



Доклады ТУСУР. 2021 • Том 24, № 2

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442



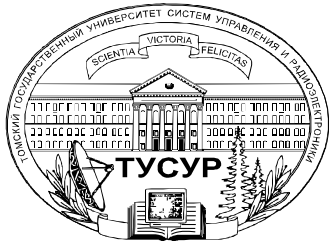
# ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники

2021 • Том 24, № 2







Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ  
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
2021, том 24, № 2**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

**Редакционная коллегия**

**В.М. Рулевский**, д.т.н., доцент, ректор ТУСУРа, научный руководитель направления НИИ АЭМ ТУСУРа, Томск, Россия (*гл. редактор*).

**А.А. Шелупанов**, д.т.н., проф., президент ТУСУРа, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник науки и техники 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> (*зам. гл. редактора*).

**А.Г. Лоцилов**, к.т.н., доцент, проректор по научной работе и инновациям, зав. каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, ТУСУР, Томск, Россия (*зам. гл. редактора*).

**В.Н. Масленников**, к.т.н., доцент, ТУСУР, Томск, Россия (*отв. 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 НР, 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. каф. автоматизации обработки информации, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник высшего профессионального образования РФ, Томск, Россия.

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

**Г.А. Кобзев**, к.т.н., проректор по международному сотрудничеству, ТУСУР.

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

**И.А. Ходашинский**, д.т.н., проф. каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа, вед. науч. сотрудник лаб. медико-биологических исследований (ЛМБИ), Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9355-7638>.

**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, почётный работник высшего профессионального образования РФ, почётный 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.

Подписано в печать 25.06.2021. Формат 60×84 1/8. Печ. л. 5,75. Тираж 500. Заказ 15.

---

**Editorial board**

- Viktor M. Rulevskiy** Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Scientific adviser at the Research Institute of Automation and Electromechanics (RI AEM) TUSUR, Doctor of Engineering.
- Alexander A. Shelupanov** Deputy Editor in Chief, President of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of Science and Technology 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>.
- Anton G. Loschilov** Deputy Editor in Chief, Vice-Rector for Research and Innovations of TUSUR University, Head of the Department of design of components and parts of electronic equipment, TUSUR University, 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** Professor of the Department of Data Processing Automation, TUSUR University, Doctor of Engineering.
- Vyacheslav M. Isaev** First Deputy Director of the Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Engineering.
- Gennady A. Kobzev** Vice-Rector for International Cooperation, TUSUR University, Candidate of Engineering.
- Anatoly M. Korikov** Professor of the Department of Automated Control Systems of TUSUR University, Doctor of Engineering.
- 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.
- 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. Hodashinsky** 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.
- 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**

<b>Ламанов Ю.А., Кудрявцева Т.О., Дроботун Н.Б.</b> Разработка и исследование микрополоскового фильтра низких частот с высокой крутизной спада АЧХ .....	7
<b>Лань Г., Фадеев А.С., Моргунов А.Н.</b> Синтез фрагментов голоса человека на основе модели реконструкции частотных спектров .....	14

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

<b>Кучер В.А., Пуляго М.М., Макарян А.С., Карманов М.А.</b> Исследование безопасности пользовательских данных мессенджера Signal в операционной системе Android .....	23
<b>Яндашевская Э.А.</b> Разработка подсистемы стегаанализа цифровых изображений на основе сверточной нейронной сети для обнаружения и предотвращения атак, использующих скрытые стеганографические каналы .....	29
<b>Шапошников А.И.</b> Подбор вектора признаков для процедуры MeanShift .....	34
<b>Разумников С.В.</b> Алгоритм и программное обеспечение для построения агрегированных рейтингов .....	39
<b>Еленец М.В., Немирович-Данченко М.М.</b> Оконная обработка электроэнцефалографических записей методом Прони .....	45
<b>Катаев М.Ю., Катаева Н.Г., Чернов Р.А.</b> Оценка параметров ходьбы человека с помощью двух акселерометров .....	51
<b>Нгуен Ван Вьонг, Шилин А.А., Букреев В.Г., Перевощиков Ф.В., Брянцев А.А.</b> Определение параметров ПИ-регулятора системы управления сложным технологическим объектом в режиме реального времени .....	56
<b>Игумнов А.О.</b> Архитектура программного обеспечения распределенной системы мониторинга и управления транспортом .....	64
<b>Владимиров М.В.</b> Сферы применения блокчейн-систем .....	69

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

<b>Осипов А.В., Рулевский В.М.</b> Резонансный LCL-преобразователь с частотно-широко-импульсным регулированием .....	77
<b>Асочаков А.С., Дружинин А.А., Журавлев И.М., Лопатин А.А.</b> Алгоритмы управления многоканальным шунтовым стабилизатором напряжения с цифровой системой автоматического управления .....	84
<b>Требования</b> .....	91



### ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING, AND COMMUNICATIONS

<b>Lamanov Y.A., Kudryavtseva T.O., Drobotun N.B.</b> Design and Research Process of Microstrip Low-Pass Filters with High Slope Steepness .....	7
<b>Lan G., Fadeev A.S., Morgunov A.N.</b> Synthesis of Human Voice Fragments Based on Frequency Spectra Reconstruction .....	14

### CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

<b>Kucher V.A., Putyato M.M., Makaryan A.S., Karmanov M.A.</b> Investigation of User Data Security for Android-based «Signal» Messenger .....	23
<b>Yandashevskaya E.A.</b> Development of a Subsystem for Steganalysis of Digital Images Based on a Convolutional Neural Network to Detect and Prevent Attacks Using Hidden Steganographic Channels .....	29
<b>Shaposhnikov A.I.</b> Feature-vector for the MeanShift.....	34
<b>Razumnikov S.V.</b> Algorithm and Software for Building Aggregated Rankings.....	39
<b>Elenetz M.V., Nemirovich-Danchenko M.M.</b> Window Processing of EEG Records by the Prony's Method .....	45
<b>Kataev M.Yu., Kataeva N.G., Chernov R.A.</b> Assessment of Human Walking Parameters with Two Accelerometers.....	51
<b>Nguyen V.V., Shilin A.A., Bukreev V.G., Perevoshchikov F.V., Bryantsev A.A.</b> Synthesis of Regulators of the Drying Plant Control System Based on Statistical Data .....	56
<b>Igunnov A.O.</b> Software Architecture of the Distributed System for Transport Monitoring and Control.....	64
<b>Vladimirov M.V.</b> Application Areas for Blockchain Systems .....	69

### ELECTRICAL ENGINEERING

<b>Osipov A.V., Rulevskiy V.M.</b> Resonant LCL-Converter with Frequency-Pulse-Width Control .....	77
<b>Asochakov A.S., Druzhinin A.A., Zhuravlyov I.M., Lopatin A.A.</b> Control Algorithms for Multichannel Shunt Voltage Converter with Digital Control System .....	84
<b>Manuscript requirements</b> .....	91

**ЭЛЕКТРОНИКА,  
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**





УДК 621.396.692

Ю.А. Ламанов, Т.О. Кудрявцева, Н.Б. Дроботун

## Разработка и исследование микрополоскового фильтра низких частот с высокой крутизной спада АЧХ

Представлены результаты расчёта и исследования фильтров нижних частот с частотами среза 6 и 7 ГГц. Особенностью представленных устройств являются высокая крутизна амплитудно-частотной характеристики, подавление в полосе заграждения, высокий порядок фильтра и компактное топологическое исполнение. Исследовано влияние СВЧ-поглощающего материала отечественного производства на характеристики представленного фильтра.

**Ключевые слова:** фильтр нижних частот, микрополосковое устройство, крутизна амплитудно-частотной характеристики.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-7-13

Частотно-селективные устройства СВЧ-диапазона, в частности полосно-пропускающие фильтры (ППФ) и фильтры низких частот (ФНЧ), в последнее время являются наиболее востребованными устройствами среди разработчиков радиоаппаратуры различного назначения (системах связи, радиолокации, радионавигации, а также в различной измерительной и специальной радиоаппаратуре). Стремительное развитие современных средств связи делает крайне актуальной разработку ППФ с широкой полосой и высокой крутизной, однако в решении задач подавления зеркальной частоты в высокочастотном тракте приемников в измерительной аппаратуре (векторные анализаторы цепей) активно применяются ФНЧ [1, 2]. Повсеместность использования миниатюрных сверхвысокочастотных ФНЧ обусловлена высокой избирательностью, малыми потерями в полосе пропускания, технологичностью производства и низкой стоимостью в производстве этих устройств.

В последние годы активно разрабатываются и исследуются разнообразные конструкции ФНЧ в микрополосковом исполнении [3–6]. Для улучшения характеристик в них, как правило, используется набор различных резонаторов, который формирует полосу пропускания и полосу заграждения, а также позволяет увеличить крутизну склона АЧХ и расширить диапазон полосы заграждения и пропускания.

На сегодняшний день среди множества топологий фильтров, ФНЧ с распределенными параметрами являются наиболее простыми как в расчете, так и в производстве. Примером такого фильтра является гребешковый и полосковый фильтр [7, 8]. Несмотря на перечисленные выше достоинства, у таких фильтров существует ряд существенных недостатков, таких как сравнительно низкая собственная добротность и, как следствие, высокие потери в полосе пропускания. Относительно низкими потерями в полосе пропускания обладают двумерные конструкции ФНЧ на микрополосковых резонаторах [9]. К основным недостаткам таких конструкций относятся их большие размеры, а также сравнительно малый уровень подавления помех в полосе загражде-

ния. Этот недостаток можно компенсировать конструкцией ФНЧ с двусторонним рисунком или дополнительными вырезами на тыльной стороне диэлектрической подложки, подвешенной в металлическом корпусе [10, 11].

Сложность установки фильтра с двусторонним рисунком побудила авторов настоящей работы к разработке и исследованию ФНЧ с двумерной конструкцией и односторонним рисунком топологии, резонаторы которого будут иметь дополнительную связь. Выбор данной топологии обусловлен несколькими причинами. Во-первых, данные фильтры будут устанавливаться на печатную плату с помощью токопроводящего клея ЕРО-ТЕК, полимеризующегося при высокой температуре. Во-вторых, установка фильтров на плате позволяет существенно сэкономить место в устройстве, так как не придется выносить фильтр отдельным блоком. Компактное расположение элементов на плате дает возможность освободить больше пространства для подложки фильтра, что необходимо для ФНЧ, топология которых занимает большую площадь. В-третьих, производство таких фильтров существенно дешевле, а размещение их на плате не сложнее установки в блоке.

