (Accessed: May 10, 2019).

18. Silin E. Programmiruemye elektronnyie nagruzki Chroma 63800-TECT [Programmable Electronic Loads Chroma 63800-TEST]. *Power supply*, 2013, no. 5, pp. 110–111 (in Russ.).

19. Kremzukov Yu.A., Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V., Rulevskiy V.M., Shinyakov Yu. A., Shurygin Yu.A. *Proektirovanie modulnyih imitatorov solnechnyih batarey avtomatizirovannoy kontrol'no-ispyitatel'noy apparaturyi sistem elektropitaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh*

apparatorov [Design of modular simulators of solar panels for automated test equipment of power systems for automatic spacecraft]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta, 2014, 86 p. (in Russ.).

20. Shurygin Yu.A., Andreev Yu.A., Bubnov O.V. [Non-linear element for solar simulator]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 135–138 (in Russ.).

21. Shkuratov A.V., Petrovskiy A.V. [The shaper of analog current-voltage characteristics for a solar battery simulator]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 93–97 (in Russ.).

22. Shostak V.F., Gorlova T.V., Kogdas' M.G. [The research of a solar cell simulator based on a voltage source with inertialess current limitation]. *Visnik KrNU imeni Mihajla Ostrograd'skogo*, 2012, no. 3, pp. 20–23 (in Russ.).

Anton G. Yudin'tsev

Doctor of Engineering Science, Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR)
34, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: +7-960-973-03-03
Email: yag@niiuem.tomsk.ru

УДК 621.314.58

М.А. Хорошев, С.А. Харитонов

Анализ динамических процессов в системе генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты для летательных аппаратов

Анализируются динамические процессы в системе электроснабжения переменного тока переменной частоты для летательного аппарата типа «синхронный генератор – полупроводниковый преобразователь». В качестве синхронного генератора выступает магнитоэлектрический генератор, роль полупроводникового преобразователя выполняет трехфазный транзисторный инвертор напряжения в обращенном режиме, подключенный параллельно. Предложена математическая модель системы генерирования электрической энергии во вращающейся системе координат $dq0$. Разработана структура системы регулирования напряжения на зажимах генератора и напряжения в звене постоянного тока инвертора. Получены передаточные характеристики для анализа устойчивости системы. Проведено имитационное моделирование динамических режимов работы системы при динамической нагрузке и изменении частоты генерируемого напряжения.

Ключевые слова: активный выпрямитель, синхронный генератор с постоянными магнитами, авиационная система электроснабжения, система замкнутого регулирования, динамический процесс, оптимальное управление.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-103-110

Стремление к улучшению технико-экономических показателей летательных аппаратов (ЛА) следующего поколения ставит перед авиационными специалистами целый ряд сложных задач, которые требуют новых методов построения бортовых энергетических систем. Так, наиболее перспективным направлением в данной области исследования является создание летательного аппарата с единой централизованной вторичной системой электроснабжения, обеспечивающей все энергетические потребности бортового оборудования. Данная концепция была выдвинута в результате исследований по улучшению энергетической эффективности летательных аппаратов и имеет название «Полностью электрический самолет» [1]. В отличие от устоявшейся методики создания бортовых энергетических систем, в которых используется три вида вторичных систем:

- гидравлическая система;
- система электроснабжения;
- пневматическая система,

в централизованной системе электрическая энергия будет применяться для питания наиболее энергоемких систем, которые традиционно использовали для своего функционирования гидравлическую и пневматическую энергию.

По оценкам специалистов, использование централизованной системы электроснабжения позволит [1]:

- снизить потребление топлива на 8–12%;
- снизить полную взлетную массу на 6–10%;
- снизить эксплуатационные расходы на 5–10%;
- увеличить средний налет на отказ на 5–6%;
- снизить стоимость жизненного цикла на 3–5%;
- снизить время технического обслуживания на 4–5%.

Однако стремление к созданию систем, в которых электрическое оборудование преобладает над оборудованием, работающим от других видов энергии, несет в себе ряд сложностей. Одной из таких проблем является поиск компромисса между жела-

нием уменьшить существующие массогабаритные показатели систем электроснабжения и улучшить качество генерируемой электрической энергии. По данному вопросу на сегодняшний день ведутся многочисленные дискуссии [2].

Постановка задачи

С постановкой концепций «Полностью электрический самолет» и «Более электрический самолет» повышение качества электрической энергии в системах электропитания летательных аппаратов стало одной из самых важных задач при проектировании летательных аппаратов. Более того, с ростом мощности электрооборудования ЛА возрастает необходимость в новых методах построения систем электроснабжения. На сегодняшний день широкий круг ученых и инженеров проводят исследования по дальнейшей электрификации бортового оборудования летательных аппаратов.

Так, мощность систем электропитания на отдельном летательном аппарате может достигать 1 МВт [1]. Нетрудно предположить, что потребители в такой системе могут быть самыми разнообразными – от тех, для кого качество электрической энергии не играет особой роли, до прецизионных устройств, перебои в электропитании для которых могут привести к некорректной работе или выходу их из строя.

Документом, регламентирующим качество электрической энергии на летательных аппаратах, является ГОСТ Р 540073–2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов» [3]. В этом документе описаны все разрешенные типы систем электропитания воздушных судов, регламентированы динамические процессы, возможные допуски по просадке и всплескам напряжения, типы нагрузок и т.д.

Среди типов систем электроснабжения воздушных судов большой интерес представляет новая система переменного тока переменной частоты

115/200 В, 380–800 Гц. Данная система была предложена в ходе усовершенствования электрического оборудования воздушных судов, при котором стабильность частоты питающего напряжения перестала быть критичным фактором [4, 5]. Предложенный тип системы электропитания открыл новые пути к созданию систем генерирования электрической энергии. Более того, развитие силовой электроники позволило создавать такие системы более гибкими, и большое количество исследований проводится в этом направлении на сегодняшний день.

Одним из способов построения такой системы является использование в своем составе синхронного генератора (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов. Особенность работы такого генератора заключается в том, что величина напряжения на его зажимах зависит от частоты вращения вала и нагрузки, поэтому в составе такой системы обязательно должен быть использован регулятор напряжения [6]. Учитывая высокий уровень развития технической базы современной силовой электроники, рациональнее всего в качестве регулятора напряжения использовать полупроводниковый преобразователь.

Схемы на базе синхронного генератора и полупроводникового преобразователя условно называют системами генерирования электрической энергии типа «СГ-ПП».

На рис. 1 изображена принципиальная схема системы генерирования электрической энергии (СГЭЭ) типа «СГ-ПП» переменного тока переменной частоты. Как видно из схемы, роль регулятора напряжения выполняет трехфазный инвертор в обращенном режиме [7].

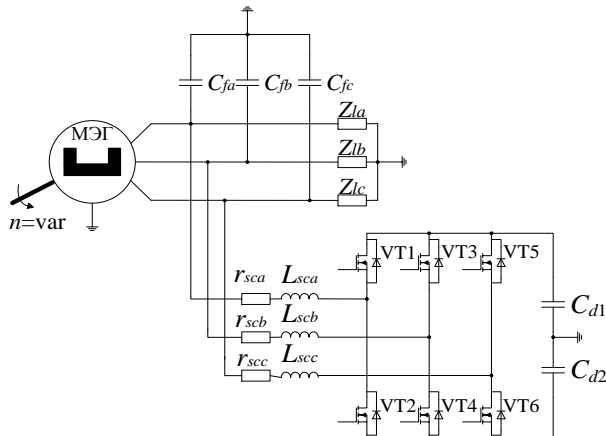


Рис. 1. Принципиальная схема СГЭЭ типа «СГ-ПП» переменной частоты

Регулирование напряжения на зажимах СГ происходит посредством генерирования синусоидального тока полупроводниковым преобразователем, сдвинутого по фазе на $\pi/2$ или $-\pi/2$ относительно генерируемого напряжения, вследствие чего, за счет реакции якоря, происходит увеличение или уменьшение суммарного магнитного потока синхронного генератора, как это показано в публикациях [7–9]. В публикации [10] предложен способ син-

хронизации системы управления при переменной частоте генерируемого напряжения. В статье рассмотрена разработка математической модели СГЭЭ переменного напряжения переменной частоты.

Теоретический анализ

Малосигнальная модель. Для анализа свойств СГЭЭ необходимо получить динамическую модель. Существует два основных способа представления преобразовательных импульсных систем как динамических объектов. Первый подход, в котором силовая часть, работающая с ШИМ или ЧИМ, рассматривается как дискретное звено, позволяет выявить особенности всей дискретной системы, в частности, определить границы устойчивости по точной модели. К сожалению, изначальное рассмотрение силовой части преобразователя как дискретного динамического звена приводит к большим математическим сложностям.

Второй подход представления силовой части импульсного преобразователя, работающего с любым типом ШИМ, с аналоговым или дискретным процессором в управляющей части, основан на замене силовой части как дискретного звена непрерывным. Такой подход оправдан, когда частота ШИМ значительно больше полосы пропускания непрерывной части системы. Помимо перехода к непрерывному звену, практически полезно и дальнейшее изменение – переход от нелинейного звена к линейному. Полученная таким образом модель является непрерывной и линейной, доступна для анализа динамических свойств известными методами [11].

Непрерывная модель СГЭЭ во вращающейся синхронно с ротором СГ системе dq -координат представлена уравнениями (1)–(5).

$$U_{sgd} = U_{dc} \frac{1}{2} M_d + r_{sc} I_{scd} + L_{sc} \frac{dI_{scd}}{dt} - \omega L_{sc} I_{scq}; \quad (1)$$

$$U_{sgq} = U_{dc} \frac{1}{2} M_q + r_{sc} I_{scq} + L_{sc} \frac{dI_{scq}}{dt} + \omega L_{sc} I_{scd}, \quad (2)$$

где U_{sgd} , U_{sgq} – напряжение на зажимах СГ по d - и q -координатам соответственно; r_{sc} – активное сопротивление дросселя ПП; L_{sc} – индуктивность дросселя ПП; I_{scd} , I_{scq} – ток ПП по d - и q -координатам соответственно; M_d , M_q – глубина модуляции по d - и q -координатам соответственно; ω – круговая частота генерируемого напряжения СГ; U_{dc} – напряжение в звене постоянного тока;

$$C_d \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{4} (M_d I_{scd} + M_q I_{scq}), \quad (3)$$

где C_d – емкость в звене постоянного тока ПП.

$$E_d = U_{sgd} + r_{sg} I_{sgd} + L_{sg} \frac{dI_{sgd}}{dt} - \omega L_{sg} I_{sgq}; \quad (4)$$

$$E_q = U_{sgq} + r_{sg} I_{sgq} + L_{sg} \frac{dI_{sgq}}{dt} + \omega L_{sg} I_{sgd}, \quad (5)$$

где E_d , E_q – ЭДС от постоянных магнитов СГ по d - и q -координатам соответственно; r_{sg} – активное сопротивление обмотки статора СГ; L_{sg} – индуктив-

ность обмотки статора СГ; I_{sgd}, I_{sgq} – ток СГ по d - и q -координатам соответственно.

Следующий шаг на пути к анализу динамических свойств и синтезу системы управления – линеаризация системы уравнений.

Для проведения процедуры линеаризации, каждую переменную в системе уравнений (1)–(5) представим в виде суммы среднего значения и её бесконечно малого отклонения. Целью линеаризации является исключение нелинейных компонент из уравнений [12]. В результате получим систему уравнений (6)–(10):

$$\hat{u}_{sgd} = U_{dc} \frac{1}{2} \hat{m}_d + \hat{u}_{dc} \frac{1}{2} M_d + r_{sc} \hat{i}_{scd} + L_{sc} \frac{d\hat{i}_{scd}}{dt} - \omega L_{sc} \hat{i}_{scq}; \quad (6)$$

$$\hat{u}_{sgq} = U_{dc} \frac{1}{2} \hat{m}_q + \hat{u}_{dc} \frac{1}{2} M_q + r_{sc} \hat{i}_{scq} + L_{sc} \frac{d\hat{i}_{scq}}{dt} + \omega L_{sc} \hat{i}_{scd}, \quad (7)$$

где $\hat{u}_{sgd}, \hat{u}_{sgq}$ – малое отклонение напряжения на зажимах СГ по d - и q -координатам соответственно; \hat{u}_{cd} – малое отклонение напряжения в звене постоянного тока; $\hat{i}_{scd}, \hat{i}_{scq}$ – малое отклонение тока ПП по d - и q -координатам соответственно; \hat{m}_d, \hat{m}_q – малое отклонение глубины модуляции по d - и q -координатам соответственно.

$$Cd \frac{d\hat{u}_{dc}}{dt} = \frac{3}{4} (\hat{m}_d I_{scd} + M_d \hat{i}_{scd} + \hat{m}_q I_{scq} + M_q \hat{i}_{scq}); \quad (8)$$

$$\hat{e}_d = \hat{u}_{sgd} + r_{sg} \hat{i}_{sgd} + L_{sg} \frac{d\hat{i}_{sgd}}{dt} - \omega L_{sg} \hat{i}_{sgq}; \quad (9)$$

$$\hat{e}_q = u_{sgq} + r_{sg} \hat{i}_{sgq} + L_{sg} \frac{d\hat{i}_{sgq}}{dt} + \omega L_{sg} \hat{i}_{sgd}, \quad (10)$$

где \hat{e}_d, \hat{e}_q – малое отклонение ЭДС от постоянных магнитов СГ по d - и q -координатам соответственно; $\hat{i}_{sgd}, \hat{i}_{sgq}$ – малое отклонение тока СГ по d - и q -координатам соответственно.

Уравнения (6)–(8) отображают непрерывную линеаризованную динамическую модель ПП, уравнения (9), (10) – непрерывную линеаризованную динамическую модель СГ.

Полученная модель позволяет анализировать динамические процессы в «малом», протекающие в СГЭЭ переменной частоты. Параллельно с анализом динамики необходимым является построение замкнутой системы регулирования для стабилизации постоянного уровня напряжения в звене постоянного тока и амплитуды переменного напряжения на зажимах генератора.

Синтез системы замкнутого регулирования

Для построения системы регулирования воспользуемся принципом подчиненного регулирования. Синтезированная по такому принципу система представляет собой многоконтурную структуру с каскадным включением регуляторов.

Применительно к СГЭЭ переменной частоты с параллельно включенным активным выпрямителем напряжения система подчиненного регулирования содержит два двухконтурных канала управления. Первый канал содержит два последовательно включенных регулятора, где внешний контур – контур регулирования напряжения в звене постоянного тока, а внутренний – контур регулирования активного тока полупроводникового преобразователя. Второй канал также содержит два регулятора, где внешний отвечает за регулирование напряжения на зажимах генератора, а второй – за регулирование реактивного тока полупроводникового преобразователя.

На рис. 2 представлена структурная схема замкнутой системы регулирования СГЭЭ переменной частоты. В ней введена компенсация перекрестных связей токов координат d и q .

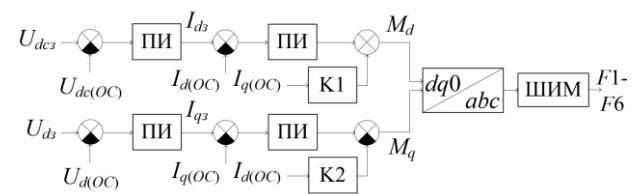


Рис. 2. Структурная схема замкнутой системы регулирования СГЭЭ переменной частоты: ПИ – пропорционально-интегральный регулятор; K1, K2 – коэффициенты перекрестных связей координат dq ; ШИМ – модуль широтно-импульсной модуляции

Для реализации данной структуры необходимо получить собственные передаточные функции для каждого контура регулирования, по построенным амплитудно- и фазочастотным характеристикам проанализировать их динамические свойства, для каждого контура ввести компенсирующие звенья для получения требуемых динамических параметров.

Частотные характеристики

Анализ динамических свойств системы удобно начать с полупроводникового преобразователя. Как видно из уравнений (6), (7), в выражении для напряжения d -координаты присутствует влияние тока q -координаты и наоборот. Данное взаимовлияние называется «перекрестная связь». Для того чтобы избавиться от взаимодействия компонент токов, необходимо в сигнал управления внести компенсационную связь. В таком случае сигнал управления изменится следующим образом:

$$M_d = M_d^* + \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} I_{scq}; \quad (11)$$

$$M_q = M_q^* - \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} I_{scd}. \quad (12)$$

Перепишем уравнения (6, 7) с учетом компенсации перекрестных связей.

$$\hat{u}_{scd} = u_{dc} \frac{1}{2} \left(\hat{m}_d + \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} \hat{i}_{scq} \right) + r_{sc} \hat{i}_{scd} - \omega L_{sc} \hat{i}_{scq} + \hat{u}_{dc} \frac{1}{2} \left(M_d^* + \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} I_{scq} \right) + L_{sc} \frac{d\hat{i}_{scd}}{dt}; \quad (13)$$

$$\hat{u}_{scq} = u_{dc} \frac{1}{2} (\hat{m}_q^* - \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} \hat{i}_{scd}) + r_{sc} \hat{i}_{scq} - \omega L_{sc} \hat{i}_{scd} + \hat{u}_{dc} \frac{1}{2} (M_q^* - \frac{2}{\hat{u}_{dc}} \omega L_{sc} I_{scd}) + L_{sc} \frac{d\hat{i}_{scq}}{dt}. \quad (14)$$

Из системы уравнений (13), (14) получим передаточную функцию «управление – ток» для каждой координаты базиса dq . Для этого все малые отклонения приравниваются к нулю, кроме компонент тока и сигнала управления.

$$G_{idmd}(s) = \frac{\hat{i}_{scd}}{\hat{m}_d} = -u_{dc} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{sL_{sc} + r_{sc}} \right), \quad (15)$$

$$G_{iqmq}(s) = \frac{\hat{i}_{scd}}{\hat{m}_q} = -u_{dc} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{sL_{sc} + r_{sc}} \right). \quad (16)$$

Полученные передаточные функции отражают зависимость тока ПП при возмущении сигнала управления. Для известных параметров СГЭЭ можно построить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики (АЧХ и ФЧХ).

Так как передаточные функции по каналу d и q одинаковы, проанализируем одну из них. Параметры модели сведены в таблицу.

Параметры модели

Параметр	Значение
Синхронный генератор	
Сопrotивление статорной цепи R_s , Ом	0,015
Продольная индуктивность L_{sgd} , Гн	$50 \cdot 10^{-6}$
Поперечная индуктивность L_{sgq} , Гн	$50 \cdot 10^{-6}$
Количество полюсов ротора	6
Номинальная частота генерируемого напряжения в указанном диапазоне оборотов, Гц	380–800
Номинальное напряжение генератора в указанном диапазоне оборотов, действующее фазное, В	106–213
Активный выпрямитель с идеальными ключами	
Частота коммутации f_{sw} , Гц	$100 \cdot 10^3$
Индуктивность в звене переменного тока L_{sc} , Гн	$250 \cdot 10^{-6}$
Емкость в звене постоянного тока C_d , Ф	$4 \cdot 10^{-3}$
Емкость в звене переменного тока C_f , Ф	$1 \cdot 10^{-4}$
Номинальная мощность нагрузки P , Вт	$100 \cdot 10^3$

Анализируя АЧХ и ФЧХ разомкнутой передаточной функции «управление – ток», можно сделать вывод, что амплитуда передаточной функции будет равна нулю на частоте около 1 МГц. Также видно, что коэффициент усиления на низких частотах имеет конечное значение. По форме ФЧХ видно, что в точке перегиба АЧХ фаза сигнала изменяется на 90° .

Классическим подходом к построению замкнутых систем регулирования является введение компенсирующих звеньев, изменяющих частотные характеристики передаточных функций. АЧХ и ФЧХ следует скорректировать таким образом, чтобы коэффициент единичного усиления был на частоте как минимум в 10 раз меньше частоты переключения ШИМ для обеспечения выполнения теоремы Котельникова, а фаза сигнала на частоте единичного усиления не уменьшалась меньше -180° для устойчивости системы.

Для полученной передаточной функции «управление – ток» введем компенсирующее пропорционально-интегральное звено вида:

$$G_{pi}(s) = K_{id} + \frac{1}{sT_{id}}, \quad (17)$$

где K_{id} – пропорциональный коэффициент усиления; T_{id} – постоянная времени интегрирующего звена.

Изменяя коэффициенты пропорционально-интегрального звена таким образом, чтобы единичное усиление передаточной функции было на частоте как минимум в 10 раз меньше, чем частота переключения ключей ПП, а также фаза сигнала на этой частоте не была меньше -180° , получаем скомпенсированную передаточную функцию «управление – ток». АЧХ и ФЧХ данной передаточной функции изображены на рис. 3.

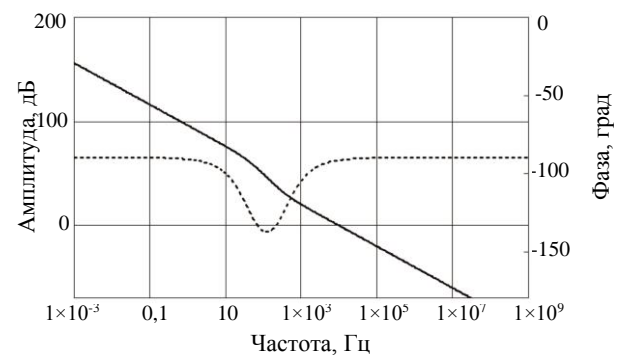


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ передаточной функции ПП «управление – ток» с введенным пропорционально-интегральным звеном: — – АЧХ передаточной функции; - - - - ФЧХ передаточной функции

Переходная характеристика скомпенсированной передаточной функции изображена на рис. 4.

Показатели качества переходного процесса вписываются в критерии оценки таких систем [15].

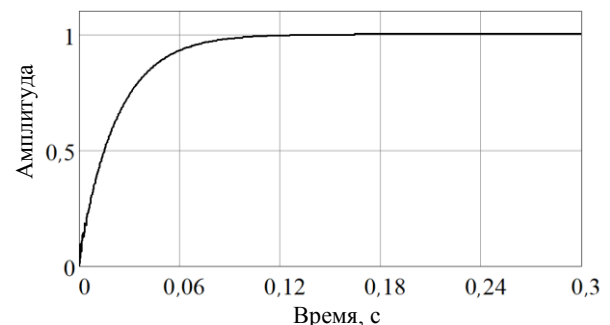


Рис. 4. Переходная характеристика передаточной функции «управление – ток» с введенным пропорционально-интегральным звеном

Следующая анализируемая передаточная функция отвечает за реакцию напряжения в звене постоянного тока при возмущении тока ПП по координате d .

На основе уравнения (8), разделяя каналы управления напряжением на зажимах генератора и напряжением в звене постоянного тока, получим передаточную функцию «напряжение ЗПТ – ток ПП»:

$$G_{udcid}(f) = \frac{\hat{u}_{dc}}{\hat{i}_{scd}} = \frac{3}{4C_d s}. \quad (18)$$

Полученная передаточная функция представляет собой интегрирующее звено.

Исходя из полученных частотных характеристик, можно сделать вывод о том, что система устойчива во всем диапазоне частот и для увеличения быстродействия имеет смысл ввести пропорциональное звено. Однако для уменьшения астатической ошибки следует ввести компенсирующее пропорционально-интегральное звено.

Полученные АЧХ и ФЧХ с компенсирующим звеном изображены на рис. 5.

Параметры пропорционально-интегрального звена выбираются таким образом, чтобы частота единичного усиления передаточной функции была как минимум в 10 раз меньше, чем частота единичного усиления передаточной функции «ток – управление», тем самым удовлетворяя принципам подчиненного регулирования [13, 14].

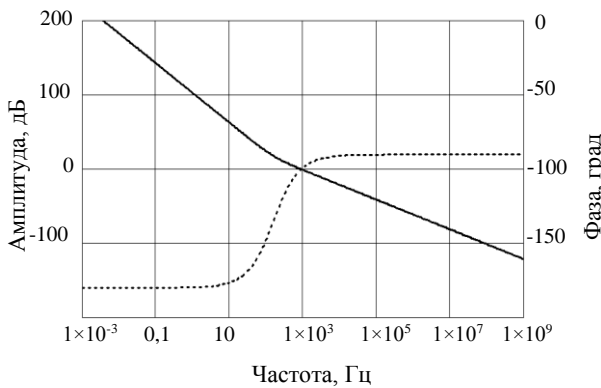


Рис. 5. АЧХ и ФЧХ передаточной функции «напряжение ЗПТ – ток ПП» с введенным пропорционально-интегральным звеном: — — АЧХ передаточной функции; ----- — ФЧХ передаточной функции

Переходная характеристика передаточной функции «напряжение ЗПТ – ток ПП» изображена на рис. 6.

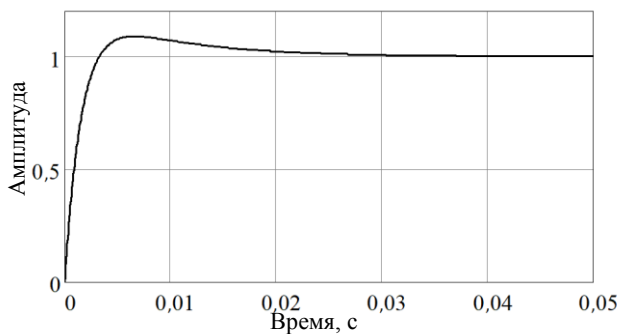


Рис. 6. Переходная характеристика передаточной функции «напряжение ЗПТ – ток ПП» с введенным пропорционально-интегральным звеном

Следующая передаточная функция, которая должна быть проанализирована, отвечает за отношение между напряжением на зажимах генератора и

током полупроводникового преобразователя по координате q . Выражение этой передаточной функции приведено в соотношении (19):

$$G_{udiq}(f) = \frac{\hat{u}_{sgd}}{\hat{i}_{scq}} = \frac{\omega L_{sg}(r_{sg} + sL_{sg})^2}{(r_{load} + sL_{load})(r_{sg} + sL_{sg}) + \dots} \dots \frac{\dots}{+L_{sg}L_{load}\omega^2 + (r_{load} + sL_{load})^2} \dots \frac{\dots}{\times(1 + (r_{sg} + sL_{sg})sC_f - L_{sg}C_f\omega^2)}. \quad (19)$$

В области малых частот АЧХ имеет конечный малый коэффициент усиления (меньше единицы).

АЧХ и ФЧХ передаточной функции «напряжение СГ – ток ПП» с компенсирующим пропорционально-интегральным звеном приведены на рис. 7.

Компенсирующее звено изменяет АЧХ таким образом, чтобы в области перехода через ноль форма кривой имела наклон 20дБ/дек. в обе стороны для увеличения устойчивости системы.

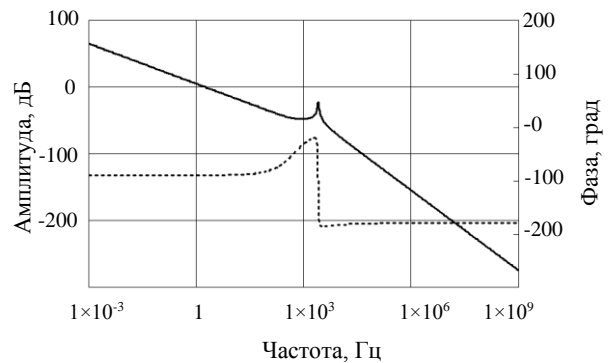


Рис. 7. АЧХ и ФЧХ передаточной функции «напряжение СГ – ток ПП» с введенным пропорционально-интегральным звеном: — — АЧХ передаточной функции; ----- — ФЧХ передаточной функции

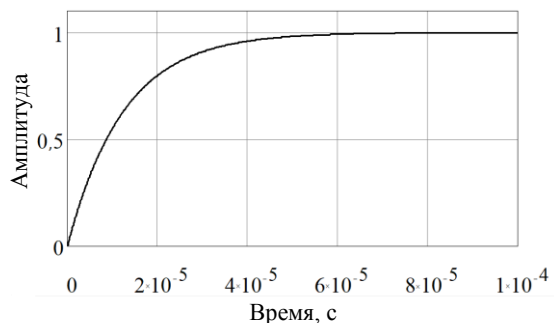


Рис. 8. Переходная характеристика передаточной функции «напряжение СГ – ток ПП» с введенным пропорционально-интегральным звеном

Имитационное моделирование

Имитационное моделирование проводится для дискретной модели, составленной в пакете прикладных программ математического моделирования PSIM.

Первый численный эксперимент проведен при набросе сигнала задания на ток q -координаты. На

рис. 9 показан переходной процесс в токе I_q . Как видно из осциллограммы, форма переходного процесса совпадает с переходной характеристикой, представленной на рис. 4.

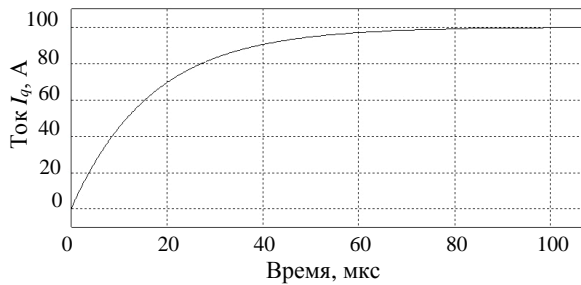


Рис. 9. Осциллограмма переходного процесса в токе I_q : задание на ток – 100 А; время регулирования – 100 мкс

Осциллограмма, представленная на рис. 10, демонстрирует переходной процесс напряжения в звене постоянного тока при набросе сигнала задания. Сравнивая формы переходного процесса и переходной характеристики, представленной на рис. 6, можно удостовериться в идентичности результатов.

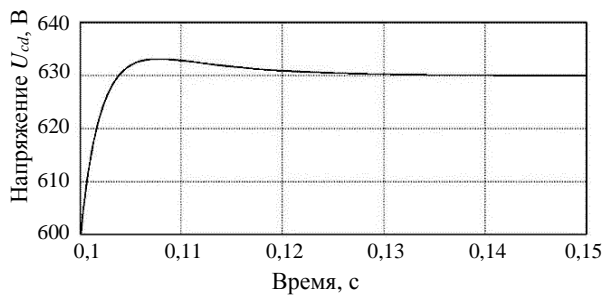


Рис. 10. Осциллограмма переходного процесса напряжения в звене постоянного тока u_{dc} при набросе задания: задание на напряжение – 630 В; время регулирования – 50 мс; перерегулирование – 10%

На рис. 11 представлена осциллограмма переходного процесса напряжения U_d на зажимах генератора при набросе задания. Полученный результат по форме переходного процесса аналогичен представленному на рис. 8.

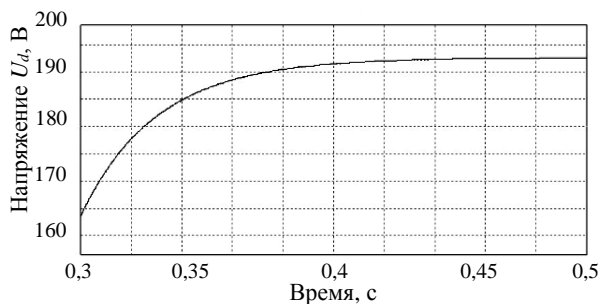


Рис. 11. Осциллограмма переходного процесса напряжения на зажимах генератора u_d при набросе задания: задание на напряжение – 193 В; время регулирования – 200 мс

Полученные осциллограммы переходных процессов полностью соответствуют рассчитанным параметрам.

Следующий эксперимент проведен для анализа динамических процессов в режиме стабилизации напряжения на зажимах генератора при сбросе и набросе нагрузки. На рис. 12 изображена осциллограмма переходного процесса.

Параметры переходного процесса при сбросе/набросе нагрузки

Сброс нагрузки со 160 до 10% от номинальной:

- время регулирования: 2,5 мс;
- пик напряжения: 260 В.

Наброс нагрузки с 10 до 160% от номинальной:

- время регулирования: 1,5 мс;
- пик напряжения: 40 В.

Также был проведен численный эксперимент при плавном изменении частоты генерируемого напряжения на зажимах СГ от минимального значения 360 Гц до максимального 380 Гц. Осциллограмма данного переходного процесса изображена на рис. 13.

Параметры переходного процесса при изменении частоты генерирования

Увеличение частоты с 360 до 720 Гц:

- время переходного процесса: 10 мс;
- время регулирования: 12 мс;
- пик напряжения: 180 В.

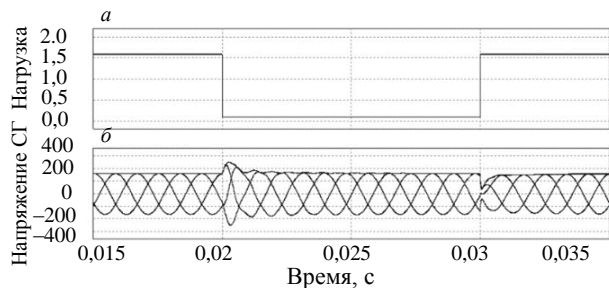


Рис. 12. Осциллограмма переходных процессов при сбросе и набросе нагрузки, уровень нагрузки (а), трехфазное напряжение на зажимах СГ (б)

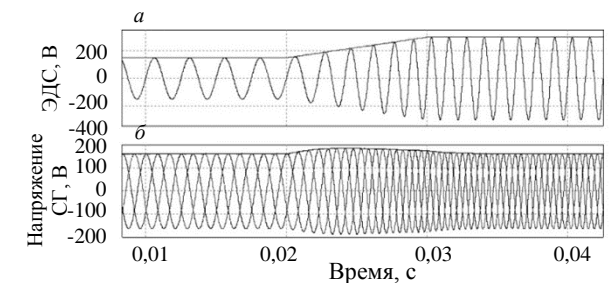


Рис. 13. Осциллограмма переходных процессов при плавном увеличении частоты генерируемого напряжения, ЭДС холостого хода (а), трехфазное напряжение на зажимах СГ (б)

Обсуждение результатов

В результате моделирования были получены переходные процессы, изображенные на рис. 9–13. Форма переходных процессов совпадает с формой, полученной при анализе переходных характеристик.

При моделировании СГЭЭ для режима стабилизации напряжения на зажимах СГ численный эксперимент импульсной нагрузкой показал удовлетворительные результаты в части устойчивости системы регулирования, однако полученные параметры пиковых напряжений не удовлетворяют ГОСТ Р 540073–2010. Следует заметить, что более точная настройка регуляторов способна дать лучший результат в сравнении с полученным. Численный эксперимент при изменении частоты генерируемого напряжения показал приемлемые результаты. Параметры переходного процесса удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 540073–2010.

Заключение

В данной работе исследованы динамические процессы в системе генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и параллельного полупроводникового преобразователя для летательных аппаратов. Предложены математическая модель системы и её линеаризованный вариант, с помощью их получены и исследованы частотные характеристики. Проведен синтез системы автоматического регулирования и произведен расчет регуляторов частотным методом. В ходе численных экспериментов получены адекватные результаты, удовлетворяющие теоретическим данным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00281.

Литература

1. Кутахов В.П. Полностью электрический самолет / В.П. Кутахов, С.А. Воронович, В.А. Каргопольцев // Авиапанорама. – 2009. – Т. 74, № 2. – С. 14–17.
2. Электрический самолет: от идеи до реализации / А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв. – М.: Машиностроение, 2010. – 288 с.
3. ГОСТ 54073–2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М.: Стандартинформ, 2011. – 39 с.
4. Принципы построения основных преобразовательных устройств электроэнергетического комплекса / А.В. Лёвин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалёв, А.А. Герасин, С.П. Халютин // Электрический самолет: концепции и технологии. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 388 с.
5. Барвинский А.П. Электрооборудование самолетов: учеб. для сред. спец. учеб. заведений / А.П. Барвинский, Ф.Г. Козлова. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
7. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 536 с.
8. Стабилизация напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной нагрузке / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, Д.В. Макаров, А.Г. Гарганеев // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1, ч. 1. – С. 139–146.
9. Авиационная система генерирования электроэнергии / С.А. Харитонов, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А.В. Левин, С.Ф. Коныхин, М.М. Юхнин // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 1. – С. 147–162.
10. Makarov D.V. Method of synchronization in power supply / D.V. Makarov, S.A. Kharitonov, M.A. Khoroshev // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 2016 13th International Scientific-Technical Conference on // IEEE. – 2016. – Т. 3. – P. 17–21.
11. Чаплыгин Е.Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 2009. – 56 с.
12. Erickson R.W. Fundamentals of Power Electronics. Second Edition. USA, NJ, Secaucus: Kluwer Academic Publishers, 2000. – 877 p.
13. Васильев К.К. Теория автоматического управления (следящие системы): учеб. пособие. – 2-е изд. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 98 с.
14. Middlebrook R.D. Small-Signal Modeling of Pulse-Width Modulated Switched-Mode Power Converters // Proceedings of the IEEE. – 1988. – Vol. 76, No. 4. – P. 343–354.
15. Ким Д.П. Теория автоматического управления. – Т. 1: Линейные системы. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.