### Расчет фильтра на основе чередующихся резонаторов с низким и высоким сопротивлением

Исходя из требований технического задания по обеспечению равномерной АЧХ в полосе пропускания, в качестве фильтра прототипа использовался фильтр Баттерворта 16-го порядка с максимально плоской характеристикой. При аппроксимации с помощью гладкой кривой частотная характеристика ослабления фильтра-прототипа НЧ описывается формулой

$$L_B = 1 + x^{2N}, \quad (1)$$

где  $x$  – нормированная величина.

Производные функции  $L_B$ , начиная от первой и заканчивая  $(2N - 1)$ -й, равны нулю при  $x = 0$ . Таким образом, функция  $L_B$  является максимально плоской при  $x = 0$  [12].

На рис. 1 приведена схема нормированного фильтра прототипа нижних частот с сосредоточенными параметрами для нечетного числа элементов. Количество элементов в схеме показывает степень  $N$  в функции  $L_b$ . Для обеспечения низкого уровня подавления установлен большой порядок фильтра с числом элементов в нем, равным 33.

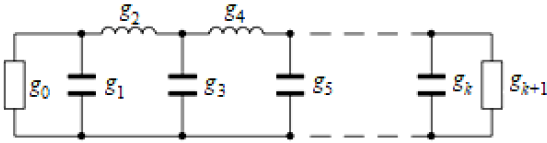


Рис. 1. Схема нормированного фильтра прототипа нижних частот

Коэффициент передачи, соответствующий максимально плоской частотной характеристике фильтра прототипа, может быть реализован при определенном подборе нормированных параметров  $g$ .

Формула Беннета определяет значения параметров  $g$  [12]:

$$g_0 = g_{k+1} = 1, \quad (2)$$

$$g_k = 2 \sin \left[ \frac{(2k-1) \cdot \pi}{2N} \right]. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены значения для фильтра НЧ Баттерворта с 33 элементами.

Таблица 1

Значение параметров  $g$  фильтра Баттерворта

$g_k$	Значение	$g_k$	Значение	$g_k$	Значение
$g_1$	0,095	$g_{12}$	1,778	$g_{23}$	1,683
$g_2$	0,285	$g_{13}$	1,857	$g_{24}$	1,572
$g_3$	0,472	$g_{14}$	1,919	$g_{25}$	1,447
$g_4$	0,654	$g_{15}$	1,964	$g_{26}$	1,31
$g_5$	0,831	$g_{16}$	1,991	$g_{27}$	1,16
$g_6$	1	$g_{17}$	2	$g_{28}$	1
$g_7$	1,16	$g_{18}$	1,991	$g_{29}$	0,831
$g_8$	1,31	$g_{19}$	1,964	$g_{30}$	0,654
$g_9$	1,447	$g_{20}$	1,919	$g_{31}$	0,472
$g_{10}$	1,572	$g_{21}$	1,857	$g_{32}$	0,285
$g_{11}$	1,683	$g_{22}$	1,778	$g_{33}$	0,095

Для перехода от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра были рассчитаны значения элементов при заданной круговой частоте  $\omega_c$ , на частоте среза  $f_c = 6$  ГГц, волновом сопротивлении  $Z_b = 50$  для  $k$ -нечетных и  $k$ -четных значений [12]:

$$\omega_c = 2\pi f_c, \quad (4)$$

$$C_k = \frac{g_k}{\omega_c \cdot Z_b}, \quad (5)$$

$$L_k = \frac{g_k \cdot Z_b}{\omega_c}. \quad (6)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные значения сосредоточенных элементов  $L$  и  $C$ .

Далее были найдены параметры отрезков линий, реализующих индуктивности и емкости. Длина волны в линии находится по формуле

$$\lambda_g = \frac{3 \cdot 10^{11}}{f_c \cdot \sqrt{4}}, \quad (\text{мм}). \quad (7)$$

В симметричной полосковой линии  $\lambda_g = \lambda_{gL} = \lambda_{gC}$  [13].

Таблица 2

Значение схемы ФНЧ

$k$	Элементы	
	Индуктивность $L$ , нГн	Емкость $C$ , пФ
1	–	0,05049
2	0,3775	–
3	–	0,2501
4	0,8676	–
5	–	0,4408
6	1,326	–
7	–	0,6155
8	1,737	–
9	–	0,7679
10	2,085	–
11	–	0,8926
12	2,358	–
13	–	0,985
14	2,545	–
15	–	1,042
16	2,641	–
17	–	1,061
18	2,641	–
19	–	1,042
20	2,545	–
21	–	0,985
22	2,358	–
23	–	0,8926
24	2,085	–
25	–	0,7679
26	1,737	–
27	–	0,6155
28	1,326	–
29	–	0,4408
30	0,8676	–
31	–	0,2501
32	0,3775	–
33	–	0,05049

Параметры полосок индуктивностей технологически ограничены шириной, она не должна быть меньше 20 мкм. Также ширина не должна превышать 200 мкм, так как это значение близко к значению регулярной линии передачи. Диапазон ширины составляет от 40 до 180 мкм. Ширина отрезков линий приведена в табл. 3.

Таблица 3

Ширины отрезков линий, реализующих индуктивные элементы

№	$b$ , мкм	№	$b$ , мкм
1	40	5	120
2	60	6	140
3	80	7	160
4	100	8	180

Волновое сопротивление отрезков линий с эквивалентной схемой индуктивности рассчитано по формуле при  $b/d < 2$  [14]:

$$W_B = 314 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{(1-t/d)}{(1+b/d)}, \quad (8)$$

где  $t$  – толщина слоя металлизации, равная 3 мкм;  $d$  – толщина диэлектрика, равная 254 мкм;  $b$  – ширина линии.

Для обеспечения так называемого «скачка сопротивлений» при переходе от индуктивного элемента к емкостному необходимо обеспечить разницу волновых сопротивлений этих элементов не менее чем в 3 раза.

После того как были найдены средние значения волновых сопротивлений, были рассчитаны длины отрезков (табл. 4), реализующих индуктивности и емкости [13]:

$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left( \frac{\omega_c \cdot L}{Z_{BL}} \right), \quad (9)$$

$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1} (\omega_c \cdot C \cdot Z_{BC}). \quad (10)$$

Таблица 4  
Значения длин отрезков линий, реализующих индуктивности и емкости

Индуктивность $L$ , нГн	Длина $l_L$ , мм	Емкость $C$ , пФ	Длина $l_C$ , мм
0,3775	0,518	0,05049	0,109
0,8676	1,233	0,2501	0,542
1,326	2,026	0,4408	0,972
1,737	3,149	0,6155	1,396
2,085	4,114	0,7679	1,807
2,358	4,318	0,8926	2,195
2,545	4,448	0,985	2,539
2,641	4,511	1,042	2,796
		1,061	2,896

Из диапазона 40–180 мкм было выбрано среднее значение ширины полосок индуктивного элемента. Ширина емкостного элемента была рассчитана по формуле при  $b/d > 2$  [14]:

$$W_B = 314 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{1}{(1+b/d) \cdot \frac{1}{(1-t/d)}}. \quad (11)$$

По средним значениям длин микрополосковых линий (табл. 5) в САПР Advanced Design System (ADS) была создана модель ФНЧ с двумерной конструкцией (рис. 2), в которой реализуется дополнительная электромагнитная связь между несмежными резонаторами. Такая перекрестная связь позволяет существенно увеличить крутизну склона АЧХ [15].

Таблица 5  
Средние значения длин микрополосковых линий, реализующих индуктивные и емкостные элементы

Среднее значение	Индуктивность	Емкость
Волнового сопротивления, Ом	69	23
Длин отрезков, мм	2,64	1,695
Ширин отрезков, мм	0,110	1,64



Рис. 2. Топология фильтра нижних частот

### Синтез топологии фильтра в САПР

Согласно требованиям технического задания, разрабатываемый фильтр планируется применять как дополнительное частотно-селективное звено совместно с ППФ диапазона 5–6 ГГц для подавления побочных полос пропускания ППФ. Таким образом, было принято решение оптимизировать предложенную топологию под требуемый частотный диапазон. В качестве целей оптимизации были установлены: возвратные потери в полосе частот 5–6 ГГц не хуже –20 дБ, потери в полосе не более –3 дБ. Сама оптимизация проводилась в несколько этапов. На первом этапе были получены желаемые характеристики в полосе. Целью второго этапа оптимизации было увеличение крутизны потребовалось увеличивать перекрестную связь между звеньями фильтра. Перекрестная связь была увеличена за счёт добавления в топологию коротких шунтирующих отрезков полосковых линий (рис. 3).

В качестве материала подложки был выбран поликор. Фильтр 16-го порядка располагается на подложке с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 10,3$  и толщиной  $d = 0,25$  мм. Рассматриваемая топология симметрична относительно центрального емкостного элемента. Финальный рисунок топологии фильтра после программной оптимизации представлен на рис. 3.



Рис. 3. Топология измененного ФНЧ с двумерной конструкцией

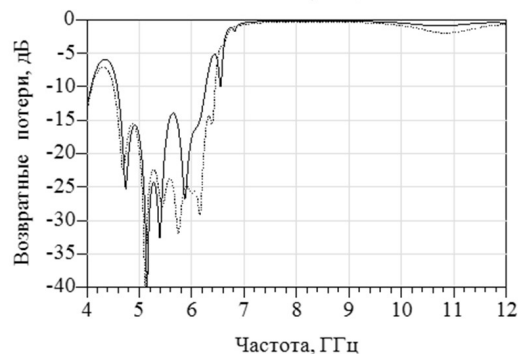
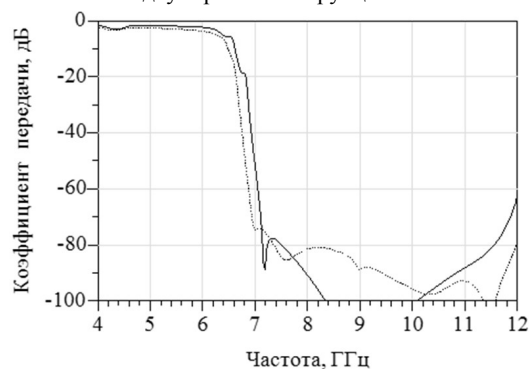


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики фильтра нижних частот с двумерной конструкцией: — – FEM, ..... – Momentum Microwave



На рис. 4 представлены результаты моделирования в САПР ADS двумя методами расчета (Momentum Microwave и FEM) АЧХ прямых потерь  $S_{21}$  и возвратных потерь  $S_{11}$  фильтра нижних частот с полосой пропускания 5–6 ГГц и полосой затухания 7–8 ГГц.

Зависимости показывают большую крутизну склона АЧХ. Однако видно, что при расчете разными методами характеристика смещается на 0,3 ГГц. Оба метода позволяют проводить расчет моделей с учетом перекрестных связей. Momentum идентифицирует паразитную связь лишь между близко расположенными объектами. В свою очередь FEM моделирует действие электромагнитного поля на всей площади модели, что позволяет учесть намного больше паразитных связей, влияющих на характеристики. В итоге результаты двух методов имеют различия.

#### Исследование изготовленных опытных образцов фильтров

Для проведения исследований топологии в коаксиальном тракте разработанный фильтр 16-го порядка на подложке из поликора устанавливался на печатную плату с помощью токопроводящего клея ЕРО-ТЕК (рис. 5). Размеры подложки 36×7,1 мм. Подводящие отрезки на печатной плате выполнены в виде копланарных линий с волновым сопротивлением 50 Ом.

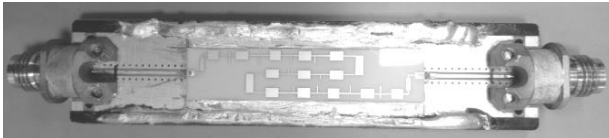


Рис. 5. Конструкция фильтра нижних частот

На рис. 6 показано сравнение расчетных данных с экспериментальными. По результатам измерения видно, что подавление в полосе заграждения, по сравнению с расчетным, выше на 20 дБ, крутизна склона по экспериментальным данным увеличилась.

Для проверки параметров фильтра в условиях, приближенных к реальным, на фильтр была установлена крышка (рис. 7) длиной 40 и шириной 10 мм, имитирующая указанное реальное электромагнитное окружение. Расстояние от платы до крышки составляет 3 мм. На крышку с внутренней стороны наносился поглощающий материал. Такая конструкция обеспечивает ЭМС фильтра с другими элементами системы, в которой данный фильтр будет использован.

На рис. 8 и 9 сравниваются АЧХ фильтра с крышкой, без крышки и с поглощающим материалом.

С крышкой возвратные потери увеличиваются, это происходит из-за переотражения волн. Эта проблема решается с помощью поглотителя ЗИПСИЛ КЛ РПМ-01 ТУ 2541-004-24624998-2014, который представляет собой листовой материал толщиной 1 мм с высокоадгезионным клеевым слоем для монтажа на металлических поверхностях. Он легко поддается резке, что позволяет создать конфигурацию под

любую крышку или корпус. Улучшение подавления вне полосы пропускания фильтра можно наблюдать на рис. 8.

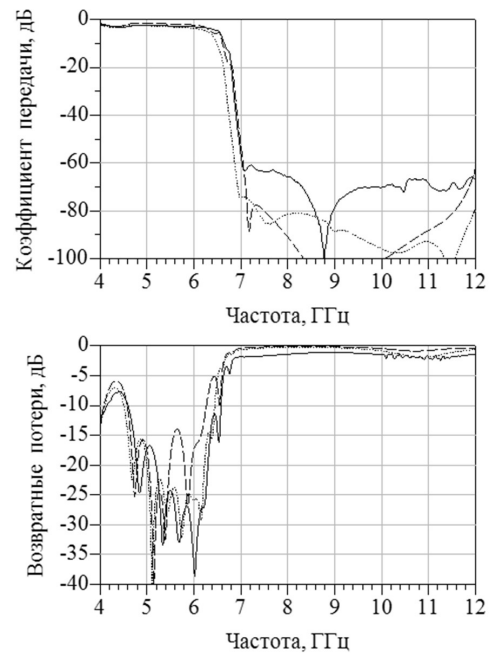


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики измеренного фильтра нижних частот: — — измеренные; ..... — Momentum Microwave; - - - - FEM



Рис. 7. Конструкция фильтра нижних частот с крышкой

Благодаря простоте изготовления и высоким частотно-селективным свойствам, фильтры рассмотренного типа весьма перспективны для применения в СВЧ-устройствах. В качестве продолжения эксперимента по предложенной методике был рассчитан, изготовлен и измерен фильтр аналогичной конструкции, но оптимизированный для полосы пропускания 6–7 ГГц.

#### Заключение

Изготовленная конструкция ФНЧ на микрополосковых резонаторах обладает большой крутизной и высокими амплитудно-частотными характеристиками. Благодаря свернутой форме образуются дополнительные связи, с помощью которых существенно увеличивается крутизна склона АЧХ. Такой фильтр прост в изготовлении, а установка на плате позволяет существенно экономить место в приборе. При этом численный электродинамический расчет хорошо согласуется с экспериментом, что позволяет без кардинальных изменений проводить синтез устройств с заданными характеристиками.

В ходе работы было экспериментально исследовано влияние электромагнитного окружения (фрезерованный канал и заполнение его поглощающим материалом) на топологию фильтра.

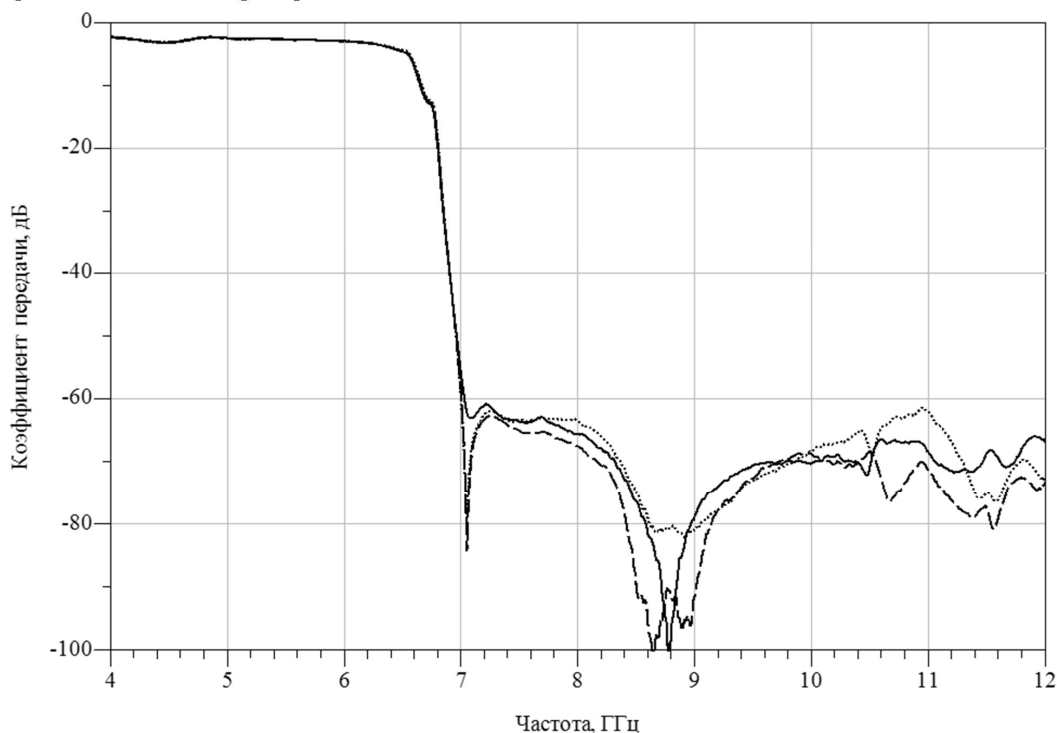


Рис. 8. Коэффициент передачи измеренного фильтра низких частот:  
 — без крышки; ..... — с крышкой; - - - - с крышкой и поглотителем ЗИПСИЛ

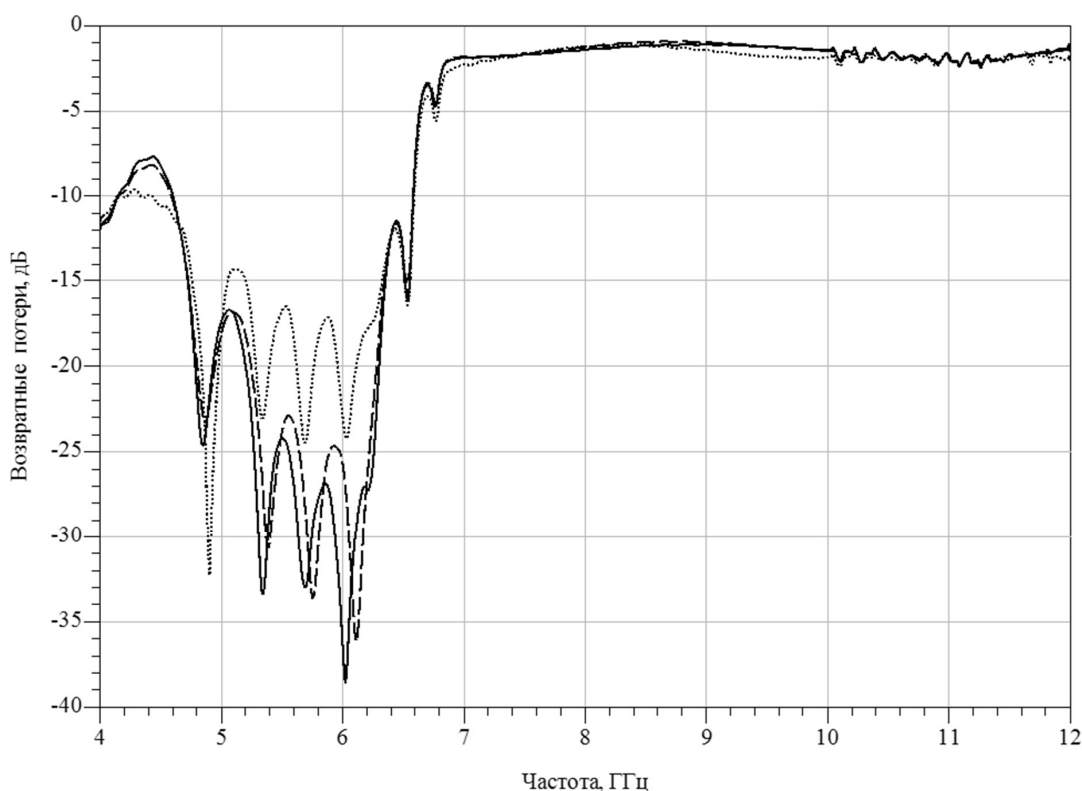


Рис. 9. Коэффициент отражения измеренного фильтра низких частот:  
 — без крышки; ..... — с крышкой; - - - - с крышкой и поглотителем ЗИПСИЛ

#### Литература

1. Morgan M.A. Reflectionless filters. – Boston, London. Artech House Microwave Library, 2017. – P. 258.
2. Hunter I.C. Theory and design of microwave filters. IET Electromagnetic Waves Series. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. – Vol. 48. – P. 353.