Хорошев Максим Александрович

Аспирант каф. электроники и электротехники (ЭЭ)
Новосибирского государственного технического
университета (НГТУ)
Карла Маркса пр-т, д. 20, Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-893-18-68
Эл. почта: imxoiam1@gmail.com

Харитонов Сергей Александрович

Д.т.н., проф., директор Института силовой электроники,
зав. каф. ЭЭ НГТУ
Карла Маркса пр-т, д. 20, Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7 (383-3) 46-08-64
Эл. почта: Kharit1@yandex.ru

Khoroshev M.A., Kharitonov S.A.

Analysis of dynamic processes in the electric power generating system of variable frequency for aircrafts

The dynamic processes in the electric power generation system of variable frequency for aircraft «synchronous generator – semiconductor converter» type are analyzed. A mathematical model of the electric power system in a rotating coordinate system is proposed. The structure of the regulation system has been developed. The transfer characteristics for the analysis of the stability of the system has been received. Simulation modeling of the system's dynamic modes of operation under dynamic load and change in the frequency of the generated voltage was carried out.

Keywords: active rectifier, permanent magnet synchronous generator, aviation power supply system, closed loop control system, dynamic process, optimal control.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-103-110

References

1. Voronovich S.A., Kargopol'cev V.A. *Polnost'yu elektricheskij samolet* [All electric aircraft]. *Aviapanorama*, 2009, vol. 74, no 2, pp. 14–17.
2. Levin A.V., Alekseev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev L.K. *Elektricheskij samolet: ot idei do realizacii*. [Electric aircraft: from idea to implementation.]. М., Mashinostroenie Publ., 2010, 288 p.

3. GOST 54073–2010. *Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii* [State standard 54073–2010. Power supply systems for airplanes and helicopters. General requirements and standards for power quality]. M., Standartinform Publ., 2011, 39 p.
4. Levin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A., Kovalev K.L., Gerasin A.A., Khalyutin S.P. *Principy postroeniya osnovnykh preobrazovatel'nykh ustroystv elektroenergeticheskogo kompleksa* [Principles of construction of the main converting devices of the electric power complex]. *Electric Aircraft: concepts and technologies*. Ufa, UGATU Publ., 2014, 388 p.
5. Barvinskiy A.P., Kozlova F.G. *Elektrooborudovanie samoletov* [Aircraft electrical equipment]. M., Transport Publ., 1990, 320 p.
6. But D. A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny* [Contactless electrical machines]. M., Vysshaya shkola Publ., 1990, 416 p.
7. Kharitonov S.A. *Elektromagnitnye processy v sistemakh generirovaniya elektricheskoy energii dlya avtonomnykh ob"ektov* [Electromagnetic processes in systems for generating electrical energy for autonomous objects]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2011, 536 p.
8. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Makarov D.V., Garganeev A.G. [Synchronous generator with permanent magnets voltage stabilization with variable load]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 1, pt. 1, pp. 139–146 (in Russ.).
9. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Makarov D.V., Levin A.V., Konyakhin S.F., Yukhnin M.M. *Aviatsionnaya sistema generirovaniya elektroenergii* [Aviation power generation system]. Novosibirsk, Nauchnyy vestnik NSTU, 2013, no. 1, pp. 147–162 (in Russ.).
10. Makarov D.V., Kharitonov S.A., Khoroshev M.A. Method of synchronization in power supply. *Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 2016 13th International Scientific-Technical Conference on. IEEE, 2016, vol. 3, pp. 17–21.
11. Chaplygin E.E. *Spektral'noe modelirovanie preobrazovateley s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey* [Spectral modeling of pulse-width modulated converters]. M., MEI Publ., 2009, 56 p.
12. Erickson, Robert W. *Fundamentals of Power Electronics*. Second Edition. USA, NJ, Secaucus: Kluwer Academic Publishers, 2000, 877 p.
13. Vasil'ev K. K. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (sledyaschie sistemy)* [Automatic control theory (tracking systems)]. Ul'yanovsk, UIGTU Publ., 2001, 98 p.
14. Middlebrook R.D. Small-Signal Modeling of Pulse-Width Modulated Switched-Mode Power Converters. *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 4, 1988, pp. 343–354.
15. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy* [Automatic control theory. Vol. 1. Linear systems]. M., Phizmatlit Publ., 2003, 288 p.

Maxim A. Khoroshev

Phd student, Novosibirsk State Technical University
20, K. Marks pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone.: +7-913-893-18-68
Email: imxoiam1@gmail.com

Sergey A. Kharitonov

Director, Institute of Power Electronics, Head of the Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University
20, K. Marks pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone.: +7 (383-3) 46-08-64
Email: Kharit1@yandex.ru

УДК 621.314

А.В. Осипов

Определение характеристик фазовой подстройки частоты в последовательном резонансном преобразователе при широтно-импульсном регулировании

Рассмотрен изолированный последовательный резонансный преобразователь с широтно-импульсным регулированием. Установлено, что условия обеспечения переключения транзисторов при нулевом напряжении (ZVS) различны при регулировании инвертором и выпрямителем. Показано, что при нулевом напряжении может быть достигнуто только включение (ZVS-on) или выключение транзисторов (ZVS-off), что определяется знаком угла широтно-импульсного регулирования. Отмечено, что для обеспечения резонансного режима необходима фазовая автоподстройка частоты преобразования. Получены зависимости подстройки частоты от угла регулирования при регулировании инвертором и выпрямителем, установлено, что регулирование выпрямителем приводит к увеличению добротности резонансного контура и уменьшению подстройки частоты, которая в этом случае имеет конечное значение, определяемое начальной добротностью. Причем регулирование инвертором для сохранения резонансного режима требует существенно большего увеличения частоты.

Ключевые слова: последовательный резонансный преобразователь, двунаправленный изолированный преобразователь, включение при нуле напряжения, фазовая автоподстройка частоты.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-111-116

Изолированные преобразователи постоянного напряжения с промежуточным звеном переменного тока исследовались как в отечественной [1, 2], так и в зарубежной литературе, где данная топология носит название «двойной активный мост» (Dual Active Bridge) [3–5]. Такие преобразователи обеспечивают двунаправленную передачу энергии и позволяют произвольно согласовывать уровни напряжения источника и нагрузки, поэтому находят применение в системах электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии, в системах питания электромобилей и т.д. При этом проблема мягкого переключения транзисторов часто решается введением резонансного контура с образованием последовательного резонансного преобразователя [6–20]. Обеспечение регулирования напряжения в таком преобразователе является нетривиальной задачей, в частности, в [6] показано, что при широтно-импульсном регулировании резонансный преобразователь способен работать как в режиме понижения выходного напряжения, что обеспечивается регулированием инвертором, так и в режиме повышения, что обеспечивается регулированием активным выпрямителем.

Также в работе проведены исследования коммутационных процессов, направленные на обеспечение мягкого включения транзисторов преобразователя при нулевом напряжении ZVS для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов. Следует сказать, что ZVS-включение, конечно, актуально в высоковольтных преобразователях, однако при низковольтном выходе токи нагрузки достигают больших величин и гораздо важнее обеспечить благоприятное выключение транзисторов, что требует других подходов к организации регулирования.

Другим важным фактором, который следует учитывать при широтно-импульсном регулировании,

является появление при регулировании фазового сдвига между гармониками напряжения регулируемого моста и током контура, выводящего преобразователь из резонансного режима. Компенсация фазового сдвига обеспечивается фазовой автоподстройкой частоты, т.е. резонансный преобразователь является частотно-зависимым. Исследования способов и алгоритмов, динамических свойств подстройки частоты для резонансных преобразователей также проводились и изложены в [8–10]. Однако их практическая реализация часто требует определения величины частотной подстройки, зависящей от глубины регулирования преобразователя, волнового сопротивления контура, его добротности и т.д. Определение пригодных для инженерного расчета зависимостей является необходимым условием для проектирования преобразователя.

Целью настоящей работы является исследование характеристик фазовой подстройки частоты резонансного преобразователя при широтно-импульсном регулировании в режимах регулирования и стабилизации выходного напряжения, энергетических и регулировочных характеристик, определение условий мягкого включения транзисторов.

Широтно-импульсное регулирование в последовательном резонансном преобразователе

Изолированный резонансный преобразователь (рис. 1) построен на основе инвертора и активного выпрямителя, связанных между собой резонансным контуром. При поочередном переключении транзисторов, образующих диагонали инвертора с частотой, близкой к резонансной частоте контура, образованного дросселем L и конденсатором C , в контуре протекает синусоидальный ток, синфазный с напряжением инвертора. Выпрямитель работает синхронно с инвертором и обеспечивает обратное преобразование, на выходе выпрямителя формируется постоянное напряжение равное входному. Широтно-

импульсное регулирование выходного напряжения достигается введением в такт работы одного из мостов – инвертора или выпрямителя интервала закороченного состояния.

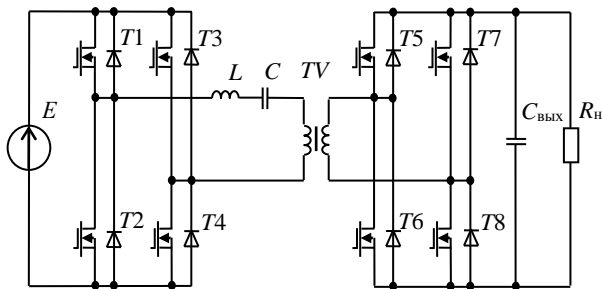


Рис. 1. Последовательный резонансный преобразователь

В частности, регулирование инвертором реализуется фазовым сдвигом управляющих импульсов транзисторов регулируемой стойки инвертора $T1, T2$ относительно нерегулируемой стойки $T3, T4$ на угол регулирования α (рис. 2). В результате на такте управления инвертором появляется интервал закороченного состояния его выхода (при открытой паре $T1, T3$ или $T2, T4$), регулируя длительность которого можно менять ширину импульсов напряжения $U_{инв}$ прикладываемого к колебательному контуру. При этом транзисторы нерегулируемой стойки инвертора по-прежнему переключаются синхронно с транзисторами выпрямителя, напряжение которого $U_{выпр}$ имеет максимальную ширину импульсов и синфазно с током резонансного контура I_k , что минимизирует динамические потери. Более подробно реализация широтно-импульсного регулирования в резонансном преобразователе рассмотрена в [6, 7].

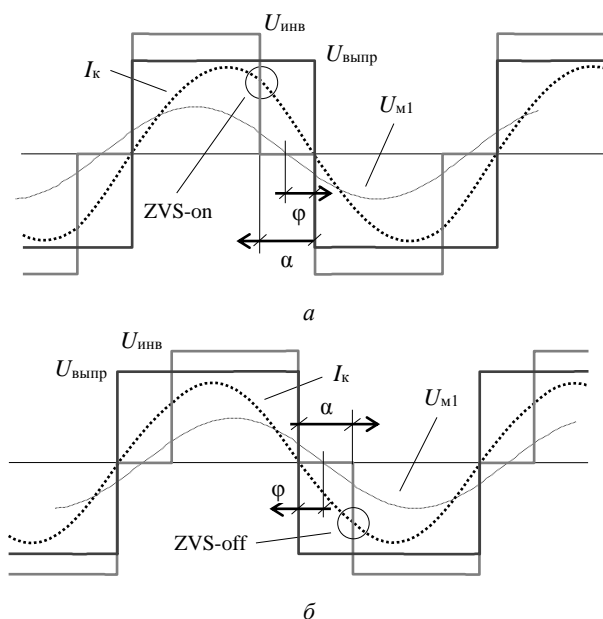


Рис. 2. Диаграммы работы резонансного преобразователя при регулировании инвертором при отрицательном угле регулирования – α , при положительном – β

При таком регулировании все транзисторы преобразователя, кроме транзисторов регулируемой стойки, выключаются при нулевом токе, а включа-

ются при нулевом напряжении в условиях ZCS+ZVS. Транзисторы регулируемой стойки инвертора, очевидно, коммутируют ненулевой ток. В этой связи следует отметить, что в общем случае угол регулирования α может быть, как отрицательным, что реализуется опережением управляющих импульсов регулируемой стойки инвертора (см. рис. 2, *а*), так и положительным, обеспечиваемым их запаздыванием (см. рис. 2, *б*). Это меняет не только расположение интервала закорачивания на полуwave тока резонансного контура, но и влияет на коммутационные процессы и условия обеспечения ZVS в транзисторах регулируемой стойки.

При отрицательном угле регулирования (см. рис. 2, *а*) коммутационные режимы рассмотрены в [6] и показано, что в регулируемой стойке инвертора реализуется ZVS-включение транзисторов, так как их коммутация происходит при направлении тока резонансного контура, перезаряжающем их паразитные емкости. При положительном угле регулирования инвертором $\alpha > 0$, коммутационные процессы в регулируемой стойке инвертора меняются (см. рис. 2, *б*). В этом случае происходит запаздывание момента переключения транзисторов регулируемой стойки относительно точки перехода тока контура через ноль, что обеспечивает обратную смену состояний – из закороченного состояния в состояние передачи энергии. В этом случае выключение транзистора происходит при нулевом напряжении, т.к. ток контура, протекая в прежнем направлении, открывает его обратный диод, обеспечивая условие ZVS-off. Однако происходящее после паузы включение другого транзистора стойки является жестким.

Широтно-импульсное регулирование напряжения выпрямителя реализуется аналогично регулированию инвертором и приводит к появлению интервала подключения резонансного контура непосредственно к инвертору, без нагрузки. Следовательно, такой способ регулирования приводит к уменьшению тока передаваемого в нагрузку относительно тока резонансного контура, поэтому такой режим является повышающим [6]. В выпрямителе знак угла регулирования также может быть различным и влияет на коммутационные процессы в его регулируемой стойке. Однако, коммутационные процессы в выпрямителе дуальны по отношению к процессам в инверторе, так как при передаче энергии направление протекания тока в выпрямителе сонаправлено с направлением включения обратного диода ключа. При отрицательном угле регулирования $\alpha < 0$ переключение транзисторов в регулируемой стойке опережает момент перехода тока контура через ноль (рис. 3, *а*). Поэтому выключение транзистора происходит при нулевом напряжении ZVS-off, т.к. ток контура, протекая в прежнем направлении, открывает его обратный диод. Включение другого транзистора стойки является жестким.

При положительном угле регулирования $\alpha > 0$ происходит запаздывание переключения транзисторов регулируемой стойки относительно точки смены направления тока контура (см. рис. 3, *б*). В этом случае выключение транзистора происходит жестко при

ненулевом токе контура, однако ток, протекая в прежнем направлении, отпирает обратный диод другого включаемого транзистора, обеспечивая в последующем условия ZVS-on.

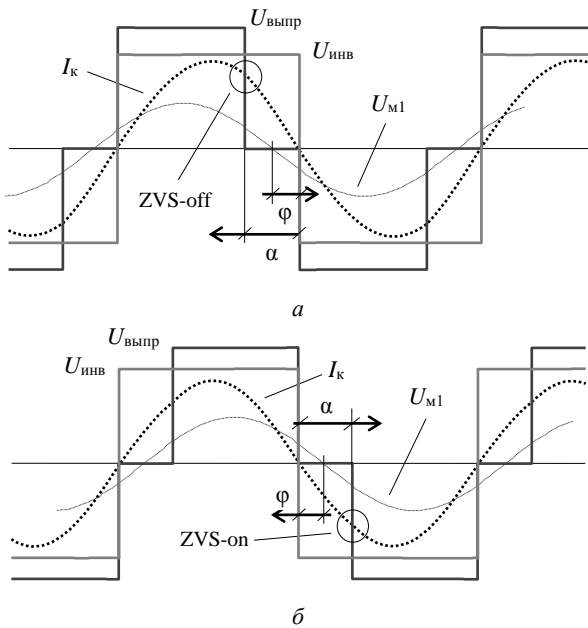


Рис. 3. Диаграммы работы резонансного преобразователя при регулировании выпрямителем при отрицательном угле регулирования – а, при положительном – б

Регулировочная характеристика резонансного преобразователя может быть получена заменой тока контура его первой гармоникой, так как ток является общим для инвертора и выпрямителя. При регулировании выпрямителем характеристика является обратной относительно режима регулирования инвертором, так как схема преобразователя симметричная. Характеристика получена в [6, 11]

$$\sigma U(\alpha) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \begin{cases} \cos^2(\alpha_{\text{ИНВ}}/2) \\ 1/\cos^2(\alpha_{\text{ВЫПР}}/2) \end{cases}, \quad (1)$$

и в общем виде показана на рис. 4.

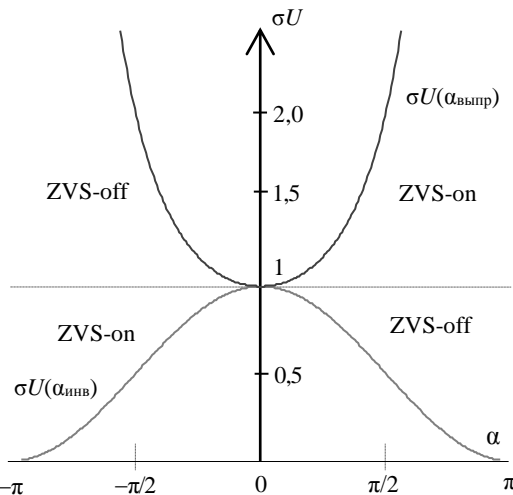


Рис. 4. Регулировочная характеристика резонансного преобразователя при широтно-импульсном регулировании

Можно отметить области регулирования инвертором при $\sigma U < 1$ и регулирования выпрямителем при $\sigma U > 1$, каждая из которых имеет симметричные участки включения транзисторов при нулевом напряжении ZVS-on и выключения при нулевом напряжении ZVS-off. Таким образом, можно отметить четыре квадранта, в которых может осуществляться регулирование, при этом можно выбрать наиболее эффективный режим коммутации. Очевидно, что в высоковольтных преобразователях следует выбирать ZVS-on, что уменьшит потери при включении, а в низковольтных, имеющих большой коммутируемый ток необходим ZVS-off.

Таким образом, пользуясь характеристикой, можно выбрать наиболее эффективный режим коммутации при регулировании, как в высоковольтных, так и в низковольтных преобразователях.