3. With Parallel Open-ended stubbing novel double-folded SCMRC structure compact lowpass filter with wide stopband / K. Li, M. Zhao, Yo. Fan, Z. Zhu, W. Cui // Progress in Electromagn. – 2013. – Vol. 36. – P. 77–86.
4. A compact lowpass filter with ultra wide stopband using stepped impedance resonator / M. Hayati, F. Shama // Radioengineering. – 2017. – Vol. 26, No. 1. – P. 269–274.

5. Compact ultra wide band filter using triangular patch resonators / D. Kumarand, A. De // *Radioelectronics and Commun Syst.* – 2015. – Vol. 58, No. 4. – P. 151–156.

6. Microstrip lowpass filter with high and wide rejection band / M. Hayati, H. Asadbeigi, A. Sheikhi // *Electronics Lett.* – 2012. – Vol. 48, No. 19. – P. 1217–1219.

7. Design and simulation of printed micro strip low pass filter based on the electromagnetic models 18GHz printed microstrip lowpass filter using x-models / K. Arfiya, K. Pramod, H. Kumaraswamy, N. Jayaraj // *International Journal of Research in Engineering and Technology.* – 2014. – No. 3. – P. 312–318.

8. A novel differential equation model for a microstrip lowpass Filter / J. Hong, Y. Liu, B. Wang, K. Mei // *Microwave and optical technology letters.* – 2002. – Vol. 35, No. 5. – P. 368–370.

9. Implementations of cross couplings in microwave bandpass filters / B.A. Belyaev, A.M. Serzhantov, Y.F. Bal'va, V.V. Tyurnev, A.A. Leksikov, R.G. Galeev // *Microwave and Optical Technol. Lett.* – 2014. – Vol. 56, No. 9. – P. 2021–2025.

10. Высокоселективный полосковый фильтр нижних частот с уровнем заграждения более 100 дБ в широкой полосе / Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, А.А. Лексиков, Я.Ф. Бальва, Е.О. Грушевский, С.А. Ходенков // *Письма в ЖТФ.* – 2020. – Т. 46, № 8. – С. 10–13.

11. Sharp cut-off, miniaturized metamaterial binomial microstrip low-pass filter / A. Abid, H. Zhirun // *Microwave and Optical Technology Letters.* – 2007. – Vol. 49, No. 10. – P. 2406–2409.

12. Устройства СВЧ и антенны. – Ч. 1 / В.А. Неганов, Д.С. Ключев, Д.П. Табаков. – М.: Стереотип: ЛЕНАНД, 2016. – 608 с.

13. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / А.А. Вольман, А.Д. Муравцова. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

14. Гошин Г.Г. Антенны и фидеры. Сборник задач с формулами и решениями: учеб. пособие. – Томск, 2012. – 236 с.

15. Фильтр нижних частот на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле / Б.А. Беляев, С.А. Ходенков, Р.Г. Галеев, В.Ф. Шабанов // *Доклады Академии наук.* – 2019. – Т. 485, № 1. – С. 27–32.

Lamanov Y.A., Kudryavtseva T.O., Drobotun N.B.

### Design and Research Process of Microstrip Low-Pass Filters with High Slope Steepness

This paper presents the results of design process and scientific investigation of planar low pass filters with cut-off frequencies of 6 and 7 GHz. Main features of this design are high steep performance, high level of rejection out of band (in comparison to conventional topologies), high filter order and small occupied area. The analysis of high absorptive electromagnetic influence on filter performance are shown as well.

**Keywords:** low pass filter, microstrip device, steepness.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-7-13

### References

1. Morgan M.A. *Reflectionless filters.* Boston, London, Artech House Microwave Library, 2017, 258 p.

2. Hunter I. C. *Theory and design of microwave filters. IET electromagnetic waves series.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006, vol. 48, 353 p.

3. Li K., Zhao M., Fan Yo., Zhu Z., Cui W. With Parallel open-ended stubbing novel double-folded SCMRC structure compact lowpass filter with wide. *Progress in Elettromagn,* 2013, vol. 36, pp. 77–86.

4. Hayati M., Shama F. A Compact lowpass filter with ultra wide stopband using stepped impedance resonator. *Radi-oengineering,* 2017, vol. 26, no. 1, pp. 269–274.

5. Kumarand D., De A. Compact ultra wide band filter using triangular patch resonators. *Radioelectronics and Commun Syst,* 2015, vol. 58, no. 4, pp. 151–156.

6. Hayati M., Asadbeigi H., Sheikhi A. Microstrip low-pass filter with high and wide rejection band. *Electronics Lett,* 2012, vol. 48, no. 19, pp. 1217–1219.

7. Arfiya K., Pramod K., Kumaraswamy H., Jayaraj N. Design and simulation of printed micro strip lowpass filter based on the electromagnetic models 18GHz printed microstrip lowpass filter using x-models. *International Journal of Research in Engineering and Technology,* 2014, no. 3, pp. 312–318.

8. Hong J., Liu Y., Wang B., Mei K. A novel differential equation model for a microstrip lowpass filter. *Microwave and Optical Technology Letters,* 2002, vol. 35, no. 5, pp. 368–370.

9. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Y.F., Tyurnev V.V., Leksikov A.A., Galeev R.G. Implementations of cross couplings in microwave bandpass filters. *Microwave and Optical Technol. Lett,* 2014, vol. 56, no. 9, pp. 2021–2025.

10. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Leksikov A.A., Bal'va Y.F., Grushevsky E.O., Khodenkov S.A. [High selectivity band pass filter with rejection of 100 dB in wide bandwidth]. *Technical Physics Letters,* 2020, vol. 46, no. 8, pp. 10–13 (in Russ).

11. Abid A., Zhirun H. Sharp cut-off, miniaturized metamaterial binomial microstrip low-pass filter. *Microwave and Optical Technology Letters,* 2007, vol. 49, no. 10, pp. 2406–2409.

12. Neganov V.A., Kluev D.S., Tabakov D.P. *Ustroistva SVCH i antennoy CH. 1* [Microwave devices and antennas]. Moscow, Stereotip: LENAND Publ., 2016. 608 p. (in Russ).

13. Volman A.A., Muravtsova A.D. *SVCH tsepi. Analiz i avtomatizirovannoe proektirovanie* [Microwave circuits. analysis and design]. Moscow, Radio i Svyaz, 1990, 288 p. (in Russ).

14. Goshin G.G. *Antenny i fidery. Sbornik zadach s formulami i resheniyami* [Antennas and feeders. Problem book with formulas and solutions]. Tutorial. Tomsk, 2012, 236 p. (in Russ).

### Ламанов Юрий Александрович

Студент каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧ и КР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-870-07-66  
Эл. почта: yury\_lamanov@mail.ru

### Кудрявцева Татьяна Олеговна

Студентка каф. СВЧ и КР ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-906-972-41-02  
Эл. почта: tanja.kudrjawzewa@mail.ru

### Дроботун Николай Борисович

Канд. техн. наук, начальник отдела СВЧ-схемотехники, департамент информационно-измерительных систем (ДИИС), АО «НПФ «Микран»  
Кирова пр-т, 51 д, г. Томск, Россия, 634041  
Тел.: +7-960-975-73-44  
Эл. почта: nikolay.drobotun@micran.ru



15. Belyaev B.A., Khodenkov S.A., Galeev R.G., Shabanov V.F. [Low pass filter based on two-dimensional microstrip electromagnetic crystal]. *Reports of the Academy of Sciences*, 2019, vol. 485, no 1, pp. 27–32 (in Russ).

---

**Yury A. Lamanov**

Student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-870-07-66  
Email: yury\_lamanov@mail.ru

**Tatyana O. Kudryavtseva**

Student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-906-972-41-02  
Email: tanja.kudrjawzewa@mail.ru

**Nikolai B. Drobotun**

Candidate of Science in Engineering, Head of Microwave Design Group, Test and Measurement Department, MICRAN, Research and Production Company  
51 d, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634041  
Phone: +7-960-975-73-44  
Email: nikolay.drobotun@micran.ru

УДК 004.934

Г. Лань, А.С. Фадеев, А.Н. Моргунов

## Синтез фрагментов голоса человека на основе модели реконструкции частотных спектров

Разрабатывается методика параметрического синтеза фонем голоса человека на основе аналитического описания отдельных гармоник. Представлена методика анализа спектра и спектрограмм оригинальных фонем для получения основных амплитудно-частотных характеристик составляющих сигнала, предложен алгоритм реконструкции речевого сигнала на основе полученных наборов параметров. Предложена методика оценки качества синтезированных элементов речи.

**Ключевые слова:** синтез речи, спектр, спектрограмма, фонема, гармоника, амплитудно-частотная характеристика.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-14-20

Большинство исследований, связанных с синтезом речи человека, в основном используют один из двух подходов: синтез на основе готовых фрагментов и параметрический синтез [1]. Первая группа методов включает методы синтеза на основе кодирования и редактирования речевого сигнала. Недостатками данных методов являются значительная зависимость от размера и качества звуковой библиотеки, высокие требования к вычислительным ресурсам, возможность синтезировать только сегменты речи с ограниченным словарным запасом и возникающие сплайсинг-разрывы в результате синтеза.

Вторая стратегия – система гармонического синтеза – основывается на синтезе акустических параметров звукового сигнала, например кодирование с линейным прогнозированием (LPC). Требования к размерам звуковой библиотеки для параметрического синтеза существенно ниже, чем для методов первой группы, система способна адаптироваться к широкому диапазону ритмических характеристик, чем достигается хорошая естественность синтезированной речи, и значительно менее требовательна к вычислительным ресурсам. При формантном синтезе обычно используется несколько формантных фильтров, а синтез отдельных речевых сигналов осуществляется путем установок значений параметров каждого фильтра. Основными недостатками этого метода являются множество параметров и высокая сложность процесса их настройки [1, 2].

В связи с использованием гармонических характеристик предлагаемый в настоящей работе метод не требует настройки фильтров, все значения параметров можно получить на основе анализа спектра отдельных фонем и использовать полученные гармонические параметры для предложенной модели синтеза речи.

Одним из основных аспектов синтеза человеческой речи является качество выходного сигнала, от чего зависит пригодность использования конкретной технологии синтеза в коммерческих целях. Чаще всего в задачах синтеза речи человека применяются TTS-алгоритмы (Text to Speech) [3, 4].