Определение частотной подстройки при регулировании инвертором

Особенностью резонансного преобразователя при широтно-импульсном регулировании является появление фазового сдвига между током контура I_k и первой гармоникой регулируемого напряжения U_{m1} . При регулировании инвертором в напряжение выпрямителя $U_{\text{выпр}}$ синфазно с током контура, а в инверторе первая гармоника напряжения должна быть сдвинута относительно тока на угол

$$\varphi = -\alpha_{\text{ИНВ}}/2, \quad (2)$$

что показано на рис. 2. Выполнение данного условия осуществляется фазовой подстройкой частоты. Математически связать угол сдвига гармоник тока и напряжения с частотой в резонансном инверторе позволяет фазо-частотная характеристика, определяемая соотношением

$$\text{tg}(\varphi) = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \frac{1}{R_{\text{ac}}}, \quad (3)$$

где R_{ac} – активное сопротивление выпрямителя по переменному току, определяемое

$$R_{\text{ac}} = \frac{8}{\pi^2} R_{\text{н}}. \quad (4)$$

В относительных единицах характеристика (3) примет вид

$$\text{tg}(\varphi) = \frac{\Omega^2 - 1}{\Omega} Q, \quad (5)$$

где $\Omega = \omega \sqrt{LC}$ – относительная частотная подстройка, $Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{R_{\text{ac}}}$ – добротность контура.

Приравнивая углы по соотношению (2) с учетом (3)–(5) получено квадратное уравнение

$$\Omega^2 - \frac{1}{Q} \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \Omega - 1 = 0, \quad (6)$$

решением которого является функция (рис. 5), описывающая величину частотной подстройки во всем диапазоне регулирования.

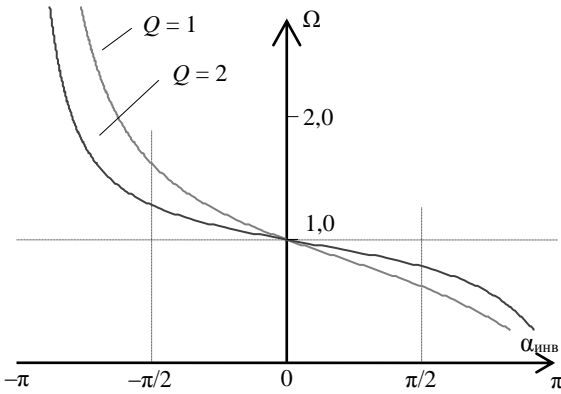


Рис. 5. Подстройка частоты в резонансном преобразователе при широтно-импульсном регулировании инвертором

Видно, что частотная подстройка может осуществляться, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения частоты, что определяется знаком угла регулирования

$$\begin{cases} \Omega > 1, & \text{при } \alpha_{\text{инв}} > 0, \\ \Omega < 1, & \text{при } \alpha_{\text{инв}} < 0, \end{cases}$$

так как первая гармоника регулируемого напряжения U_{m1} в одном случае опережает ток контура I_k (см. рис. 2, а), а в другом отстает (см. рис. 2, б). Регулирование в полном диапазоне тут фактически не возможно, так как

$$\lim_{\alpha \rightarrow -\pi} \Omega(\alpha_{\text{инв}}) \rightarrow \infty,$$

$$\lim_{\alpha \rightarrow \pi} \Omega(\alpha_{\text{инв}}) \rightarrow 0.$$

Кроме того, на величину подстройки частоты существенно влияет добротность резонансного контура, определяемая нагрузкой. Низкодобротный контур, что соответствует малым нагрузкам, требует больших значений подстройки частоты.

Определение фазовой подстройки частоты при регулировании выпрямителем

При широтно-импульсном регулировании выпрямителем условие фазовой подстройки частоты аналогично, текущий угол регулирования компенсируется фазовым сдвигом между током контура и первой гармоникой регулируемого напряжения. Соответственно, в выпрямителе первая гармоника напряжения должна быть сдвинута от тока на угол

$$\varphi = -\alpha_{\text{выпр}} / 2. \tag{7}$$

Однако при регулировании выпрямителем фазовая подстройка частоты имеет другой характер, так как активное сопротивление выпрямителя в этом режиме не является постоянной величиной, а зависит от угла регулирования и приведет к контуру согласно регулировочной характеристике

$$R_{\text{ас}} = \frac{8}{\pi^2} \cos^4\left(\frac{\alpha_{\text{выпр}}}{2}\right) R_{\text{н}}. \tag{8}$$

Это объясняется появлением в преобразователе интервала подключения резонансного контура непосредственно к инвертору без активной нагрузки, т.е. нагрузка подключается к преобразователю импульс-

но. Это приводит к росту добротности резонансного контура при регулировании, которая в этом случае является функцией угла

$$Q(\alpha_{\text{выпр}}) = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{\frac{8}{\pi^2} \cos^4\left(\frac{\alpha_{\text{выпр}}}{2}\right) R_{\text{н}}}, \tag{9}$$

или в относительных единицах

$$Q(\alpha_{\text{выпр}}) = \frac{Q_0}{\cos^4\left(\frac{\alpha_{\text{выпр}}}{2}\right)},$$

где Q_0 – добротность, соответствующая нулевому углу регулирования $\alpha = 0$. При фиксированном волновом сопротивлении резонансного контура добротность определяется пределом

$$\lim_{\alpha \rightarrow \pi} Q(\alpha_{\text{выпр}}) \rightarrow \infty.$$

Квадратное уравнение фазовой подстройки частоты с учетом (7–9) и переменного характера добротности примет вид

$$\Omega^2 - \frac{1}{Q_0} \cos^4\left(\frac{\alpha_{\text{выпр}}}{2}\right) \text{tg}\left(\frac{\alpha_{\text{выпр}}}{2}\right) \cdot \Omega - 1 = 0. \tag{10}$$

Графически его решение показано на рис. 6 в виде зависимостей подстройки частоты от угла (см. рис. 6, а) и глубины регулирования (см. рис. 6, б).

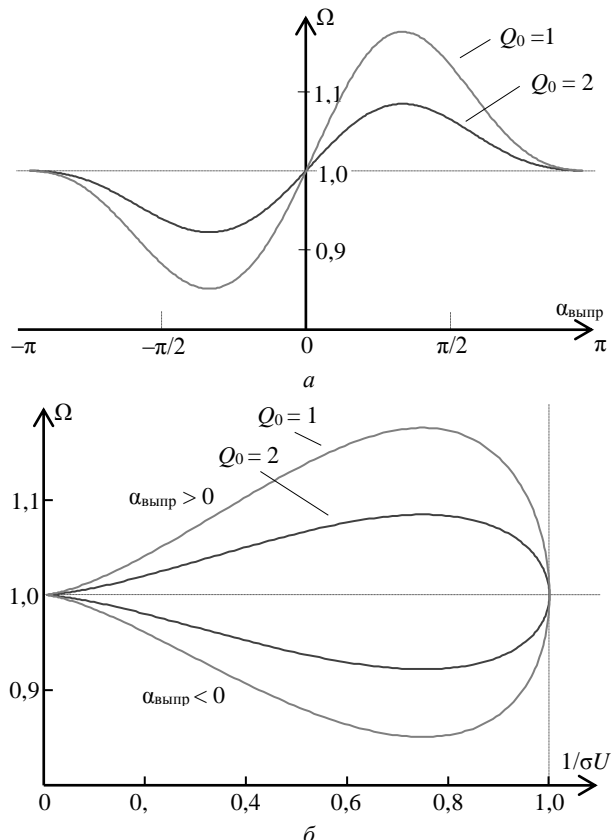


Рис. 6. Зависимость относительной подстройки частоты в резонансном преобразователе при широтно-импульсном регулировании выпрямителя от угла регулирования – а, от глубины регулирования – б

Зависимость подстройки частоты от глубины регулирования $\Omega(1/\sigma U)$ получена из (10) с учетом регулировочной характеристики. Видно, что подстройка частоты ограничена во всем диапазоне регулирования и имеет максимум на определенном угле регулирования, не зависящем от добротности контура. Характер зависимости объясняется тем, что в процессе регулирования происходит изменение не только угла регулирования, но и добротности, что и обеспечивает конечное значение максимальной величины частотной подстройки. Это является принципиальным отличием от режима регулирования инвертором, в котором подстройка частоты стремится к бесконечности при увеличении угла регулирования.

При значительных добротностях контура $Q_0 > 3$ можно использовать более простое выражение для фазовой подстройки частоты

$$\Omega(\alpha_{\text{выпр}}) = \frac{1}{2Q_0} \cos^4\left(\frac{\alpha_{\text{выпр}}}{2}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{\text{выпр}}}{2}\right) + 1,$$

позволяющее получить приемлемую точность практических расчетов.

Зависимость подстройки частоты от глубины регулирования (см. рис. 6, б) удобна при анализе в режиме стабилизации выходного напряжения. Можно отметить, что входное напряжение, соответствующее максимальному значению подстройки частоты, не зависит от нагрузки и определяется $U_{\text{вх}} = 0,74U_{\text{вых}}$.

Заключение

Анализ характеристик фазовой подстройки частоты в последовательном резонансном преобразователе показал, во-первых, зависимость направления подстройки (уменьшения или увеличения частоты) от знака угла регулирования, определяющего угол сдвига гармоник. Во-вторых, существенные отличия характеристик фазовой подстройки частоты в режимах регулирования инвертором и выпрямителем, в частности при регулировании выпрямителем подстройка частоты конечна даже в полном диапазоне изменения угла регулирования, что объясняется переменным характером добротности контура. На диапазон частотной подстройки в обоих случаях влияет добротность резонансного контура.

Установлена связь режимов коммутации транзисторов регулируемого моста со знаком угла регулирования. Возможность произвольного выбора режима коммутации регулируемой стойки позволяет реализовать ZVS при выключении, что актуально для преобразователей с низковольтным выходом.

Литература

1. Кобзев А.В. Модуляционные источники питания РЭА / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, Н.М. Музыченко. – Томск: Радио и связь, Том. отд., 1990 – 366с.
2. Голембиовский Ю.М. Двухнаправленный трехпортовый высокочастотный DC/DC-конвертор / Ю.М. Голембиовский, Д.Ю. Луков, М.Г. Коваль // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 100–105. DOI: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-100-105

3. Krismer F. Accurate Power Loss Model Derivation of a High-Current Dual Active Bridge Converter for an Automotive Application / F. Krismer, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – Vol. 57, No. 3. – P. 881–891.

4. Inoue S. A bidirectional isolated dc-dc converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system / S. Inoue, H. Akagi // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, No. 2. – P. 535–542.

5. Chiu H.-J. A bidirectional dc-dc converter for fuel cell electric vehicle driving system / H.-J. Chiu, L.-W. Lin // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 21, No. 4. – P. 950–958.

6. Последовательный резонансный преобразователь для систем электропитания от аккумуляторов / А.В. Осипов, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков, Е.В. Ярославцев, И.С. Шемолин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 103–110. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-103-110.

7. Вольтодобавочный последовательный резонансный преобразователь с изменяемой структурой для систем электропитания / А.В. Осипов, Е.В. Ярославцев, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 2. – С. 27–37.

8. Сахаров М.С. Динамическая модель резонансного преобразователя с Т-образным контуром / М.С. Сахаров, А.В. Осипов // Науч. вестник НГТУ. – 2017. № 4. – С. 47–66.

9. Земан С.К. Исследование цифровых систем фазовой автоматической подстройки частоты последовательного резонансного инвертора / С.К. Земан, А.В. Осипов, М.С. Сахаров // Электротехника. – 2008. – № 1. – С. 28–35.

10. Земан С.К. Исследование влияния параметров управляющего воздействия на характеристики системы фазовой автоматической подстройки частоты последовательного резонансного инвертора / С.К. Земан, А.В. Осипов, М.С. Сахаров // Электротехника. – 2008. – № 10. – С. 57–62.

11. Земан С.К. Многоячейковые регулируемые резонансные преобразователи частоты с многозонной модуляцией в системах высокочастотного индукционного нагрева / С.К. Земан, А.В. Осипов // Электротехника. – 2006. – № 4. – С. 49–56.

12. Li X. Analysis and Design of High-Frequency Isolated Dual-Bridge Series Resonant DC/DC Converter / X. Li, A.K.S. Bhat // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – Vol. 25, No. 4. – P. 850–862.

13. Chen W. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss / W. Chen, P. Rong, Z.Y. Lu // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2010. – Vol. 57, No. 9. – P. 3075–3086.

14. Minimum current operation of bidirectional dual-bridge series resonant DC/DC converters / L. Corradini, D. Seltzer, D. Bloomquist, R. Zane, D. Maksimovic, B. Jacobson // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27, No. 7. – P. 3266–3276.

15. Doncker De R.W.A.A. A threephase soft-switched high-power-density DC/DC converter for highpower applications / R.W.A.A. De Doncker, D.M. Divan, M.H. Kheraluwala // IEEE Transaction on Industry Applications. – 1991. – Vol. 27, No. 1. – P. 63–73.

16. Jang Y. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter / Y. Jang, M. M. Jovanovic // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, No. 5. – P. 987–994.

17. Nguyen D.D. Dual-active-bridge series resonant converter: A new control strategy using phase-shifting combined frequency modulation. / D.D. Nguyen, D.T. Nguyen, G. Fujita // IEEE Conference Publications. – 2015. – No. 10. – P. 1215–1222.

18. Burdío J. Comparison study of fixed-frequency control strategies for ZVS dc/dc series resonant converters /

J. Burdio, F. Canales, P. Barbosa, F. Lee // Power Electronics Specialists Conference (PESC). – 2001. – Vol. 1. – P. 427–432.

19. Oggier G.G. Switching Control Strategy to Minimize Dual Active Bridge Converter Losses / G.G Oggier, G.O Garcia, A.R. Oliva // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No.7. – P. 1826–1838.

20. Watson R. Analysis, design and experimental results of a 1-kW FB-ZVS-PWM converter employing magamp secondary side control / R. Watson, F.C. Lee. – IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1998. – Vol. 45, No. 5. – P. 806–814.

Осипов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, зав. лаб. каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники
Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-44-75
Эл. почта: ossan@mail.ru

Osipov A.V.

Characterization of phase adjustment of frequency in a series resonant converter with pulse-width regulation

The article considers an isolated serial resonant converter with pulse-width regulation. It is established that the conditions for ensuring the switching of transistors at zero voltage (ZVS) are different when regulated by an inverter and a rectifier. It is shown that at zero voltage, only turning on (ZVS-on) or turning off transistors (ZVS-off) can be achieved, which is determined by the sign of the pulse-width regulation angle. It is noted that to ensure the resonant mode, phase-locked loop conversion frequency is necessary. The dependences of the frequency adjustment on the angle of regulation during regulation by the inverter and the rectifier are obtained, it is established that the regulation by the rectifier leads to an increase in the quality factor of the resonant circuit and a decrease in the frequency adjustment, which in this case has a final value determined by the initial quality factor. Moreover, the regulation of the inverter to maintain the resonant mode requires a significantly larger increase in frequency.

Keywords: series resonant converter, dual active bridge, ZVS, phase locked loop.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-111-116

References

1. Kobzev A.V., Mihal'chenko G. Ja., Muzychenko N.M. *Moduljacionnye istochniki pitaniya REA* [Modulation Power Supplies]. Tomsk: Radio i svjaz', Tomskij otdel [Tomsk: Radio and communications, Tomsk department], 1990, 366 p. (in Russ.).
2. Golembiovsky Yu.M., Lukov D.Yu., Koval M.G. [Bidirectional three-port high-frequency DC/DC-converter]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 100–105. doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-100-105. (in Russ.).
3. Krismer F., Kolar J.W. Accurate Power Loss Model Derivation of a High-Current Dual Active Bridge Converter for an Automotive Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 57, no. 3, pp. 881–891.
4. Inoue S., Akagi H. A bidirectional isolated dc-dc converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 535–542.
5. Chiu H.-J., Lin L.-W. A bidirectional dc-dc converter for fuel cell electric vehicle driving system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 21, no. 4, pp. 950–958.
6. Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Yaroslavtsev E.V., Shemolin I.S. [Series resonant converter for discharge of bat-

teries space vehicles power systems]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 103–110. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-103-110 (in Russ.).

7. Osipov A.V., Yaroslavtsev E.V., Burkin E.Yu., Sviridov V.V. [Booster series resonant transformer with variable structure for power supply system's]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no 2, pp. 27–37 (in Russ.).

8. Sakharov M.S., Osipov A.V. [A dynamic model of resonant LCL-T converter]. *Science Bulletin of the NSTU*, 2017. no. 4, pp. 47–66 (in Russ.).

9. Zeman S.K., Osipov A.V., Sakharov M.S. [Research of digital systems of phase automatic frequency control of a serial resonant inverter]. *Electrical engineering*, 2008, no. 1, pp. 28–35 (in Russ.).

10. Zeman S.K., Osipov A.V., Sakharov M.S. [Investigation of the influence of the parameters of the control action on the characteristics of the phase-locked loop system]. *Electrical engineering*, 2008, no. 10, pp. 57–62 (in Russ.).

11. Zeman S.K., Osipov A.V. [Multi-cell adjustable resonant frequency converters with multi-zone modulation in high-frequency induction heating systems]. *Electrical engineering*, 2006, no. 4, pp. 49–56 (in Russ.).

12. Li X., Bhat A.K.S. Analysis and Design of High-Frequency Isolated Dual-Bridge Series Resonant DC/DC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, pp. 850–862.

13. Chen W., Rong P., Lu Z. Y. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 57, no. 9, pp. 3075–3086.

14. Corradini L., Seltzer D., Bloomquist D., Zane R., Maksimovic D., Jacobson B. Minimum current operation of bidirectional dual-bridge series resonant DC/DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012 vol. 27, no. 7, pp. 3266–3276.

15. De Doncker R.A., Divan D.M., Kheraluwala M.H. A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for highpower applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1991.vol.27, no. 1, pp. 63–73.

16. Jang Y., Jovanovic M. M. New PWM ZVS Full-Bridge Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007. vol. 22, no. 5, pp. 987–994.

17. Nguyen D.D., Nguyen D.T., Fujita G Dual-active-bridge series resonant converter: A new control strategy using phase-shifting combined frequency modulation. *IEEE Conference Publications*, 2015, no. 10, pp. 1215–1222.

18. Burdio J., Canales F., Barbosa P., Lee F. Comparison study of fixed-frequency control strategies for ZVS dc/dc series resonant converters. *Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 2001, vol. 1, pp. 427–432.

19. Oggier G.G., Garcia G.O., Oliva A.R. Switching Control Strategy to Minimize Dual Active Bridge Converter Losses. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 24, no. 7, pp. 1826–1838.

20. Watson R., Lee F.C. Analysis, design and experimental results of a 1-kW FB-ZVS-PWM converter employing magamp secondary side control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, vol. 45, no. 5, pp. 806–814.