В отрасли информационно-коммуникационных технологий существует целый ряд методов, позволяющих произвести оценку качества сформированного сигнала. Основными метриками, по которым определяется качество сигнала, являются оценки разборчивости, естественности и мультимодальности речи. Сами методы оценки качества можно разделить на объективные и субъективные. В проведенных исследованиях использовалась методика средней экспертной оценки (MOS, или mean opinion score). MOS-метод является субъективным, рекомендован стандартом Р.800 МСЭ-Т для оценки качества передачи звука в телефонных сетях [5, 6].

В рамках задачи синтеза речи MOS-метод применяется для выяснения надежности используемого решения и качества синтезируемого звукового сигнала. Основная задача в разработке систем синтеза речи – разработать систему и методику генерации человеческой речи, результаты которой будут таковы, что человек на слух не смог бы отличить сгенерированный сигнал от сигнала, что был записан реальным индивидом.

Опираясь на опыт предыдущих исследований, в данной работе рассматривается методика параметрического синтеза отдельных фонем русского языка на основе гармонических параметров, рассматривается возможность создания универсальных аналитических моделей, позволяющих описать и в дальнейшем синтезировать фонемы голоса человека.

### Синтез гласных звуков

Согласно [7] гласный звук состоит из одного слога, слог состоит из одной или нескольких фонем. Фонема – минимальная смысловозначительная единица языка, не имеющая самостоятельного лексического или грамматического значения, служащая для различения и отождествления значимых единиц языка: морфем и слов [8].

Таким образом, фонемы являются наименьшими элементарными составляющими речи человека, синтез которых на основе аналитических моделей и наборов связанных параметров позволяет генерировать более крупные элементы речи: звуки, буквы и слова.

На рис. 1 и 2 изображены спектрограммы фонем двух гласных и двух согласных букв: «О», «Э» и «Ш», «М» соответственно. Очевидно, что согласные звуки имеют более широкий спектр, чем фонемы гласных букв. Особенно здесь стоит выделить шипящие, например, звук «Ш» – спектрограмма данной фонемы по своей форме больше похожа на спектрограмму шумового сигнала. Отсюда следует вывод, что аналитическая модель описания фонем согласных букв гораздо сложнее аналогичной модели для гласных звуков.

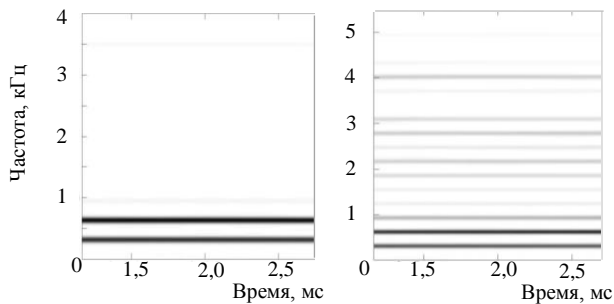


Рис. 1. Спектрограммы фонем гласных букв «О» и «Э»

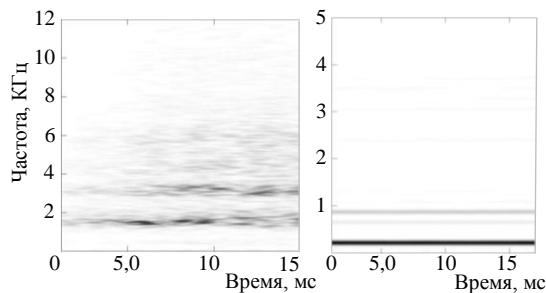


Рис. 2. Спектрограммы фонем согласных букв «Ш» и «М»

Для дальнейшего синтеза частей фонем необходимо декомпозировать звук гласной буквы на простые компоненты частотного спектра – гармоники, получить аналитическое описание и исчерпывающий набор параметров, которые позволят создать математическую модель для синтеза каждой отдельной гармоники и фонемы сигнала. Гармоника – дополнительный тон, который по частоте всегда выше основного тона, причём строго кратно числам натурального ряда (т.е. выше по частоте в 2–5 и более раз) [9].

Спектральный анализ гласных звуков показывает, что на некоторых участках частотный спектр гармоник остаётся неизменным (см. рис. 1, 2). Для упрощения моделирования и синтеза отдельных гармоник можно применить следующую аналитическую модель на квазистационарных участках:

$$\varphi_i(t) = A_i \sin(2\pi \nu_i t), \quad (1)$$

где  $\varphi_i(t)$  – временная функция гармоники  $i$ ,  $A_i$  и  $\nu_i$  – амплитуда и частота гармоники  $i$  соответственно. Аналитическая модель квазистационарного участка фонемы будет иметь вид

$$\Phi(t) = \sum_i \varphi_i(t), \quad (2)$$

Для определения параметров  $A_i$  и  $\nu_i$ , а также числа отдельных гармоник используются оконное преобразование Фурье (ОПФ) и полученная на его основе спектрограмма записанного сигнала.

### Спектрограмма звукового сигнала

Основным этапом предлагаемой методики является получение спектрограммы анализируемого сигнала, которая является результатом применения ОПФ:

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)W(\tau-t)e^{-j2\pi\nu\tau} d\tau. \quad (3)$$

Здесь  $W(\tau-t)$  – оконная функция;  $f(t)$  – значение амплитуды исходного сигнала в момент времени  $t$ ;  $\tau$  – положение окна;  $\nu$  – частота компоненты. В виду малой продолжительности по времени записанного сигнала окно ОПФ было подобрано таким образом, чтобы в результате получить высокое частотное разрешение.

### Квазистационарное состояние

Для чистоты эксперимента были использованы записи звуков отдельных фонем, сделанные одним человеком. Записанные звуки были произнесены на относительно разных частотах: низкие, высокие и «естественные» для человека и с различной эмоциональной окраской: подъём интонации, спад, без эмоционального произношения и пр.

Известно, что процесс воспроизведения звучания человеческого голоса нестабильный и непериодический [8], в данной работе анализируется только квазистационарный временной отрезок звучания фонемы (период выдержки). Значения параметров фонемы и их точность зависят от свойств выбранного временного отрезка. На рис. 3 продемонстрирована спектрограмма гласного звука «А», произнесенного с эмоциональным подъемом. Анализ рисунка показывает, что несмотря на нестационарность всего сигнала и каждой гармоники по отдельности, отдельные короткие временные отрезки продолжительностью  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  с являются квазистационарными и для них возможно применение описанной модели.

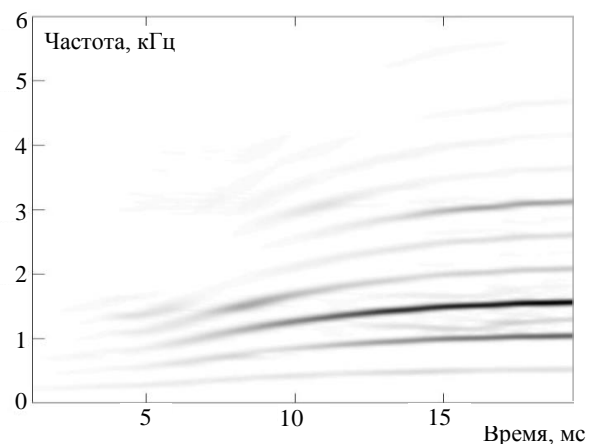


Рис. 3. Спектрограмма гласной буквы «А»

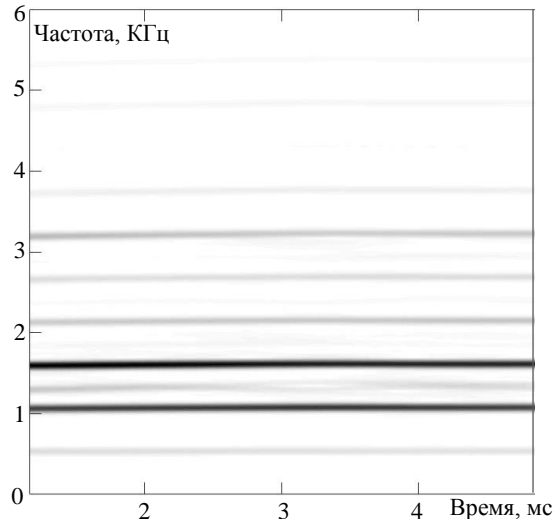


Рис. 4. Спектрограмма квазистационарного участка «А»

### Получение спектра

Для определения количества гармоник ( $n$ ), присутствующих в отдельных фонемах, и определения значения амплитуд ( $A_i$ ) основных частот каждой гармоники были использованы амплитудно-частотные характеристики фонем речи, представленные спектром сигнала. Для построения спектра сигнала применено быстрое преобразование Фурье (БПФ) в пакете прикладных программ MATLAB:

$$Y(k) = \sum_{j=1}^N X(j)W_N^{(j-1)(k-1)}, \quad (4)$$

где  $Y(k)$  – дискретный спектр сигнала;  $W_N = e^{(-2\pi i)/N}$  – комплексная экспонента;  $X(j)$  – дискретный сигнал анализируемой фонемы;  $j, k$  – номер отсчета в последовательностях  $X(j)$  и  $Y(k)$  соответственно;  $N$  – количество отсчетов.

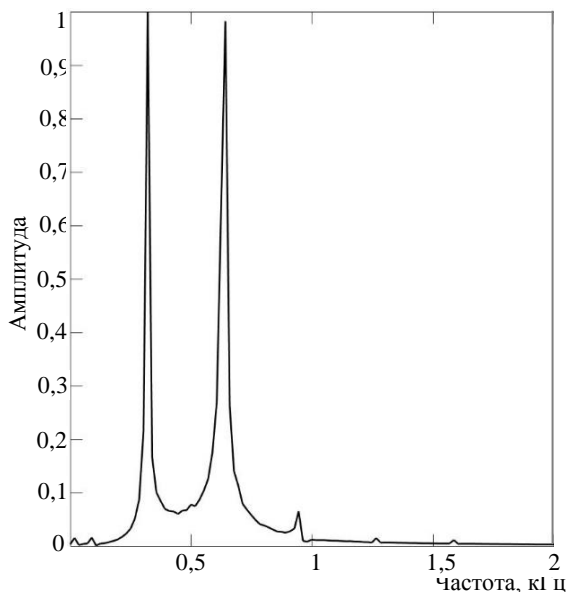


Рис. 5. Спектр гласной буквы «У»

На рис. 5 показано, что основная энергия сигнала сконцентрирована в диапазоне частот 100–800 Гц,

а максимальной амплитудой обладает первая гармоника, имеющая частоту 286,5 Гц. Гармоники с частотами выше 800 Гц имеют малую амплитуду и практически неразличимы на фоне шумов. В логарифмическом представлении (рис. 6) пять гармоник (F1–F5) выражены более явно в отличие от линейной шкалы (см. рис. 5).