Alexander V. Osipov

Candidate of Engineering Science, Head of laboratory, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-44-75
Email: ossan@mail.ru

УДК 621.313.2

А.А. Шилин, П.М. Момот, В.Г. Букреев

Оценка скорости вращения электродвигателя по спектральному составу тока потребления

Представляется методика оценки скорости вращения электродвигателя на основе анализа спектрального состава тока потребления. Принцип оценки основан на том факте, что частота первой гармоники в спектральном составе потребляемого тока пропорциональна скорости вращения двигателя. В отличие от известных методов определения скорости вращения двигателя используется узкополосный фильтр с настраиваемыми значениями частоты и добротности для выделения синусоидальной формы первой гармоники. Реализация алгоритма оценки осуществляется на микроконтроллере, который обеспечивает замкнутый контур для настройки частоты и добротности узкополосного фильтра. В качестве альтернативы быстрому преобразованию Фурье предложен оригинальный алгоритм поиска первой гармоники потребляемого тока. Результаты эксперимента получены на микроконтроллере AtMega328.

Ключевые слова: оценка скорости вращения электродвигателя, микроконтроллер, спектральный анализ.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-117-124

Существует несколько методов бездатчикового определения скорости вращения электродвигателей постоянного тока [1–3]. В этих методах информация о скорости вращения получается на основе анализа тока потребления от источника энергии и напряжения на двигателе. Вследствие того, что во время вращения ротора происходит переключение секций двигателя, ток потребления имеет периодические колебания, которые можно использовать для определения его скорости. Так, например, в публикации [1] предложено использовать компаратор, чтобы получить прямоугольный сигнал, из которого можно получить период колебаний или непосредственно вычислить количество импульсов на определенном временном интервале. Однако, используя широтно-импульсный модулятор (ШИМ), исходная информация значительно искажается и возникает проблема формирования прямоугольного сигнала в результате ложного срабатывания компаратора.

Более надежным методом расчета является метод компенсации IR [4]. Этот метод, представленный в публикации [5], позволяет обеспечить качественную оценку параметров и электромагнитного момента двигателя. При этом ошибка определения скорости вращения двигателя может быть значительной. По данным публикации [6], ошибка измерения составляет 2% и в некоторых способах – больше чем 10%. Эти значения были получены при условии выполнения нескольких экспериментов в системе управления двигателем с датчиком скорости.

В современных публикациях приведена реализация методов [1–3, 7] на микроконтроллерах с использованием ШИМ, где главные идеи представлены сложными алгоритмами и низкочастотной фильтрацией измеряемого сигнала. Проблема получения качественной формы первой текущей гармоники не полностью решена низкочастотным фильтром, так как возникающая помеха от ШИМ в некоторых способах производит ложное переключение компаратора.

Как альтернативное решение рассматриваемым подходам вычисления скорости двигателя можно

использовать алгоритм на основе анализа текущего спектра потребляемого тока [8–10]. Для этого сигнал измеренной текущей скорости анализируется на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). Далее используется довольно сложный алгоритм с автокорреляцией и наблюдателем состояния [11–13]. Применяя такой метод, ошибка определения скорости вращения не превышает 0,03% [8]. Однако алгоритм реализуется на персональном компьютере, что не позволяет использовать эту идею во встроженных системах на микроконтроллерах.

После сравнения существующих методов авторами предлагается метод определения скорости вращения двигателя на основе анализа текущего спектра тока потребления с использованием узкополосного фильтра (УПФ).

Модуль регулирования частоты на базе узкополосного фильтра

Как уже отмечалось выше, спектральная форма тока потребления значительно отличается от синусоидального вида, поскольку содержит множество дополнительных гармоник (рис. 1). Особенно сильно это выражено при использовании ШИМ с высокой частотой переключения. В верхней части рисунка показан ток потребления двигателя, где отчетливо наблюдается первая гармоника, которая совпадает с частотой переключения его секций. Измеряемые значения тока двигателя отображаются в относительных единицах.

По исходной форме сложно вычислить период колебаний, поскольку необходим качественный прямоугольный меандр или синусоидальный сигнал. Однако если предположить, что в какой-то момент времени можно оценить частоту первой гармоники в 10% диапазоне, например, в области (0,915–1,085) относительно реальной частоты, то можно применить узкополосный фильтр. В нижней части рис. 1 представлен сигнал на выходе УПФ, где получена весьма качественная форма сигнала, состоящая преимущественно из первой гармоники [14].

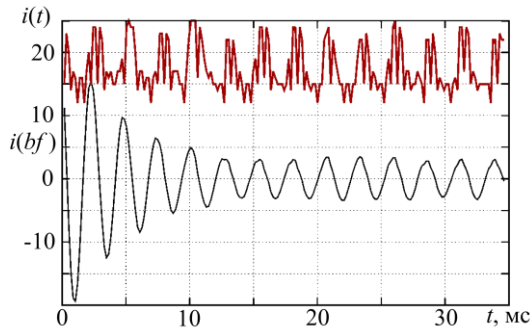


Рис. 1. Вычисление первой гармоники на выходе УПФ

По такой форме уже не сложно составить программу вычисления периода сигнала или частоты. Передаточная функция такого фильтра представлена выражением [23]

$$W(s) = \frac{kbs}{s^2 + bs + a}, \quad a = (2\pi f_f)^2, \quad b = \frac{2\pi f_f}{q}, \quad (1)$$

где k – коэффициент передачи фильтра на резонансной частоте. Качество сигнала зависит от добротности q , которая связана с полосой пропускания согласно выражению

$$q = \frac{f_f}{(f_{\max} - f_{\min})}, \quad (2)$$

где коэффициент передачи k на частоте резонанса отличается от отношения передачи на граничных частотах f_{\max} и f_{\min} полосы пропускания на 3 дБ. Разностное уравнение фильтра, пригодное для программирования, может быть получено с помощью дискретного преобразования или билинейного преобразования непосредственно из передаточной функции. Также разностное уравнение можно получить на основе дифференциального уравнения, записывая его на конечных интервалах времени:

$$y(t + \Delta t) = 2y(t) - y(t - \Delta t) - a_d y(t) + b_d (x(t) - x(t - \Delta t) - y(t) + y(t - \Delta t)), \quad (3)$$

$$a_d = \Delta t^2 a, \quad b_d = b \Delta t,$$

где Δt – выборка времени или интервал времени в дифференциальном уравнении. Разностное уравнение, полученное последним способом, менее точное, но при этом содержит меньшее количество вычислений.

На рис. 1 показана форма первой гармоники на выходе УПФ в условиях, когда на форму тока потребления значительно влияет спектр ШИМ. Определено, что реальная частота первой гармоники соответствует 380 Гц, а параметры фильтра следующие:

$$f_{bf} = 300 \text{ Гц}, \quad q = 5,92.$$

Заметим, что измерение периода возможно даже при невыполнении условия (2) и отличии реальной частоты первой гармоники от частоты УПФ ($380 - 300 / 300 = 26,7\%$). Как только частота первой гармоники определяется, то можно точно настроить частоту УПФ с последующим увеличением его добротности. В этом случае приближение становится

более качественным и принимает синусоидальную форму [15]. Блок-схема модуля подстройки частоты УПФ представлена на рис. 2.

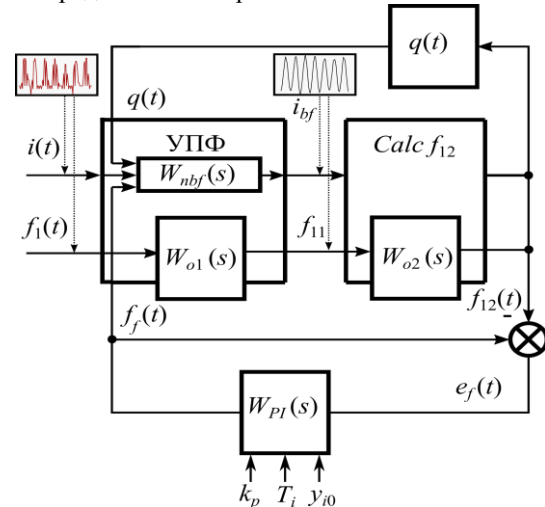


Рис. 2. Структурная схема модуля подстройки частоты УПФ: Calc – блок вычисления реальной частоты; PI – ПИД-регулятор

Основной задачей устройства является подстройка частоты и добротности УПФ. Значение частоты формируется на выходе ПИ-регулятора. Динамика УПФ представлена двумя передаточными функциями: по форме тока (1) и по частоте первой гармоники:

$$W_{o1,2}(s) = \frac{1}{1 + T_{f1,2}s}. \quad (4)$$

Постоянные времени передаточных функций определяются при условии, что переходный процесс на выходе УПФ записывается формулой Эйлера. Тогда корни характеристического уравнения передаточной функции (1) принимают вид

$$T_{f1} = \frac{2}{b} = \frac{q}{\pi f_f}. \quad (5)$$

Для численных данных, представленных на рис. 1, имеем следующее значение постоянной времени:

$$T_f = \frac{5,92}{300\pi} \approx 6,28 \text{ мс}.$$

Поскольку длительность переходного процесса примерно в три раза больше постоянной времени, то по форме затухания колебания можно вычислить ее значение после мгновенного изменения частоты первой гармоники относительно частоты УПФ. На рис. 1 этот процесс представлен для 27% рассогласования частоты гармоники сигнала и УПФ. Отметим, что при переходе к новому значению частоты наблюдается затухающее колебание, следовательно, передаточная функция (4) может использоваться для синтеза ПИ-регулятора.

Точность измерения может быть улучшена, если вычислять средний период первой гармоники за значительный промежуток времени, используя при этом УПФ с высокой добротностью. Однако в этом случае, постоянная времени системы измерения ча-

стоты также увеличивается пропорционально с количеством усреднения периодов первой гармоники. Кроме того, высокая добротность УПФ увеличивает время затухания колебаний от предыдущих частот скорости вращения или резонансной частоты УПФ. Этот эффект явно выражается на рис. 1, особенно на первых 10 мс выходного сигнала УПФ. Значительная инерционность системы измерения частоты может вызвать запаздывание при определении частоты, особенно с внезапными изменениями в скорости вращения двигателя. По этой причине актуальна проблема поиска оптимального метода вычисления частоты, добротности и длительности постоянной времени усреднения предполагаемой скорости вращения.

Передачная функция разомкнутой цепи автоматического регулирования частоты фильтра представлена выражением

$$W_{\text{орп}}(s) = \frac{k_p(1+T_i s)}{T_i s(1+T_{o1}s)^2}. \quad (6)$$

В рассматриваемой задаче достаточно использовать симметричный оптимум для вычисления по выражению (5) постоянной времени интегрирования регулятора. Коэффициент передачи в системе (6) можно определить при обеспечении 10% перерегулирования согласно уравнениям

$$T_i = T_{o1}; \quad k_p \approx 0,7. \quad (7)$$

Существуют также другие методы для настройки ПИ-регулятора, которые можно использовать для решения рассматриваемой задачи [16–19].

На практике необходимо гарантировать быстрое выполнение оценки скорости двигателя, чтобы замкнутая система успевала отследить изменение частотного сигнала. Очевидно, что максимальный уровень изменения частоты будет определяться с учетом свойств механической системы, связанной с валом двигателя.

Процедура первоначального запуска

Для качественного функционирования системы слежения для первой гармоники должно быть выполнено условие: реальная частота первой гармоники должна быть в зоне полосы пропускания УПФ. Это условие может быть не выполнено в нескольких характерных случаях:

- запуск алгоритма, когда частота все еще неизвестна;
- мгновенное изменение скорости вращения двигателя вследствие механического удара, когда быстрействия системы слежения недостаточно;
- старт вращения двигателя после его штатной полной остановки.

Для решения этой задачи можно использовать быстрое преобразование Фурье, чтобы предварительно оценить спектр сигнала. Однако этот метод требует значительных вычислений и объема памяти, необходимого для хранения измеренного ряда значений на время расчета спектра сигнала.

Современные контроллеры в состоянии вычислить ряд Фурье достаточно быстро, однако проблема

выделения большого объема памяти не разрешима для многих микроконтроллеров. В частности, размер памяти AtMega328 составляет 2 Кб, это не больше чем 500 измерений в формате с плавающей запятой.

Если попытаться решить проблему нахождения первой гармоники посредством недорогих микроконтроллеров, то можно выполнить анализ частотной характеристики спектра, используя измерения с фиксированной точкой. Чтобы получить оптимальный алгоритм вычисления, используем целочисленную арифметику, где значения могут быть представлены в виде нормальных дробей. Это теоретически позволяет уменьшить требуемый объем памяти примерно в 4 раза.

Авторами предложен алгоритм поиска частоты, используя систему слежения с УПФ. Логика алгоритма заключается в следующем:

- в соответствии с минимальным напряжением, которому соответствует минимальная скорость вращения двигателя, выбирается минимальная частота УПФ. То есть УПФ настроена на самую низкую частоту первой гармоники, в результате которой мощность, сосредоточенная в области пропускания УПФ, может быть вычислена.

- далее частота УПФ увеличивается со скоростью соразмерной постоянной времени передаточной функции (6), характеризующей инерционные свойства УПФ.

Очевидно, когда частота настройки УПФ приблизится к частоте первой гармоники, мощность сигнала значительно увеличится. С дальнейшим увеличением частоты мощность сигнала снова значительно понизится. Конечно, такой формат для вычисления частотной характеристики (рис. 3) нельзя назвать Фурье-преобразованием.

Однако главная задача приблизительного нахождения частоты первой гармоники в пределах 10% может быть вполне реализуема. При этом требования к объему памяти очень скромны, так как достаточно зафиксировать 3 или 4 характерные точки спектра частотной характеристики, чтобы вычислить область частоты первой гармоники.

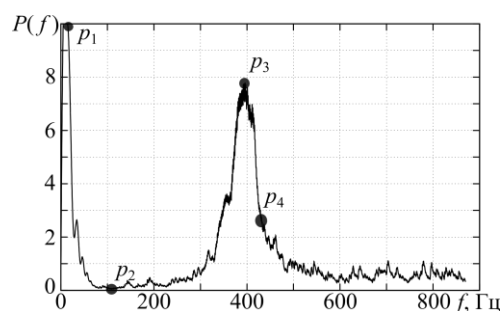


Рис. 3. Частотная характеристика в области 1-й гармоники

В этом случае объем вычисления будет несколько больше, чем при использовании БПФ. Время вычисления также больше чем на порядок, но это связано с вычислительными ресурсами микропроцессора. Блок-схема модуля оценки спектра показана на рис. 4.

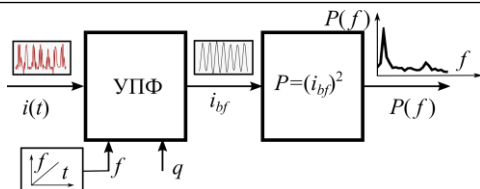


Рис. 4. Блок-схема модуля поиска области 1-й гармоники

Условия для корректного вычисления области частоты первой гармоники могут быть представлены в виде

$$f_f = f(p_3), \text{ if } \left\{ \begin{array}{l} P(p_1) > P(p_2), \\ P(p_3) > 3P(p_2), \\ P(p_3) > 3P(p_4). \end{array} \right. \quad (8)$$

Выполнение условия (8) является условием для переключения датчика скорости к режиму функционирования системы слежения частоты.

Результаты эксперимента

Для выполнения эксперимента авторы использовали плату Arduino-Nano с процессором AtMega328. Скорость работы АЦП может превышать скорость передачи данных по последовательному порту, поэтому основной цикл программного обеспечения контролера выполнен на прерываниях от последовательного порта на стандартной скорости 57 600 килобит с одним стоп-битом. В этом случае частота передачи одного байта будет в 10 раз меньше, следовательно, соответствующее этой частоте время дискретизации составит $(5,760)^{-1}$. В результате массив данных измерения тока потребления может быть передан на персональный компьютер для дальнейшей обработки.

После включения контура регулирования частоты, как и предполагалось, значительно улучшилось качество сигнала (см. рис. 1). Погрешность оценки частоты вращения при условии стабильного вращения вала двигателя и настроенного УПФ составила 1%. Небольшая разрядность АЦП и нестабильная скорость вала двигателя стали препятствием для получения более точной оценки частоты вращения для предложенного метода. Тем не менее можно утверждать, что для рассматриваемого двигателя точность измерения частоты составляет 1,0%.

На рис. 5 показаны результаты эксперимента для случая, когда в настроенной системе скорость вращения изменяется от 300 до 390 оборотов в секунду.

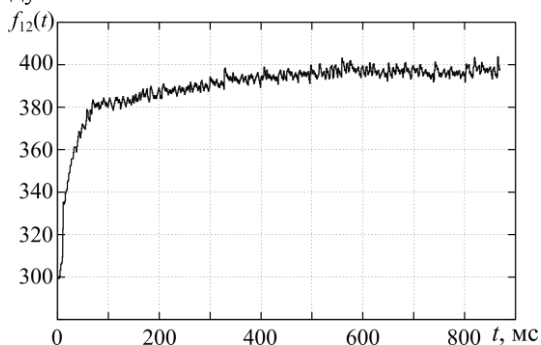


Рис. 5. Переходный процесс изменения частоты на выходе УПФ

Постоянная времени УПФ составляет чуть более чем 50 мс. По переходному процессу можно увидеть, что основное изменение частоты оборотов двигателя отслеживается в течение 50 мс. Для обеспечения точности измерения частоты требуется приблизительно 500 мс.

Реализация алгоритма на микроконтроллере в реальном времени

Результаты, представленные в предыдущем разделе, получены на персональном компьютере и не в реальном времени, поскольку массив измерения тока был представлен в виде файла. Однако для полноценного управления работа фильтра УПФ должна быть реализована на частоте дискретизации поступающего сигнала от АЦП.

В процессе выполнения эксперимента частота дискретизации была ограничена скоростью передачи данных в персональный компьютер, при скорости 57600 бод частота составляла 5760 Гц. Для реализации фильтра на такой частоте дискретизации требуется весьма производительный процессор или даже дорогой сигнальный процессор.

Для оценки характеристик процессора определим минимальную частоту дискретизации фильтра

$$f_f = \frac{N_e n k}{60}, \quad (9)$$

где N_e – количество оборотов в минуту электродвигателя, n – количество обмоток двигателя, k – число, которое должно быть больше двух на основании теоремы Котельникова. В процессе исследования работы цифрового фильтра (3) выяснилось, что это число должно быть не менее 8.

Авторам известны высокоскоростные двигатели с $N_e = 20000$ и $n = 12$. Тогда на основании выражения (9) минимальная частота дискретизации будет равна 32 кГц. Наиболее распространенные имеют следующие характеристики: $N_e = 6000$ и $n = 6$, при которых требуется минимальная частота дискретизации равный 4,8 кГц.