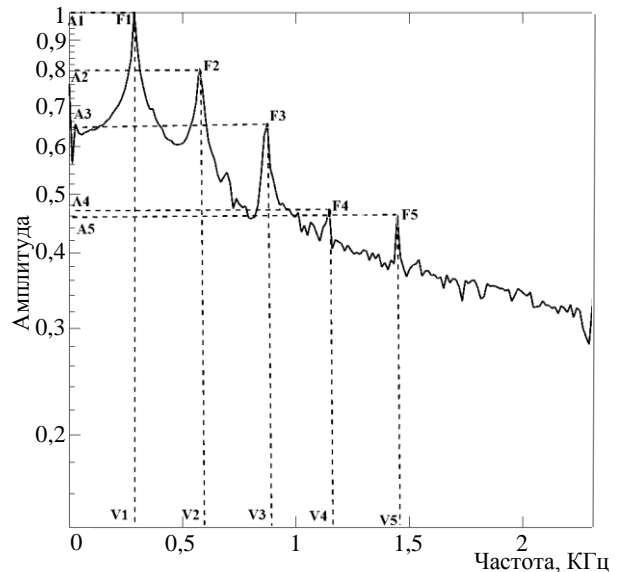


Рис. 6. Спектр гласной буквы «У» на логарифмической шкале

### Вычисление значений параметров для отдельных гармоник

Для возможности синтеза отдельной гармоники  $i$  необходимо получить набор векторов  $F_i$ , содержащих параметры  $P_{ij}$ . Такие векторы составляют матрицу параметров  $M_\Phi$  гармоник записанного звукового сигнала:

$$M_\Phi = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_i \ F_n].$$

Для построения математической модели и реконструкции отдельных гармоник был предложен способ параметрического описания гармоник речи человека на основе полученных частотно-временных характеристик [4]. Очевидно, что амплитуда  $A_i$  и частота  $\nu_i$  являются основными параметрами, характеризующими поведение каждой гармоники гласного звука человеческой речи во времени. Для вычисления значений параметров каждой гармоники  $P_{ij}$  используются численные значения  $A_i$  и  $\nu_i$  вершин каждого всплеска спектра звукового сигнала  $F_i$  (рис. 6).

В таблице приведены параметры значений частоты и амплитуды каждой гармоники, полученные для некоторых гласных букв. Очевидно, что максимальной амплитудой гласного звука «У» обладают гармоники с индексами  $i = 1$  и  $i = 2$ , что соответствует диапазону 200–600 Гц; для звука «А» – с индексами  $i = 1–6$ , и соответствуют диапазону 200–1600 Гц; для звука «О» с индексами  $i = 1, 2$ , и диапазон составляет 300–700 Гц; для звука Э – с индексами  $i = 1–3$ ,  $i = 6–10$  и  $i = 12$ , им соответствуют

диапазоны частот 300–1000 и 1800–3100 Гц и около 4000 Гц; для звука «И» максимальной амплитудой обладают гармоники с индексами  $i = 1$  и  $i = 9-14$ , их диапазоны частот составляют 150–250 и 2900–4100 Гц. В среднем расстояние между гармониками состав-

ляет значение частоты первой гармоники. Но не все гармоники присутствуют в фонемах, амплитуда некоторых гармоник настолько мала, что они не присутствуют в спектре. Записанные гласные звуки не имели эмоциональной окраски.

**Значения параметров гармоник гласных букв**

Матрица параметров буквы «О»													
Гармоники	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	-
(v)	321	642	944	1265	1586	1889	2209	2548	2851	3172	3492	4116	-
(A)	0,62	0,41	0,50	1	0,65	0,42	0,35	0,06	0,03	0,02	0,03	0,005	-
Матрица параметров буквы «У»													
Гармоники	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	-
(v)	287	573	873	1146	1446	2320	2593	3179	3479	3776	6086	6372	-
(A)	1	0,12	0,02	0,003	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,004	-
Матрица параметров буквы «А»													
Гармоники	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$
(v)	265	529	793	1058	1322	1587	1851	2116	2645	2915	3171	3435	3703
(A)	0,78	0,74	0,51	0,60	1	0,26	0,08	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05
Матрица параметров буквы «Э»													
Гармоники	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$
(v)	307	614	921	1244	1511	1858	2165	2472	2779	3087	3361	3717	4024
(A)	0,85	1	0,33	0,08	0,07	0,18	0,27	0,13	0,24	0,12	0,01	0,04	0,21
Гармоники	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$	$F_{17}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(v)	4331	4654	4954	5266	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(A)	0,03	0,01	0,03	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Матрица параметров буквы «И»													
Гармоники	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$
(v)	303	598	901	1205	1499	1803	2106	2409	2713	3007	3311	3614	3917
(A)	1	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05	0,1	0,07	0,07	0,03
Гармоники	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$	$F_{17}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(v)	4212	4524	9342	9924	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(A)	0,04	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Для удобства представления АЧХ в работе принято решение использовать нормализованные значения амплитуд всех гармоник отдельных фонем, при котором за единицу принимается значение максимальной амплитуды фонемы.

$$\varphi_i(t) = \frac{A_i}{\max(A_j)} \sin(2\pi v_i t), \quad (5)$$

Однако для возможности синтеза гармоник по формуле (2) необходимо выполнить нормализацию значений амплитуд фонем таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1, \quad (6)$$

$$\varphi_i(t) = \frac{A_i}{\sum A_j} \sin(2\pi v_i t). \quad (7)$$

**Генерация сигнала. Оценка качества синтезированного сигнала**

В настоящей работе оценка качества предложенной методики для генерации звукового сигнала, имитирующего голос человека, производится на основе полученных параметров матриц.

$$\Phi(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(2\pi v_i \cdot t), \quad (8)$$

где  $\Phi(t)$  – временная функция синтезированного сигнала;  $\sin(2\pi v_i t)$  – гармоника сигнала;  $v_i$  – частота гармоники,  $A_i$  – значение амплитуды.

Качество синтетического сигнала оценивается путем сравнения АЧХ полученного сигнала и исходного. На рис. 7 представлены спектры оригинального и реконструированного сигнала гласных звуков; все звуковые записи сделаны одним и тем же лицом. Для большей наглядности приведенные спектры показаны в логарифмических осях на рис. 8.

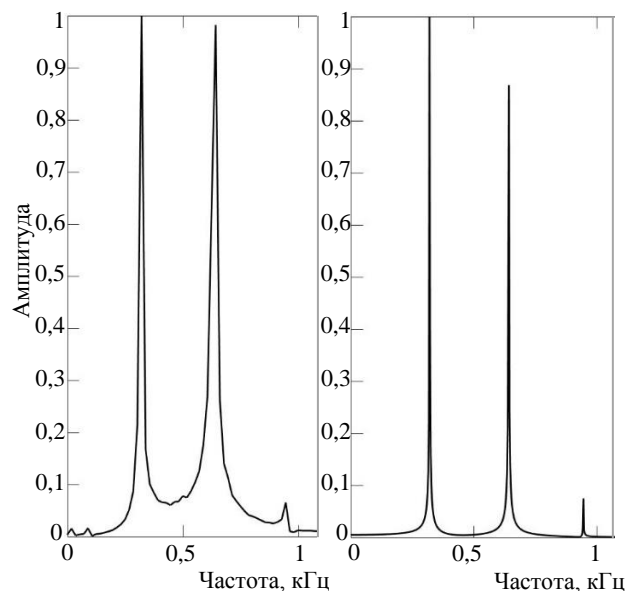


Рис. 7. Спектры звукового сигнала «У»



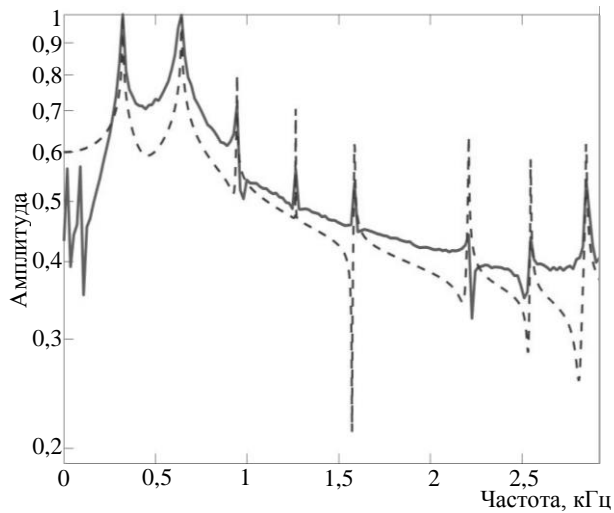


Рис. 8. Спектры звукового сигнала «О» на логарифмической шкале: — — оригинальный сигнал; - - - - - реконструированный сигнал

### Особенности синтеза. Отличия гласных звуков

В настоящем исследовании были рассмотрены различные гласные звуки. На рис. 9 представлены спектры одного и того же гласного звука «А», синтезированного согласно описанной методике для разных звукозаписей диктора.

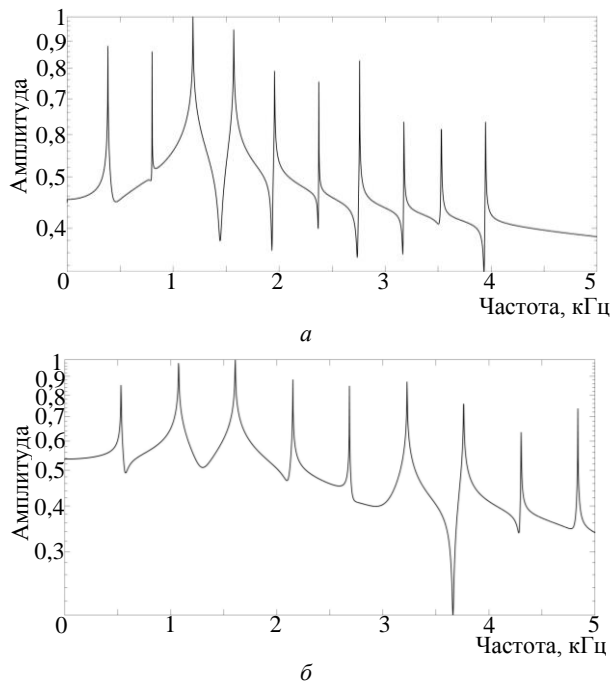


Рис. 9. Спектры звука «А», произнесенные на низкой (а) и высокой (б) частотах

Анализ спектров одного и того же звука, произнесенного человеком на разных частотах, равно как и спектров синтезированных по ним сигналов, показывает, что основными гармониками для записи на более низких частотах (рис. 10, а) являются гармоники с номерами 3 и 4, основная энергия звука сконцентрирована в диапазоне частот 350–3000 Гц.