Для того чтобы оценить возможность работы устройства в реальном времени, разработана программа для микроконтроллера. Она выполняет в основной петле программы 10^5 циклов вычисления работы фильтра, где все элементы выражения (3) представлены в виде чисел с плавающей точкой. Счет реального времени выполнен на прерываниях таймера. Максимально возможную частоту дискретизации можно оценить по выражению

$$f_{f_{\max}} = \frac{10^5}{N_{\text{tick}}} f_{\text{tick}}. \quad (10)$$

Результаты вычислений частоты дискретизации f_{\max} и количества тактов на выполнение процедуры N_{cck} для двух типов процессоров AtMega328 и STM32F103 сведены в таблицу. Как видно, из таблицы, использование арифметических операций на числах с плавающей точкой требует значительных ресурсов процессора и не может обеспечить необходимую частоту дискретизации для обоих типов двигателей, представленных выше.

Результаты оценки скорости вычисления

Параметры	AtMega328	STM32F103
f_{max} (float)	10,28 кГц	69,982 кГц
N_{csk} (float)	1557 тактов	1029 тактов
f_{max} (int)	83,95 кГц	845,715 кГц
N_{csk} (int)	191 такт	85 тактов

Процесс вычисления можно значительно ускорить, если воспользоваться методами целочисленной арифметики. Для микропроцессора STM32F103 такой подход может оказаться весьма эффективным, поскольку в нем имеется аппаратная реализация операций умножения и деления для целых чисел.

Вычислительный алгоритм представлен в виде 3 шагов:

- выражение (3) следует записать в виде целых чисел, где нецелочисленные параметры представлены в виде нормальных дробей;
- для всех элементов полученного выражения выполняется оценка требуемого диапазона измерения;
- выбирается очередность вычисления элементов выражения с целью минимизации разрядности промежуточных чисел.

Для полной оптимизации такой подход требует математической формализации преследуемой цели в виде функционала. В этом случае можно воспользоваться алгоритмами, реализующими вариационную задачу, при условии удачно выбранного функционала. Обобщенное решение такой задачи найти достаточно сложно, поэтому в статье преследуется цель подчеркнуть только актуальность ее решения.

В выражении (3) все переменные состояния можно представить в виде целых чисел, кроме двух параметров a_d и b_d . На примере параметра a_d , значения которого можно определить в виде

$$a_d = \frac{A}{D} = (2\pi f \Delta t)^2, \tag{11}$$

где A и D – целые числа. Основной задачей является вычисление оптимального значения знаменателя D . Чем больше его значение, тем более точно можно задать частоту фильтра в более широком диапазоне. Однако увеличение этого числа приводит к увеличению разрядности чисел в разностном уравнении (3).

Входными данными являются следующие величины:

- диапазон частот фильтра, представленный в виде отношения $l_w = f_{max} / f_{min}$;
- относительный шаг μ приращения настраиваемой частоты f .

Составим систему уравнений в области минимальных значений f_{min} :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = (2\pi f_{min} \Delta t)^2 D, \\ A+1 = (2\pi f_{min} (1+\mu) \Delta t)^2 D. \end{array} \right. \tag{12}$$

Произведение $f_{min} \Delta t$ можно выразить через частоту дискретизации

$$f_{min} \Delta t = \frac{f_{max}}{l_w \Delta t^{-1}} = \frac{f_{max}}{l_w f_{max} k} = \frac{1}{l_w k}$$

и подставить в (12). Вычитая из второго выражения первое, получим уравнение

$$\left(\frac{2\pi}{l_w k}\right)^2 D \left((1+\mu)^2 - 1 \right) = 1.$$

Из этого уравнения выражаем знаменатель:

$$D = \left(\frac{l_w k}{2\pi}\right)^2 \mu (2+\mu).$$

Для значений $\mu = 0,1$; $l_w = 10$; $k = 8$ оптимальное значение знаменателя будет равно $D = 773$.

С точки зрения скорости вычисления на 8-разрядных процессорах значение D следует выбирать из ряда значений 2^n ; $n \in (1, 2, \dots, 32)$. Это позволяет заменить операцию деления более быстродействующей операцией сдвига. Ближайшее большее значение будет равно $2^{10} = 1024$.

В результате разностное уравнение (3) примет вид $Dy = 2Dy_1 - 2Dy_2 - Ay_1 + B(x - x_1 - y_1 + y_2)$,

где переменные состояния выхода в памяти контроллера хранятся в виде (Dy) , т.е. домноженные на знаменатель. Во втором и третьем слагаемом следует выполнять первоначально умножение, затем деление, чтобы исключить потерю остатка от деления.

В результате фрагмент кода будет выглядеть в следующем виде:

```
int s2= y1 * a; s2 /= 1024;
int s3= (y2 - y1) * b; s3 /= 1024;
s3 +=b*(x-x1);
y = 2 * y1 - y2 + s1 + s3;
y2=y1; y1=y; x1=x;
```

Код построен таким образом, чтобы упорядочить операции умножения и деления. Результаты оценки скорости вычисления сведены в таблицу.

Как следует из таблицы, применение процессора AtMega328 с использованием арифметики с плавающей точкой теоретически возможно только для двигателя с параметрами $N_e = 6000$ и $n = 6$, поскольку $N_{csk}(\text{float}, \text{AtMega328}) > 4,8$ кГц. Если использовать реализацию управляемого фильтра на целочисленной арифметике, то возможна реализация работы процессора для двигателя с параметрами $N_e = 20000$ и $n = 12$, поскольку $N_{csk}(\text{int}, \text{AtMega328}) > 32$ кГц.

Однако процессор будет работать на пределе своих возможностей и временных ресурсов на остальные задачи может не хватить.

При использовании процессора STM32F103 теоретически возможно использовать оба способа вычисления разностного уравнения для обоих типов двигателя. При использовании целочисленной арифметики на обслуживание работы фильтра потребуется менее 5% процессорного времени. При этом количество требуемых тактов у этого процессора в 1,5 раза меньше для реализации на числах с плавающей точкой и более чем в два раза меньше для реализации фильтра на целых числах. Это обусловливается наличием встроенного модуля аппаратного умножения в данном процессоре.

Заключение

Полученная методика измерения скорости вращения двигателя в соответствии с формой потребления тока не требует вычисления крутящего момента на валу, мощности и других параметров, которые требуются в реализациях методов, представленных в публикациях [4–6]. При этом удалось сохранить устойчивые свойства измерения скорости вращения к внешним воздействиям и погрешности измерения. Достаточно обратить внимание на процессы изменения тока потребления на рис. 1 и 4.

Использование настраиваемого узкополосного фильтра с автоматическим контуром подстройки частоты не требует вычисления и анализа текущего спектра в рабочем режиме. Этот метод позволяет значительно уменьшить вычислительный объем по сравнению с [8, 11–13] и организовать алгоритм определения скорости вращения двигателя во встраиваемых микропроцессорных системах. У таких процессоров должны быть аппаратные средства вычисления чисел с плавающей точкой (например, STM32F4). Чтобы реализовать встраиваемую систему на более дешевых процессорах, целесообразно использовать алгоритм вычисления разностного уравнения узкополосного фильтра на целых числах. Для оценки возможности реализации на таких процессорах приведены результаты экспериментов выполнения вычисления алгоритма УПФ на двух процессорах. В результате показано, что производительности микропроцессоров серии Stm32f1xx вполне достаточно при использовании операций с целыми числами. При этом в процессоре имеются необходимые аппаратные элементы (АЦП, таймеры, ШИМ).

Эксперимент был выполнен на двигателе станка ЧПУ типа DC12-48V ER11. Использование алгоритма оценки скорости вращения для более мощных двигателей потребует разработки более производительного DC-DC-преобразователя. При решении этой задачи можно воспользоваться материалами публикаций [20–22].

Литература

1. Afjei E. Sensorless speed/position control of brushed dc motor / E. Afjei, A. Ghomsheh, A. Karami // International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion ACEMP'07 and Electromotion'07 Joint Conference. – 2007. – P. 730–732.
2. Sai Dinesh P. Low cost and real time electronic speed controller of position sensorless brushless dc motor / P. Sai Dinesh, J. Ananthapadmanabha, V. Aravind et al. // Proceedings of the 2010 5th International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS 2010). – 2010. – P. 329–334.
3. Radcliffe P. Sensorless speed measurement for brushed dc motors/ P. Radcliffe, D. Kumar // IET Power Electronics. – 2015. – Vol. 8, No. 11. – P. 2223–2228.
4. Chevrel P. Robust dc-motor speed control without any mechanical sensor/ P. Chevrel, S. Siala // IEEE Conference on Control Applications – Proceedings. – 1997. – P. 244–246.
5. Zhan W. Sensorless speed control for dc permanent magnetic motors // Proceedings of the 9th IASTED Interna-

tional Conference on Control and Applications, CA 2007. – 2007. – P. 116–120.

6. Saurav K. Sensorless speed control of a permanent magnet dc motor by compensating the plant nonlinearities / K. Saurav, R. Potluri // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Taipei. – 2013. – P. 1–4.

7. De Kock H. Anisotropy comparison of reluctance and pm synchronous machines for position sensorless control using hf carrier injection / H. De Kock, M. Kamper, R. Kennel // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No. 8. – P. 1905–1913.

8. Vazquez-Sanchez E. A novel method for sensorless speed detection of brushed dc motors / E. Vazquez-Sanchez, J. Sottile, J // Gomez-Gil Applied Sciences (Switzerland). – 2017. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–15.

9. Vzquez-Snchez E. A new method for sensorless estimation of the speed and position in brushed dc motors using support vector machines/ E. Vzquez-Snchez, J. Gmez-Gil, J. Gamazo-Real, J. Dez-Higuera // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59, No. 3. – P. 1397–1408.

10. Vzquez-Snchez E. Analysis of three methods for sensorless speed detection in dc motors / E. Vzquez-Snchez, J. Gmez-Gill, M. Rodrguez-Ivarez // 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Proceedings (POWERENG 2009). – 2009. – P. 117–122.

11. Bowes S. New natural observer applied to speed-sensorless dc servo and induction motors / S. Bowes, A. Sevin, D. Holliday // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. – Vol. 51, No. 5. – P. 1025–1032.

12. Aydogmus O. Comparison of extended-kalman-and particle-filter-based sensorless speed control / O. Aydogmus, M. Talu // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2012. – Vol. 61, No. 2. – P. 402–410.

13. Yachiangkam S. Speed-sensorless separately excited dc motor drive with an adaptive observer / S. Yachiangkam, C. Prapanavarat, U. Yungyuen, S. Pongam // IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON. – 2004. – Vol. D. – P. D163–D166.

14. Tlelo-Cuautle E. Integrated circuits for analog signal processing / E. Tlelo-Cuautle. – Springer New York LLC, 2013. – 322 p.

15. Hilairt M. Speed sensorless control of a dc-motor via adaptive filters / M. Hilairt, F. Auger // IET Electric Power Applications. – 2007. – Vol. 1, No. 4. – P. 601– 610.

16. Montiel O. Performance of a simple tuned fuzzy controller and a pid controller on a dc motor / O. Montiel, R. Seplveda, P. Melin, O. Castillo, M. Porta, I. Meza // Proceedings of the IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI 2007). – 2007. – P. 531–537.

17. Jianying L. Real -time dc servo motor position control by pid controllers using labview / L. Jianying, Z. Pengju, W. Fei // International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC 2009). – 2009. – Vol. 1. – P. 206–209.

18. Basilio J. Design of pi and pid controllers with transient performance specification / J. Basilio, S. Matos // IEEE Transactions on Education. – 2002. – Vol. 45, No. 4. – P. 364–370.

19. Kanojiya R. Optimal tuning of pi controller for speed control of dc motor drive using particle swarm optimization / R. Kanojiya, P. Meshram // 2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET), Mylavaram, Andhra Pradesh. – 2012. – P. 1–6.

20. Mikhailchenko G. Bifurcation behavior in multi-parallel interleave buck converter / G. Mikhailchenko, S. Mikhailchenko // 2015 International Siberian Conference on Con-

trol and Communications, SIBCON 2015. Proceedings. – 10.1109/SIBCON.2015.7147147.

21. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter / S. Mikhachenko, V. Apasov // 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, 2016. – P. 507–511.

22. Issues of linearization of a two-phase boost DC-DC converter applied in the power supply systems operating on renewable energy sources / R. Dixon, G. Mikhachenko, S. Mikhachenko, V. Russkin, S. Semenov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2017. – Vol. 328, No. 1. – P. 89–99.

23. Jurisic D. Low-sensitivity SAB band-pass active-RC filter using impedance tapering / D. Jurisic, G.S. Moschytz, N. Mijat // ISCAS 2001. The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (Cat. No.01CH37196). – Sydney: NSW, 2001. – P. 160–163.

Шилин Александр Анатольевич

Д-р техн. наук, профессор Инженерной школы энергетики отд. электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Тел.: +7-903-954-00-88
Эл. почта: shilin@tpu.ru

Момот Павел Михайлович

Студент ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-519-40-09
Эл. почта: pmm2@tpu.ru

Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9861-9765
Тел.: +7 (382-2) 60-61-06
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Shilin A.A., Momot P.M., Bukreev V.G.

Estimating of DC motor rotational speed by the spectral structure of consumed current

A method for estimating the rotational speed of a DC motor based on analysis of the spectral structure of consumed current is presented. The used principle implements the fact that the first harmonic frequency in the spectral structure of the consumed current is proportional to the rotational speed of the motor. Compared to the known methods of measuring the motor rotational speed, a narrow-band filter with adjustable frequency and quality factor is used to highlight the sinusoidal form of the first harmonic. The evaluation algorithm is implemented on a microcontroller, which provides a closed loop to adjust the frequency and the quality factor of the filter. As an alternative to the fast Fourier transform, an original algorithm to search the first harmonic is proposed. The experimental results are presented on AtMega328 and STM32F103 microcontrollers.

Keywords: motor speed evaluation, microcontroller, spectral analysis.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-117-124

References

1. Afjei E., Ghomsheh A., Karami A. Sensorless speed/position control of brushed dc motor. *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion ACEMP'07 and Electromotion'07 Joint Conference*, 2007, pp. 730–732.

2. Sai Dinesh P., Ananthapadmanabha J., Aravind V., Nair A., Dutta S., Vikram V., Aditya K., Shankar B., Freeman J. Low cost and real time electronic speed controller of position sensorless brushless dc motor. *Proceedings of the 2010 5th International Conference on Information and Automation for Sustainability, ICIAFS 2010*, 2010, pp. 329–334.

3. Radcliffe P., Kumar D. Sensorless speed measurement for brushed dc motors. *IET Power Electronics*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 2223–2228.

4. Chevrel P., Siala S. Robust dc-motor speed control without any mechanical sensor. *IEEE Conference on Control Applications*. Proceedings, 1997, pp. 244–246.

5. Zhan W. Sensorless speed control for dc permanent magnetic motors. *Proceedings of the 9th IASTED International Conference on Control and Applications*, CA 2007, 2007, pp. 116–120.

6. Saurav K., Potluri R. Sensorless speed control of a permanent magnet dc motor by compensating the plant nonlinearities. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2013, pp. 1–4.

7. De Kock H., Kamper M., Kennel R., Anisotropy comparison of reluctance and pm synchronous machines for position sensorless control using hf carrier injection. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 24, no. 8, pp. 1905–1913.

8. Vazquez-Sanchez E., Sottile J., Gomez-Gil J. A novel method for sensorless speed detection of brushed dc motors. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 1–15.

9. Vzquez-Snchez E., Gmez-Gil J., Gamazo-Real J., Dez-Higuera J. A new method for sensorless estimation of the speed and position in brushed dc motors using support vector machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1397–1408.

10. Vzquez-Snchez E., Gmez-Gill J., Rodrguez-Ivarez M. Analysis of three methods for sensorless speed detection in dc motors. 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Proceedings (POWERENG 2009), 2009, pp. 117–122.

11. Bowes S., Sevin A., Holliday D. New natural observer applied to speed-sensorless dc servo and induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, no. 5, pp. 1025–1032.

12. Aydogmus O., Talu M. Comparison of extended-kalman-and particle-filter-based sensorless speed control. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, vol. 61, no. 2, pp. 402–410.

13. Yachiangkam S., Prapanavarat C., Yungyuen U., Pongam S. Speed-sensorless separately excited dc motor drive with an adaptive observer. *IEEE Region 10 Annual International Conference*, Proceedings/TENCON, 2004, vol. D, pp. D163–D166.

14. Tlelo-Cuautle E. Integrated circuits for analog signal processing. Springer New York, LLC, 2013, 322 p.

15. Hilaret M., Auger F. Speed sensorless control of a dc-motor via adaptive filters. *IET Electric Power Applications*, 2007, vol. 1, no. 4, pp. 601–610.

16. Montiel O., Seplveda R., Melin P., Castillo O., Porta M., Meza I. Performance of a simple tuned fuzzy controller and a pid controller on a dc motor. Proceedings of the IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI 2007), 2007, pp. 531–537.

17. Jianying L., Pengju Z., Fei W. Real-time DC servo motor position control by pid controllers using labview. International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC 2009), 2009, vol. 1, pp. 206–209.

18. Basilio J., Matos S. Design of pi and pid controllers with transient performance specification. *IEEE Transactions on Education*. 2002, vol. 45, no. 4, pp. 364–370.

19. Kanojiya R., Meshram P. Optimal tuning of pi controller for speed control of dc motor drive using particle swarm optimization. *2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*. Mylavaram, Andhra Pradesh, 2012, pp. 1–6.

20. Mikhailchenko G. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter/ G. Mikhailchenko, S. Mikhailchenko. – *2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Proceedings. 10.1109/SIBCON.2015.7147147.

21. Mikhailchenko S., Apasov V. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter. *2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, 2016. P. 507–511.

22. Dixon R., Mikhailchenko G., Mikhailchenko S., Ruskin V., Semenov S. *Issues of linearization of a two-phase boost dc-dc converter applied in the power supply systems operating on renewable energy sources*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 89–99.

23. Jurisic D., Moschytz G.S., N. Mijat. Low-sensitivity SAB band-pass active-RC filter using impedance tapering.

ISCAS 2001. *The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (Cat. No.01CH37196)*, Sydney, NSW, 2001, pp. 160–163.