Для звукозаписей на более высоких частотах (см. рис. 10, б) основные гармоники – 2 и 3, основная энергия сконцентрирована в диапазоне 500–8000 Гц, значение базисной частоты (б) выше, чем (а).

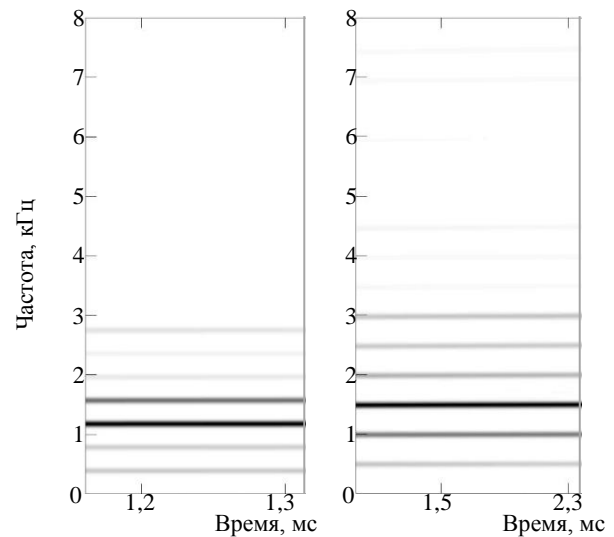


Рис. 10. Спектрограммы звука «А», произнесенные на низкой (а) и высокой (б) частотах

Для оценки качества полученных синтезированных звучаний было принято решение использовать корреляцию оригинального и синтезированного сигналов [17]. Были вычислены коэффициенты корреляции Пирсона для спектра и спектрограммы каждого оригинального и синтезированного звучания каждой фонемы. Коэффициент корреляции Пирсона для оригинального и синтезированного звучания звука А составил: 0,7139 (спектр) и 0,9338 (спектрограмма); для звука «И»: 0,7349 (спектр) и 0,9858 (спектрограмма); для звука «О»: 0,8453 (спектр) и 0,9691 (спектрограмма); для звука «У»: 0,9343 (спектр) и 0,9914 (спектрограмма); для звука «Э»: 0,8649 (спектр) и 0,9694 (спектрограмма). Численные значения показывают, что корреляции спектров оригинальных и синтезированных звучаний являются существенными (0,5–0,8), а спектрограммы оригинальных и синтезированных звучаний являются сильно коррелированными (0,8–1).

### Заключение

В данной работе предложена аналитическая модель описания и синтеза квазистационарных фрагментов отдельных фонем некоторых букв. При помощи спектра и спектрограммы оригинальных фонем получены основные амплитудно-частотные характеристики речи человека и численные значения параметров для модели. Предложена методика, позволяющая синтезировать сигнал фонем человека на основе полученных параметров, а также методика оценки качества синтезированных элементов речи. В работе также приведены некоторые выявленные особенности частотных характеристик наборов гармоник для звуков, произнесенных на разных относительных частотах.

В данной работе также приведена оценка качества полученных синтезированных звучаний с использованием коэффициента корреляции Персона. В результате вычисления корреляции спектра и спектрограмм синтезированных и оригинальных звучаний для разных фонем показано, что корреляция между оригинальными и синтезированными сигналами является высокой.

Методика синтеза речи на основе гармонических характеристик отличается от популярных классических методов гармонического синтеза. Кроме того, предложенная методика может быть применена для исследования и моделирования нестационарных фрагментов фонем голоса человека с изменяющимися частотами тонов, например, при вокальном исполнении или при наличии эмоциональной окраски голоса.

### Литература

- Zhang X. Digital Speech Processing and matlab Simulation (Second Edition). – Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. – 311 p.
- Song Z. Application of MATLAB in Speech Signal Analysis and Synthesis. – Beijing: Beihang University Press, 2013. – 308 p.
- Лобанов Б.М. Компьютерный синтез и клонирование речи / Б.М. Лобанов, Л.И. Цирульник. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 316 с.
- Рыбин С.В. Синтез речи: учеб. пособие. – СПб.: Ун-т ИТМО, 2014. – 92 с.
- Оценка качества синтезированной речи: проблемы и решения / А.И. Соломенник, А.О. Таланов, М.В. Соломенник, О.Г. Хомищев, П.Г. Чистиков // Известия вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 2. – С. 38–42.
- Способы оценки субъективного качества речи, материал из Habr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/en/post/177099>, свободный (дата обращения: 11.05.2021).
- Phoneme (Lexicon of Linguistics). Universiteit Utrecht [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lexicon.hum.uu.nl>, свободный (дата обращения: 11.05.2021).
- Кодзасов С.В. Общая фонетика / С.В. Кодзасов, О.Ф. Кривнова. – М.: РГГУ, 2001. – 592 с.
- Гармоника (музыка): материал из википедии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Гармоника\\_\(музыка\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гармоника_(музыка)) (дата обращения: 26.06.2021).
- Лань Г. Методика реконструкции фонем голоса человека / Г. Лань, А.Н. Моргунов // Вестник современных исследований. – 2018. – Т. 25, № 10-3. – С. 130–135.
- Rabiner L. Theory and applications of Digital Speech Processing / L. Rabiner, R.Schafer // Journal of applied Mechanics. – 2010. – Vol. 1, № 30. – P. 445–447.
- Фролов А.В. Синтез и распознавание речи. Современные решения / А.В. Фролов, Г.В. Фролов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://frolov-lib.ru/books/hi/index.html> (дата обращения: 11.05.2021).
- Немченко В.Н. Введение в языкознание: учебник для вузов. – М.: Дрофа, 2008. – 703 с.
- Вендина Т.И. Введение в языкознание. – М.: Высшая школа, 2001. – 288 с.
- Фирсанков А.А. Система идентификации и синтеза динамических частотных составляющих сложных сигналов // Молодёжь и современные информационные технологии // Сб. трудов XV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск: НИ ТПУ, 2018. – С. 65–66.
- Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход: пер. с англ. / Э. Айфичер, Б. Джервис. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 992 с.
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – 10-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.

### Лань Гунбо

Аспирант отд. информационных технологий (ОИТ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-923-433-76-97  
Эл. почта: langongbo@qq.com

### Фадеев Александр Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент ОИТ НИ ТПУ  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-923-457-95-15  
Эл. почта: fas@tpu.ru

### Моргунов Александр Николаевич

Аспирант Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) Академика Лаврентьева пр-т, 6, г. Новосибирск, Россия, 630090  
Тел.: +7-999-499-73-63  
Эл. почта: toruk010994@gmail.com

Lan G., Fadeev A.S., Morgunov A.N.

### Synthesis of Human Voice Fragments Based on Frequency Spectra Reconstruction

This article details the development of methods for the synthesis of phonemes of the human voice based on the analytical description of individual formants. A technique for analyzing the spectrum and spectrograms of original phonemes to obtain the main amplitude-frequency characteristics of the signal components is presented. An algorithm to reconstruct a speech signal based on the obtained sets of parameters is proposed. A technique to assess the quality of synthesized speech elements is described.

**Keywords:** speech synthesis, spectrum, spectrogram, phoneme, formant, amplitude-frequency characteristic.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-14-20

### References

- Zhang X. [Digital Speech Processing and matlab Simulation (Second Edition)]. Beijing, Publishing House of Electronics Industry, 2010, 311 p.
- Song Z. [Application of MATLAB in Speech Signal Analysis and Synthesis]. Beijing, Beihang University Press, 2013, 308 p.
- Lobanov B.M., Tsiurulnik L.I. *Kompyuternyy sintez i klonirovaniye rechi* [Computer synthesis and speech cloning]. Minsk, Belarusian Science, 2008, 316 p. (in Russ.).
- Rybin S.V. *Sintez rechi. Uchebnoye posobiye* [Synthesis of speech. Textbook.]. St. Petersburg, ITMO University, 2014, pp.21–25 (in Russ.).
- Solomennik A.I., Talanov A.O., Solomennik M.V., Khomitsevich O.G., Chistikov P.G. *Otsenka kachestva sintezi-*

rovannoy rechi: problemy i resheniya [Assessing the quality of synthesized speech: problems and solutions]. *News of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering*, 2013, vol. 56, no. 2, pp. 38–42 (in Russ.).

6. *Sposoby otsenki sub'yektivnogo kachestva rechi* [Methods for assessing the subjective quality of speech]. Available at <https://habr.com/en/post/177099>, free (Accessed: May 10, 2021) (in Russ.).

7. [Phoneme] (Lexicon of Linguistics) Available at <https://lexicon.hum.uu.nl>, free. (Accessed: May 12, 2021).

8. Kodzasov S.V., Krivnova O.F. *Obshchaya fonetika* [General Phonetics], M.: RGGU, 2001, 592 p. (in Russ.).

9. *Garmonika (muzika)* [Harmonics (music)] Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Гармоника\\_\(музыка\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гармоника_(музыка)), free. (Accessed: June 26, 2021) (in Russ.).

10. Lan G., Morgunov A.N. *Modelirovaniye i sintez fonem glasnykh bukv* [Reconstruction Method of Human Voice Phones]. *Bulletin of Modern Studies* vol. 25, no. 10-3, pp. 130–135 (in Russ.).

11. Rabiner L.R. Schafer Theory and applications of Digital Speech Processing, *Journal of Applied Mechanics*, 2010, vol. 1, № 30, pp. 445–447.

12. Frolov A.V., Frolov G.V. *Sintez i raspoznavaniye rechi. Sovremennyye resheniya* [Synthesis and speech recognition. Modern solutions] (in Russ.). Available at <https://frolov-lib.ru/books/hi/index.html>, free (Accessed: May 11, 2021) (in Russ.).

13. Nemchenko V.N. *Vvedeniye v yazykoznaniye: uchebnyk dlya vuzov* [Introduction to Linguistics: A Textbook for High Schools]. Moscow, Bustard, 2008, 703 p. (in Russ.).

14. Vendina T.I. *Vvedeniye v yazykoznaniye* [Introduction to Linguistics]. Moscow, Higher School, 2001, 288 p. (in Russ.).