Aleksander A. Shilin

Doctor of Engineering Science, Professor,
Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Phone: +7-903-954-00-88
Email: shilin@tpu.ru

Pavel M. Momot

Student, Power Engineering School, NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-519-40-09
Email: pmm2@tpu.ru

Victor G. Bukreev

Doctor of Engineering Science, Professor,
Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering, NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-9861-9765
Phone: +7 (382-2) 60-61-06
Email: bukreev@tpu.ru

УДК 621.313.3.004-192:622

Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, В.А. Шевчук, А.А. Шилин

Исследование эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в горнорудной промышленности

Электромеханические системы горнорудного оборудования, эксплуатируемые в условиях подземных выработок, подвергаются постоянному воздействию агрессивной внешней среды (изменения температуры, влажность, запылённость). В связи с этим происходит большое количество внезапных отказов, что недопустимо для алмазодобывающей промышленности ввиду невосполнимых экономических потерь и опасности жизни обслуживающего персонала. В статье рассматривается методика прогнозирования эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности с помощью анализа методом множительных оценок Каплана–Мейера. Методика позволяет анализировать полные и цензурированные данные без необходимости разделения исходной информации на интервалы времени. На примере задачи обеспечения эксплуатационной надёжности рассмотрен механизм метода анализа иерархий, который позволил определить спектр мероприятий, способных наиболее эффективно решить поставленную задачу.

Ключевые слова: электрические машины горнорудного оборудования, прогнозирование эксплуатационной надёжности, системный анализ, анализ выживаемости.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-125-131

Горнорудное оборудование алмазодобывающих комплексов относится к категории опасных производственных объектов с риском техногенных аварий и необходимостью снижения невосполнимых экономических потерь. Обеспечить промышленную безопасность опасного производственного объекта, имеющего в своем составе электропривод, можно на основе обеспечения живучести с применением различных видов резервирования, в том числе повышением эксплуатационной надёжности путем анализа работы оборудования с учетом нормативных и сверхнормативных режимов эксплуатации [1–10].

Необходимый уровень эксплуатационной надёжности электрических машин (ЭМ), эксплуатируемых в алмазодобывающем комплексе, обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта (ТОиР), в основе которой лежит техническое обеспечение и организация планово-предупредительных ремонтов. Однако такой системой не учитываются количественные показатели надёжности элементов, которые возможно получить из статистической информации об отказах. При наличии достаточной базы эксплуатационной информации возможна организация прогнозирования отказов горного оборудования и электрических машин. Важной особенностью такой информации является наличие цензурированных данных, которые не несут в себе статистической информации в связи с завершением наблюдения. При использовании обычных методов статистического исследования такие данные не учитываются, вследствие чего уменьшается количество эксплуатационной информации и соответственно точность результатов. Целесообразно применение подхода, способного учитывать, как полные, так и цензурированные данные.

Задачу обеспечения эксплуатационной надёжности предлагается рассматривать как упорядоченную иерархическую структуру критериев для достижения необходимой надёжности. Так, в работах

[11, 12] выявлено, что в алмазодобывающем комплексе наиболее подвержены отказам электродвигатели режущего органа проходческих комбайнов АМ-75. Комбайны эксплуатируются в условиях подземной разработки полезных ископаемых, где непрерывное воздействие оказывают такие факторы, как запылённость, влажность, сильные колебания температуры.

Немаловажное значение имеют и многолетне-мёрзлые породы. Учитывая, что нормативных документов по разработке подземных месторождений в условиях многолетней мерзлоты нет и необходимые расчёты по надёжности оборудования производятся на основании производственного опыта, то справедливо предположить о дополнительных нагрузках на электропривод режущего органа комбайна со стороны почвы. Задача обеспечения должного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75 стоит достаточно остро, поскольку его внезапный выход из строя несет за собой как экономические убытки, так и ставит безопасность обслуживающего персонала под угрозу.

Анализ выживаемости электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности

Изначально методы анализа выживаемости активно применялись в медицинской и биологической сферах, а также социальных науках и экономике, но затем нашли своё применение и в машиностроении в виде анализа надёжности. Однако в России методы анализа выживаемости до сих пор не получили широкого распространения. Анализ выживаемости представляет собой исследование длительностей от начала до конца наблюдения, в которых объект перестаёт отвечать заданным требованиям, например происходит отказ. В рамках данной работы выживаемость – это доля наблюдаемых объектов, доработавших до определённого времени [13, 14].

Анализ выживаемости обычно выполняется с помощью метода множительных оценок Каплана-Мейера. Отличительной особенностью метода множительных оценок Каплана-Мейера от традиционных – возможность обработки цензурированных данных и отсутствие необходимости группировать данные. Функцию выживаемости для выборки с цензурированными данными можно представить в виде формулы множительной оценки Каплана-Мейера (1) [15–19].

$$S(t) = \prod_{j=1}^t \left(\frac{n-j}{n-j+1} \right)^{\delta(j)}, \quad (1)$$

где n – общее количество событий (отказов); j – порядковый номер отдельного события; $\delta(j) = 1$, если наблюдение полное, и 0, если цензурированное.

Предлагается подвергнуть анализу электродвигатели проходческих комбайнов, поскольку они имеют наибольшее количество отказов в связи с повышенной нагрузкой на рабочие органы.

Данные для анализа получены из журналов и отчетов о ремонте электрических машин проходческих комбайнов АМ-75 и АМ-105, эксплуатируемых в условиях подземных рудников АК «АЛРОСА», накопленные с 2012 г. по август 2017 г.

На рис. 1 рассмотрены кривые выживаемости проходческих комбайнов АМ-75 и АМ-105, где наименьшим уровнем выживаемости обладают электрические машины проходческого комбайна АМ-75. В этом случае критическим временем является интервал с 5000 до 10000 ч с вероятностью доработки 45% и с 13000 до 15000 ч с вероятностью доработки 11%. Об электрических машинах комбайна АМ-105 следует сказать, что первые 10000 ч эксплуатации можно назвать критическими.

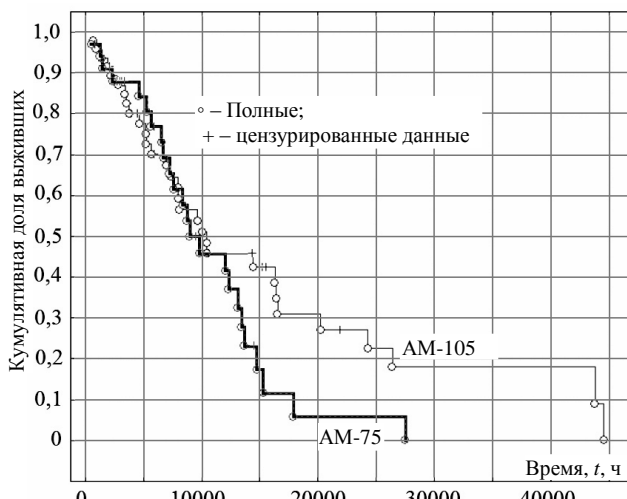


Рис. 1. График сравнения выживаемости электрических машин переменного тока, эксплуатируемых на проходческих комбайнах АМ-75 и АМ-105

На рис. 2 представлены кривые выживаемости электропривода режущего органа комбайна и загребных лап. Кривая выживаемости электропривода режущего органа достаточно крутая и находится

левее, что говорит о низкой выживаемости. Вероятность дожития до 13000 ч составляет 40%. Критическим временем является интервал с 6000 до 9000 ч с вероятностью дожития 42% и с 13000 до 15000 ч с вероятностью дожития 1%.

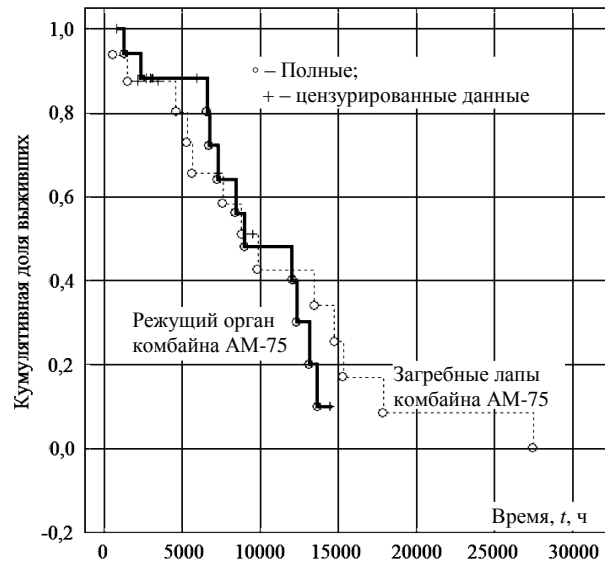


Рис. 2. График сравнения выживаемости электрических машин переменного тока отдельных узлов промышленного комбайна АМ-75

На рис. 3 представлено сравнение выживаемости узлов электрической машины режущего органа проходческого комбайна АМ-75.

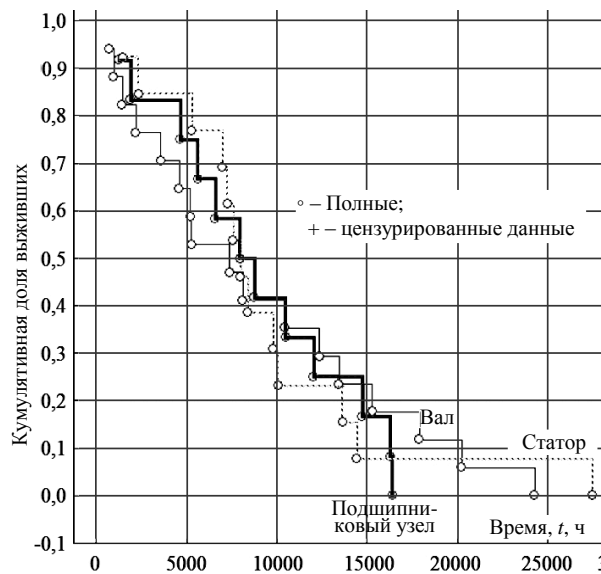


Рис. 3. Сравнение выживаемости узлов электродвигателя привода режущего органа проходческого комбайна АМ-75

Наиболее подвержены отказам элементы подшипникового узла. На кривой выживаемости наблюдается достаточно быстрый спад на протяжении всей эксплуатации с вероятностью дожития до 15000 ч 15%. Критическим временем является интервал с 5000 до 10000 ч эксплуатации. Также стоит обратить внимание на кривую выживаемости эле-

ментов вала, из которой следует, что основное количество отказов происходит в первые 5000 ч. Вероятность дожития до 5000 ч равна 52%. Как видно из кривой выживаемости элементов статора, большой спад привёл к вероятности дожития до 10000 ч, равной 22%.

Таким образом, стоит отметить, что электрические машины привода режущего органа комбайна АМ-75 спустя 5000 ч нуждаются в дополнительном техническом обслуживании.

В таблице выделим критическое время эксплуатации проходческих комбайнов АМ-75 и его элементов. Определение критического времени позволяет прогнозировать отказы электрических машин и повысить эффективность графиков планово-предупредительного ремонта.

Критическое время эксплуатации электрооборудования рудника «Мир»

Оборудование	Элемент оборудования	Критический интервал времени, ч
Проходческий комбайн АМ-75	Общее	0–2500 5000–10000 12000–15000
	Режущий орган	6500–9000 12000–14000
	Загребные лапы	4000–10000 13000–17500
Электрическая машина режущего органа	Вал	0–7500
	Подшипниковый узел	0–15000
	Обмотки статора	5000–10000 14000–14500

Исследование задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока методом анализа иерархий

Задача обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин является сложной, так как для разных этапов жизненного цикла оборудования характерны разные методы её решения. Одним из решений является поэтапная систематизация данной задачи, охватывающая весь жизненный цикл ЭМ. В алмазодобывающей промышленности задачу обеспечения эксплуатационной надёжности предлагается рассматривать как упорядоченную иерархическую структуру критериев для достижения необходимого уровня надёжности. Существует несколько вариантов представления задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин для алмазодобывающей промышленности – это:

- иерархическая структура, состоящая из мероприятий по техническому обслуживанию, ремонту и диагностике;
- дерево отказов, элементами которого являются отказы ЭМ того или иного горного оборудования.

В данном случае использование системного анализа позволяет решить поставленную задачу вследствие наличия большого количества переплетающихся между собой связей элементов систем, а

также определить полный комплекс мероприятий, необходимых для её решения.

Системный анализ – процесс изучения проблемы с целью определения критериев и подцелей, которые позволяют достичь их эффективным способом. Системный анализ нашёл своё применение среди исследования искусственных систем (социальных, технических, экономических и др.), т.е. в системах, где важную роль играет человек. Однако наиболее широкое распространение получил в области управления, связанной с принятием и обоснованием решений в проектировании, создании и управлении многокомпонентными искусственными системами [12, 20–23].

Системный анализ сочетает экспертные знания и формальные методы [21]. Экспертные знания позволяют находить альтернативные пути решения задачи, что способствует совершенствованию модели принятия решений, однако это может привести и к трудноразрешимым противоречиям.

Метод анализа иерархий (МАИ) – это математический инструмент системного анализа для принятия решений в задачах, не имеющих определённо верного решения, он позволяет эксперту, основываясь на личном опыте, знаниях и понимании проблемы, решить её [12]. Математический алгоритм метода заключается в получении парных матриц с последующим сравнением по критериям различных числовых групп. Эти критерии составляют связанные между собой уровни иерархии, которые могут группироваться в несвязные множества, и структурировать сложные задачи [23].

На рис. 4 в виде дерева целей представлены критерии с наибольшим влиянием на обеспечение заданного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75. Первый уровень является уровнем общей цели и представляет собой основную задачу. В нашем случае это обеспечение эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности. На втором уровне были расположены критерии, влияющие на приращение уровня эксплуатационной надёжности. На третьем и четвёртом уровнях были классифицированы мероприятия по повышению эксплуатационной надёжности, где 1.1.1.1 – ремонт по техническому состоянию; 1.1.1.2 – фирменный метод ТО и ремонта; 1.1.2.1 – ТО по событию; 1.1.2.2 – ТО по регламенту; 1.1.2.3 – ТО по состоянию; 1.1.3.1 – соблюдение эксплуатационных режимов; 1.1.3.2 – энергосберегающие мероприятия; 1.1.3.3 – модернизация оборудования; 1.1.4.1 – средства и сооружения для выполнения ТО и ремонта; 1.2.1.1 – тестовое диагностирование; 1.2.1.2 – рабочее диагностирование; 1.2.1.3 – экспресс-диагностирование; 1.3.1.1 – параметрическое оценивание надёжности; 1.3.1.2 – непараметрическое оценивание надёжности; 1.3.1.3 – определение работоспособного интервала времени с заданной вероятностью; 1.3.1.4 – определение вероятности работоспособности в определённый интервал времени.

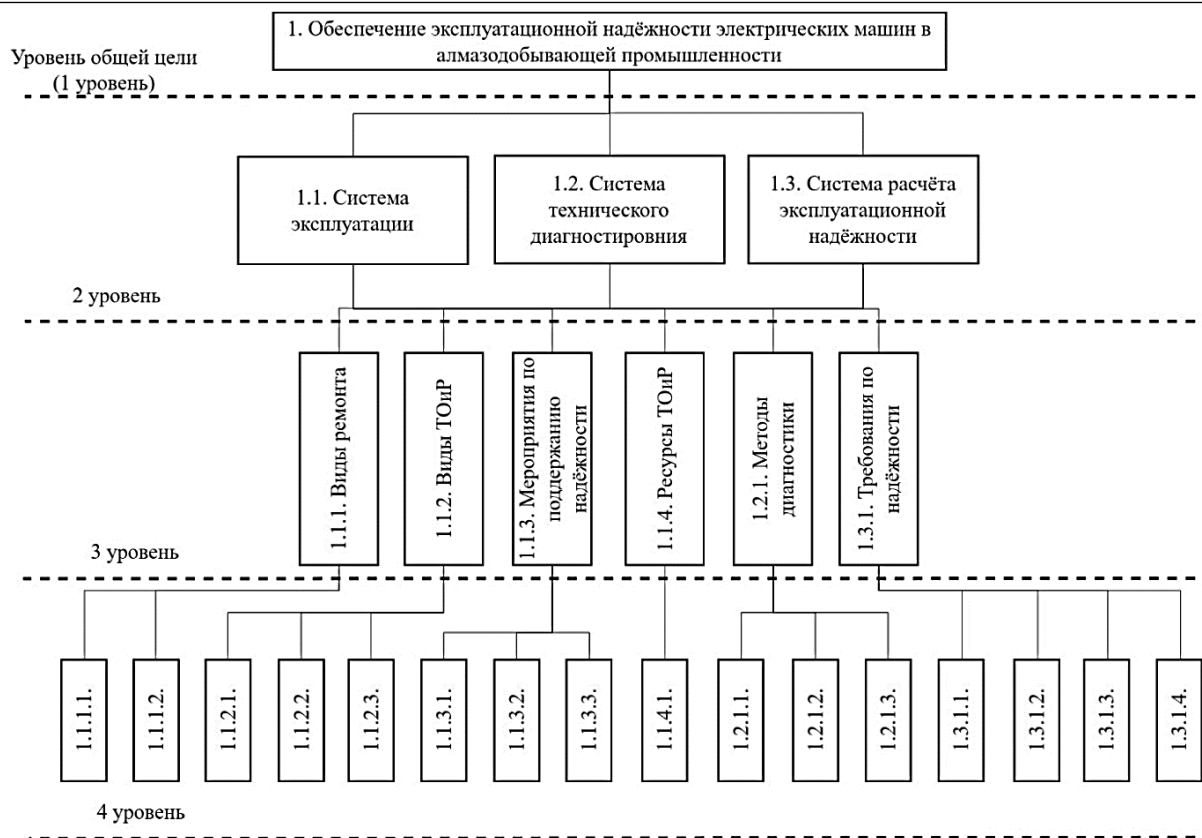


Рис. 4. Дерево целей для задачи по обеспечению эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75

На примере расчёта критериев 2-го уровня относительно главной цели рассмотрим работу механизма МАИ [11, 12]. После построения дерева целей экспертами заполняется матрица парных сравнений порядка n (n – количество критериев). Для данной работы экспертные оценки были получены от инженеров алмазодобывающего комплекса в г. Мирный (Якутия). Такая матрица является квадратной, обратно симметричной с единицами на главной диагонали. Сравнение происходит между критериями в строчках с критериями в столбцах по правилам (2) [24–26]:

$$x_{ij} = x; x_{ji} = \frac{1}{x}; x_{ii} = x_{ji} = 1, \quad (2)$$

где x – оценка эксперта по 9-балльной шкале, 1 означает равную важность, 9 – полное превосходство одного критерия над другим.

Например, при сравнении пары критериев 1.1 и 1.3. эксперт рассчитывает, что первый умеренно превосходит второй и соответствует цифре 3. Это значит, что паре критериев 1.3 и 1.1 автоматически соответствует значение 1/3. Далее по формуле (3) находим геометрическую сумму каждой строки и по (4) их сумму:

$$a_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{ij}}, \quad (3)$$

$$\sum a_i = a_1 + a_2 + \dots + a_n. \quad (4)$$

Компонентами нормализованного вектора приоритетов являются отношения геометрической суммы строк на общую сумму и рассчитываются по формуле (5):

$$V_i = \frac{a_i}{\sum a_i}. \quad (5)$$

В алгоритм МАИ заложен расчёт индекса согласованности (ИС), который необходим для проверки оценок эксперта на согласованность [27]. Для начала нужно произвести расчёт максимального собственного значения матрицы λ_{\max} по (6). Чем ближе значение λ_{\max} к порядку матрицы n , тем выше будет её значение согласованности ($\lambda_{\max} \geq n$) [24, 25]:

$$\lambda_{\max} = V_1 R_1 + V_2 R_2 + \dots + V_n R_n, \quad (6)$$

где R_n – сумма элементов n -го столбца.

Расчёт ИС производится по следующей формуле (7):

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (7)$$

Значение ИС необходимо сравнить с величинами средней согласованности (СС), которые были получены в работе [21] для матриц порядка от 1 до 15 (таблца). Отношение ИС к СС называется отношением согласованности (ОС) (8):

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СС}}. \quad (8)$$

Значения величин ОС и $\text{ИС} \leq 0,1$ говорят о том, что матрица согласована. Однако в системах с боль-

шим количеством критериев допускается величина $OC \leq 0,2$ [20, 21, 28, 29].

Согласно проведённому анализу, из критериев третьего уровня наиболее сильное влияние на главную цель имеют мероприятия по поддержанию надёжности (критерий 1.1.3) с коэффициентом относительной важности, равным 0,26 (рис. 5).

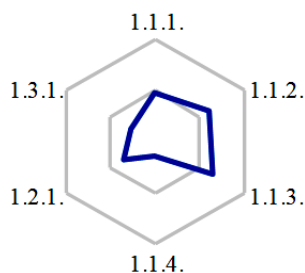


Рис. 5. Диаграмма значимости критериев 3 уровня:
1.1.1 – виды ремонта; 1.1.2 – виды ТОиР;
1.1.3 – мероприятия по поддержанию надёжности;
1.1.4 – ресурсы ТОиР; 1.2.1 – методы диагностики;
1.3.1 – требования по надёжности

Третий уровень дерева целей является промежуточным, в котором были структурированы критерии четвертого уровня, что в дальнейшем позволило произвести оценку только тех критериев, которые имеют непосредственное отношение к весовому критерию 3-го уровня. Согласно дальнейшему анализу, критерий «Модернизация оборудования» (с КОВ, равным 0,596) наиболее сильно влияет на главную цель. В связи с агрессивной средой эксплуатации элементы ЭМ комбайна подвергаются постоянному износу даже во время простоя. От повышенной влажности происходит коррозия металлических деталей, которая ухудшает электрические свойства. Из-за повышенной запылённости загрязняется изоляция, что приводит к дальнейшему её пробое, также забивается смазка подшипникового узла, чем вызывается его быстрый износ. Длительная работа в условиях высокой запылённости образует слой пыли на обмотках, что приводит к повышению температуры выше нормы и дальнейшему отказу.

Выводы

В ходе исследования были получены следующие результаты. В качестве исследуемых объектов были рассмотрены проходческие комбайны АМ-75 и АМ-105. В результате было выявлено, что наиболее низким уровнем выживаемости обладает проходческий комбайн марки АМ-75 (вероятность доработки до 15000 ч – 11%). Далее были проанализированы отказы рабочих элементов проходческого комбайна АМ-75. Анализ показал, что режущий орган комбайна имеет наименьший уровень выживаемости (вероятность доработки до 15000 часов – 1%). Используемый метод анализа также помог определить наиболее подверженный дефектам узел ЭМ режущего органа комбайна АМ-75, им является подшипниковый узел (вероятность доработки до 15000 – 15%). Отказы объясняются агрессивными факторами внешней среды, а также дополнительными нагрузками на электропривод многолетнемерзлыми поро-

дами. Исходя из полученных графиков, была составлена таблица критических периодов времени проходческого комбайна АМ-75 и его элементов. Определение критического времени позволяет прогнозировать отказы электрических машин и тем самым повысить эффективность графиков планово-предупредительного ремонта.

Благодаря методу анализа иерархий получена возможность систематизировать задачу обеспечения эксплуатационной надёжности. Критерий «Модернизация оборудования» (с КОВ, равным 0,596) наиболее сильно влияет на главную цель. В связи с агрессивной средой эксплуатации элементы ЭМ комбайна подвергаются постоянному износу даже во время простоя. От повышенной влажности (80–98%) происходит коррозия металлических деталей, которая ухудшает электрические свойства. Из-за повышенной запылённости (70–695 мг/м³) происходит загрязнение изоляции, что приводит к дальнейшему её пробое, также забивается смазка подшипникового узла, чем вызывается его быстрый износ. Длительная работа в условиях высокой запылённости приводит к образованию слоя пыли на обмотках, что приводит к повышению температуры выше нормы.

Результаты, полученные в работе, показывают, что в случае с проходческим комбайном АМ-75 необходимо не только усовершенствование системы технического обслуживания и ремонта, но и модернизация самих узлов, наиболее подверженных факторам внешней среды.

Литература

1. Odnokopylov G.I. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015) / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66, № 1. – P. 1–6.
2. Odnokopylov G.I. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66, № 1. – P. 1–7.
3. Odnokopylov G.I. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 24–29.
4. Odnokopylov G.I. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–5.
5. Odnokopylov G.I. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–6.
6. Odnokopylov G.I. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // IFOST–2016: 11th International Forum on Strategic Technology, Novosibirsk, 01–03 Jun 2016 / Novosibirsk State Technical University. – 2016. – Vol. 2. – P. 140–144.

7. Odnokopylov G.I. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities / G.I. Odnokopylov, D.Y. Sarkisov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2017. – Vol. 328, № 3. – P. 85–95.

8. Odnokopylov G.I. Evaluation of survivability degree of responsible building structures under shock wave loading / G.I. Odnokopylov, D.Y. Sarkisov, E.A. Butuzov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2018. – Vol. 329, № 12. – P. 122–135.

9. Determination of vitality parameters of protected critical engineering structures under shockwave loading / G.I. Odnokopylov, O.G. Kumpyak, Z.R. Galyautdinov, D.R. Galyautdinov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330, № 4. – P. 110–125.

10. Odnokopylov G.I. Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry / G.I. Odnokopylov, V.A. Shevchuk, Y.N. Demytyev // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330, № 5. – P. 131–140.

11. Ruan L. Different influence of cooling method to stator bar insulation characteristics in pumped storage units / L. Ruan, J. Chen, G. Gu // Transactions of China Electrotechnical Society. – 2017. – Vol. 32. – № 14. – P. 246–251.

12. Shevchuk V.A. Survival analysis of a.c. machines in the diamond industry using the Kaplan-Meier estimator / V.A. Shevchuk, O.P. Muravlev, O.O. Stolyarova // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 141. – P. 1–4.

13. Боровиков В.П. *Statistica. Искусство анализа данных на компьютере.* – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.

14. Xian L. Survival analysis. Models and applications. – Higher Education Press, 2012. – 446 p.

15. Van den Hout A. Multi-state survival models for interval-censored data. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 257 p.

16. Moore D.F. Applied survival analysis using R. – New York: Springer, 2016. – 234 p.

17. Халафян А.А. *STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учеб.* – М.: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.

18. Klein J.P. Handbook of survival analysis / J.P. Klein, H.C. van Houwelingen, J.G. Ibrahim, T.H. Scheike. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 632 p.

19. Гусев В.В. Мониторинг и диагностика электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2010. – 22 с.

20. The use of a special software for induction motor diagnostics in the diamond industry / V.A. Shevchuk, O.P. Muravlev, O.O. Stolyarova, V.P. Shevchuk // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 91. – P. 1–4.

21. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархии. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

22. Шевчук В.А. Анализ вероятности безотказной работы электрических машин в алмазодобывающей промышленности / В.А. Шевчук, О.П. Муравлев // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 4 (138). – С. 39–46.

23. Гусев В.В. Системный анализ эффективности функционирования электрических машин в горнодобывающем комплексе / В.В. Гусев, О.П. Муравлев, В.П. Шевчук // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 74–78.

24. Emrouznejad A, Ho W.. Fuzzy analytic hierarchy process. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 407 p.

25. Safety evaluation for bridge crane based on FTA and ANP / S. Fei, L. Xiangdong, F. Yali // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 207. – P. 1–4.

26. Макарова И.Л. Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья // Символ науки. – 2015. – № 7. – С. 87–95.

27. Деордица Ю.С. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений. – Луганск: ВНУ, 2005. – 64 с.

28. Evans G.W. Multiple criteria decision analysis for industrial engineering: methodology and applications. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 467 p.

29. Khazaii J. Advanced decision making for HVAC engineers: creating energy efficient smart buildings. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 191 p.

Однокопылов Георгий Иванович

Д-р техн. наук, профессор отд. электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики (ОЭЭ ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 56-32-55
Эл. почта: ogiz@ya.ru

Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: 8 (382-2) 60-61-06
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Шевчук Владислав Алексеевич

Аспирант ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-983-238-78-17
Эл. почта: shevchukvlal@yandex.ru

Шилин Александр Анатольевич

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Тел.: +7-903-954-00-88
Эл. почта: shilin@tpu.ru

Odnokopylov G.I., Bukreev V.G., Shevchuk V.A., Shilin A.A. Exploration AC electrical machines operational reliability in mining industry

Mining equipment for underground workings is subjected to constant exposure to aggressive environment (temperature changes, humidity, dust). In this regard, a large number of sudden failures occur, which are unacceptable for the mining industry due to irreparable economic losses and the danger of the worker's lives of the staff. The article discusses the method for predicting the operational reliability of AC electrical machines in the mining industry using the Kaplan-Meier method of multiple valuation. The method allows analyzing complete and censored data. Using the example of the task of ensuring operational reliability, we consider the mechanism of the hierarchy analysis method, which allowed to determine the range of measures that can most effectively solve the problem.

Keywords: reliability of electric machines, prediction of operational reliability, mining industry, system analysis, survival analysis.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-125-131

References

1. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–6.

2. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned

Switched-reluctance drive. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–7.

3. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 24–29.

4. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) proceedings*, 2015, pp. 1–5.

5. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) proceedings*, 2015, pp. 1–6.

6. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes. *2016 The 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) proceedings*, 2016, pp. 140–144.

7. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Y. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 85–95.

8. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Y., Butuzov E.A. Evaluation of survivability degree of responsible building structures under shock wave loading. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 122–135.

9. Odnokopylov G.I., Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Determination of vitality parameters of protected critical engineering structures under shock-wave loading. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 110–125.

10. Odnokopylov G.I., Shevchuk V.A., Dementyev Y.N. Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 131–140.

11. Ruan L., Chen J., Gu G. Different influence of cooling method to stator bar insulation characteristics in pumped storage units. *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, vol. 32, no. 14, pp. 246–251.

12. Shevchuk V.A., Muravlev O.P., Stolyarova O.O. Survival analysis of a.c. machines in the diamond industry using the Kaplan-Meier estimator. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 141, pp. 1–4.

13. Borovikov V.P. *Statistica. Iskusstvo analiza dannykh na komputere* [Statistica. Art of analyzing data on a computer]. SPB, Piter Publ., 2003. 688 p.

14. Liu X. Survival analysis. *Models and applications*. Higher Education Press Publ., 2012. 446 p.

15. Van den Hout A. *Multi-state survival models for interval-censored data*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2016, 257 p.

16. Moore D.F. *Applied survival analysis using R*. New York, Springer Publ., 2016, 234 p.

17. Halafyan A.A. *Statistica 6. Statisticheskii analiz dannykh* [Statistica 6. Statistical data analysis]. Moscow, Binom-press Publ., 2007. 512 p.

18. Klein J.P., Van Houwelingen H.C., Ibrahim J.G., Scheike T.H. *Handbook of survival analysis*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2014, 632 p.

19. Gusev V.V. Monitoring i diagnostica elektricheskikh mashin peremennogo toka valmazodobyvaushei provyslenosti [Monitoring and diagnostics of AC electrical machines in the diamond industry]. Tomsk, 2010, 22 p.

20. Shevchuk V.A., Muravlev O.P., Stolyarova O.O., Shevchuk V.P. The use of a special software for induction motor diagnostics in the diamond industry. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 91, pp. 1–4.

21. Saaty T. *The analytic hierarchy process planning, priority setting, resource allocation*. New York, McGraw-Hill Publ., 1993, 320 p.

22. Shevchuk V.A., Muravlev O.P. Analysis of failure-free operation probability for electrical machines in the diamond industry. *Mining equipment and electrical engineering*, 2018, vol. 4, no. 138, pp. 39–46 (in Russ.).

23. Gusev V.V., Muravlev O.P., Shevchuk V.P. System analysis of the performance of electric machines in the mining complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 74–78 (in Russ.).

24. Emrouznejad A., Ho W. *Fuzzy analytic hierarchy process*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2018, 407 p.

25. Fei S., Xiangdong L., Yali F. Safety evaluation for bridge crane based on FTA and AHP. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 207, pp. 1–6.

26. Makarova I.L. Analysis of methods for determining weights in the integral index of public health. *Symbol of science*, 2015, no. 7, pp. 87–95 (in Russ.).

27. Deordica Y.S. *Intellektual'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenij* [Intelligent Decision Support Systems]. Lugansk, VNU Publ., 2005, 64 p.

28. Evans G.W. *Multiple criteria decision analysis for industrial engineering methodology and applications*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2018, 467 p.

29. Khazaii J. *Advanced decision making for HVAC engineers creating energy efficient smart buildings*. Switzerland, Springer International Publ., 2016, 191 p.

Georgy I. Odnokopylov

Doctor of Engineering Science, Professor
Division for Power and Electrical Engineering
School of Energy & Power Engineering
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Тел.: +7 (382-2) 56-32-55
Email: ogiz@ya.ru

Victor G. Bukreev

Doctor of Engineering Science, Professor
Division for Power and Electrical Engineering
School of Energy & Power Engineering
National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-61-06
Email: bukreev@tpu.ru

Vladislav A. Shevchuk

PhD student, Division for Power and Electrical Engineering
School of Energy & Power Engineering NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Тел.: +7-983-238-78-17
Email: shevchukvlal@yandex.ru

Aleksander A. Shilin

Doctor of Engineering Science, Professor,
Power Engineering School, Department of Electric Power
and Electrical Engineering, NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Phone: +7-903-954-00-88
Email: shilin@tpu.ru

Требования к подготовке рукописей статей,

представляемых для публикации в журнале

«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»

1. Электронный вариант статьи должен быть представлен в виде файла, названного по-русски фамилией первого автора, на дискете или диске в формате Word 2003–2016. Предпочтительнее представить его по электронной почте.

2. Оригинал на бумажном носителе должен полностью соответствовать электронному варианту.

3. Статья должна иметь (в порядке следования): УДК; И.О. Фамилии авторов; заглавие; аннотация (не реферат); ключевые слова; основной текст статьи; список библиографий под подзаголовком «Литература»; сведения об авторах; далее на английском языке: Фамилии авторов И.О., заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова. Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, электронный адрес.

4. Текст статьи должен быть размещен в две колонки без принудительных переносов через один интервал шрифтом Times New Roman 10 кегля на одной стороне листа белой писчей бумаги формата А4, без помарок и вставок. Для облегчения форматирования прилагается **шаблон статьи**, который размещен на сайте: journal.tusur.ru. Размер статьи со всеми атрибутами должен быть, как правило, не более пяти страниц.

5. Одни и те же символы в тексте, формулах, таблицах и рисунках должны быть единообразными по написанию. Русские буквы и греческие символы набираются прямым шрифтом, а переменные, обозначенные латинскими – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул.

6. Формулы должны быть набраны в формульном редакторе (MathType) программы Word. Русские буквы, греческие символы, математические знаки (+, –, ×, ∈, =, скобки, ...) и цифры всегда набираются прямым не жирным шрифтом, а переменные (и кривые на графиках), обозначенные латинскими буквами или цифрами – курсивом, кроме англ. слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул (const, input; $\sin x(t_1)$; U_{in} ; $I_{вх}$; T_z ; β_2 ; H_2O , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) – A_1 , $M(f)$, β_x . Шаблоны для набора формул необходимо взять на сайте из шаблона статьи.

7. Все употребляемые обозначения и сокращения должны быть пояснены.

8. Единицы измерения физических величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ) и написаны по-русски через пробел (х, ГГц; 20 ГГц; T , град; $7^\circ C$). Десятичные числа пишутся через запятую (не точку).

9. Таблицы и рисунки должны иметь тематические заголовки (не повторяющие фразы-ссылки на них в тексте). (Рис. 1. Название рисунка; Таблица 1.

Название таблицы). Большие блоки расшифровки условных обозначений лучше приводить в тексте. Подписи и надписи на рис. – Times New Roman, 9 пт (после масштабирования), не жирным, не курсивом, переменные – так же как и в тексте. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте (... на рис. 3, ... в табл. 2).

10. Рисунки и фотографии должны быть **черно-белыми**, четкими, контрастными, аккуратными, сгруппированными. Графики – не жирно, сетка – четко. Единицы измерения – на русском. Десятичная запятая (не точка). Рисунки могут быть выполнены в программах CorelDraw, Illustrator, Word, Visio и должны давать возможность внесения исправлений.

11. Иллюстрации, должны быть разрешением не менее 600 dpi. Масштаб изображения – 8 или 16,7 см по ширине (при условии читаемости всех надписей, выполненных шрифтом Times New Roman, после масштабирования – 9 кегль).

12. На все источники, указанные в списке литературы, должны быть ссылки по тексту (нумерация в порядке упоминания, например, [1, 2], [5–7]). Описание источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008 и содержать всю необходимую для идентификации источника информацию, а именно: *для непериодических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; *для периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Бумажный вариант рукописи статьи должен быть подписан авторами и (для сторонних авторов) иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Материальные претензии авторов, связанные с распространением материалов их статей после опубликования, не принимаются.

Авторы несут полную ответственность за содержание статей и за последствия, связанные с их публикацией.

Контактная информация

Адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Эл. почта: vnmas@tusur.ru. Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