15. Firsankov A.A. *Sistema identifikatsii i sinteza dinamicheskikh chastotnykh sostavlyayushchikh slozhnykh signalov* [System for identification and synthesis of dynamic frequency components of complex signals]. Youth and modern

information technology. *Proceedings of the XV International Scientific and Practical conference for Students, Graduate Students and Young Scientists*. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2018, pp. 65–66 (in Russ.).

16. Ifeachor E.C., Jervis B.W. [Digital Signal Processing: A Practical Approach]. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2008, 992 p. (in Russ.).

17. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: Uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Probability theory and mathematical statistics: Textbook for universities], Moscow: Higher school, 2004, 479 p. (in Russ.).

---

#### Gongbo Lan

Postgraduate student, Division for Information Technology, Tomsk Polytechnic University (NS TPU)  
15B, Usov st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7-923-433-76-97  
Email: langongbo@qq.com

#### Aleksandr S. Fadeev

Candidate of Science in Engineering,  
Division for Information Technology, NS TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-923-457-95-15  
Email: fas@tpu.ru

#### Alexander N. Morgunov

Postgraduate student, Institute of Computational Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICT SB RAS)  
6, Academician M.A. Lavrentiev pr., Novosibirsk, Russia, 630090  
Phone: +7-999-499-73-63  
Email: toruk010994@gmail.com

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА**



УДК 004.056

В.А. Кучер, М.М. Пулято, А.С. Макарян, М.А. Карманов

## Исследование безопасности пользовательских данных мессенджера Signal в операционной системе Android

Представлены анализ безопасности локально хранящихся данных конечного пользователя, а также особенности работы с ними в приложении signal операционной системы Android. В качестве тестовой версии приложения выступала актуальная на момент написания статьи сборка версии 5.3.12. По определенному сценарию были сгенерированы тестовые пользовательские данные в приложении, из которых были выделены источники информации с критичными данными. По имеющемуся в открытом доступе исходному коду были идентифицированы и проанализированы механизмы работы приложения, включая реализации мер защиты, с выявленными критичными данными. Произведена качественная оценка реализации механизмов защиты локально хранящихся критичных данных приложения по признаку наличия в приложении с типовыми мерами защиты, присущими для любых мобильных приложений, а также со специфичными конкретно для приложений класса мессенджеры. В результате были обнаружены недостатки, связанные с недоступностью определенных защитных механизмов на конкретных версиях операционной системы Android, которые могут повлечь компрометацию данных пользователя. Из преимуществ реализации защиты мессенджера был выделен модуль шифрования баз данных, обеспечивающий стойкую защиту от несанкционированного доступа к сведениям в них ввиду отсутствия определенной версии сборки для персональных компьютеров. В данной статье также предлагается подход к расшифровке баз данных мессенджера, при котором потребуются либо эмулятор устройства с операционной системой Android, либо реальное мобильное устройство в совокупности со специально разработанным приложением.

**Ключевые слова:** мобильные приложения, Android, статический анализ, динамический анализ, декомпиляция, обратная разработка, база данных, кибербезопасность, защита данных.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-23-28

Системы мгновенного обмена текстовыми сообщениями для мобильных устройств с поддержкой голосовой и видеосвязи все больше и больше внедряются в жизнь человека. Мессенджеры становятся неотъемлемой частью не только повседневной жизни людей, но и часто решают личные, конфиденциальные, рабочие и деловые вопросы, от которых зависят благосостояние, безопасность и даже здоровье человека.

Целью данной работы является проведение исследования безопасности мессенджера Signal при наличии физического доступа к устройству для версии данного приложения: 5.3.12 (дата публикации – 01.2021 г.).

При постановке цели данной работы были определены следующие задачи:

- 1) определить перечень критичных данных приложения Signal, хранящихся локально на мобильном устройстве;
- 2) установить специфику работы с критичными данными в мобильном приложении;
- 3) определить перечень используемых мер защиты на основе определённого списка возможных механизмов защиты;
- 4) провести оценку защищенности информации приложения Signal.

### Генерация и описание данных приложения

Для генерации данных в приложении были проведены тестовые сценарии работы, включающие в себя:

- 1) регистрацию в приложении;
- 2) работу с текстовыми сообщениями (отправка исходящих и прием входящих);

- 3) работу с вложениями сообщений;
- 4) выполнение аудио- и видеозвонков;
- 5) создание групповых чатов и выполнение схожих действий, как в случае со стандартными диалогами;
- 6) удаление определенных объектов из истории сообщений с фиксацией состояния критичных данных до изменения и после.

Для получения доступа к файлам приложения использовались устройства с учетными записями пользователя уровня администратор (root) [10].

В результате проведенных манипуляций были получены данные приложения Signal. Архитектура данных программы представлена в табл. 1.

Таблица 1

Архитектура данных программы	
Имя объекта	Описание
db	Директория, содержащая базы данных приложения
f	Директория, содержащая файлы, создаваемые в ходе работы приложения
r	Директория, содержащая ресурсы программы или кэш
sp	Директория, содержащая конфигурационные файлы приложения
_manifest	Закодированный манифест приложения, содержащий все его разрешения

В ходе анализа были обнаружены следующие программные файлы, содержащие потенциально критичную информацию:

- 1) файл базы данных формата SQLite v3 signal.db, содержащий истории сообщений, данные



контактов из телефонной книги устройства, которые зарегистрированы в системе [2];

2) конфигурационный файл `org.thoughtcrime.securesms_preferences.xml`, который, по сравнению с прошлой рассмотренной версией мессенджера, дополнительно содержит секретные ключи для расшифровки медиа-вложений, базы данных, `log`-файлов;

3) конфигурационный файл `SecureSMS-Preferences.xml`, содержащий составные элементы, необходимые для построения мастер-ключа приложения;

4) файлы формата `part-{timestamp}.mms`, являющиеся зашифрованными файлами медиа-вложений;

5) журналы работы приложения (далее – `log`-файлы), включающие факты отправки сообщений (обезличены), однако в них имеется информация по отправленным вложениям. Также в файлах содержатся факты совершения звонков со сведениями об их типах (длительность звонка можно установить косвенно по содержанию `log`-файла). Количество генерируемых файлов по умолчанию не ограничено.

База данных (далее – БД) мессенджера `signal.db` недоступна для непосредственного чтения, так как она зашифрована [12]. В качестве провайдера криптографических операций базы данных выступает модуль `SQLCipher` компании Zetetic [15].

Для определения особенностей получения доступа к информации, содержащейся в рассматриваемой базе данных, необходимо изучить исходный код клиента приложения. Нет необходимости проводить обратную разработку путем декомпиляции установочного пакета приложения, так как исходный код приложения `Signal` для операционной системы `Android` (далее – `OS Android`) находится в открытом доступе [12].

В ходе изучения исходного кода касательно получения доступа к БД было установлено следующее:

1) модуль `SQLCipher` имеет версию сборки 3.5.9;

2) используются параметры `PRAGMA` при открытии базы данных «`cipher_default_kdf_iter = 1; cipher_default_page_size = 4096; kdf_iter = '1'; cipher_page_size = 4096;`»;

3) секретный ключ подается в виде последовательности байт (`decipher key \"x'{hex-последовательность секретного ключа}'`).

Что касается самого секретного ключа, согласно алгоритму хранения приложения `Signal`, возможны 2 сценария:

1) если версия `OS Android` меньше 6.0, то ключ хранится в открытом виде в файле `org.thoughtcrime.securesms_preferences.xml` в поле `pref_database_unencrypted_secret` уже в виде строчного представления шестнадцатеричных значений байт ключевой последовательности;

2) если версия `OS Android` 6.0 и выше, то ключ хранится в зашифрованном виде, предварительно обрабатываемый средствами `Android Keystore` [3], и хранится в поле параметра `pref_database_encrypted_secret`.

Стоит отметить, что извлечь ключ шифрования базы данных не представится возможным только в случае, если защищенное хранилище `Android`

`Keystore` реализовано аппаратно, во всех остальных случаях ключевую информацию можно получить и расшифровать БД.

Использование версий `SQLCipher` для стационарных решений (далее – ПК) 3.4.2 и 4.2.0 не дало результатов, и базу расшифровать не удалось с имеющимися данными. В качестве альтернативного способа была реализована тестовая утилита для `OS Android`, которая использует идентичную используемой в целевом приложении версию модуля `SQLCipher`, расшифровывает БД и сохраняет ее копию. Приложение принимает на входе путь к зашифрованной базе, опциональные `PRAGMA`-параметры и ключ шифрования. В результате удалось получить расшифрованную БД `signal_decrypted.db`.

Стоит отметить, что информация в самой БД уже доступна для непосредственного чтения и хранится в открытом виде.

`Log`-файлы недоступны для непосредственного просмотра содержащихся в них данных ввиду использования криптографических преобразований информации. Согласно исходному коду приложения `Signal`, данные файлы используют симметричное шифрование `AES` в режиме `CBC` с ключом шифрования 256 бит. Данный ключ хранится в файле `org.thoughtcrime.securesms_preferences.xml` в поле параметра `pref_log_unencrypted_secret` или `pref_log_encrypted_secret` в зависимости от версии `OS Android` конечного мобильного устройства аналогично сценариям при рассмотрении вопроса получения доступа к зашифрованной БД `signal.db` [12]. Стоит отметить, что информация в данных `log`-файлах шифруется не целым файлом, а построчно. Типовая структура зашифрованной строки `log`-файла представлена ниже:

1. `0x{71 59 49 D5 DE C1 31 C1 0D 44 61 D7 7F 8B A1 FA}` – инициализирующий вектор (далее – `IV`) записи.

2. `0x{00 00 00 50}` – длина зашифрованной последовательности строки `log`-файла (в данном примере длина зашифрованной последовательности равна 80 байтам, так как  $50_{16} = 80_{10}$ ).

3. `0x{76 09 AA FF 89 03 AE 95 3D 1F B5 FF E2 95 93 79 0B 53 48 15 97 93 E5 06 2E A3 81 7D B2 FA 33 A2 78 98 60 67 4B B2 35 79 01 DD 5E 0B 5D 4C 64 63 9C 88 D3 F7 5C 1D C2 91 20 6B 56 A3 A5 53 31 43 66 F3 B7 0B A9 81 A5 1D BB 16 94 9C A5 5C 07 73}` – зашифрованная информация `log`-файла (полезная часть).

Для автоматизации процесса расшифровки `log`-файлов была написана соответствующая программа для ПК, принимающая в качестве входных параметров директорию с зашифрованными `log`-файлами и их ключ шифрования.

Представленная выше запись в расшифрованном виде: «2020-09-13 12:24:05.231 GMT+03:00 I ApplicationContext: onCreate()».

#### **Исследование данных после изменения в приложении**

Далее необходимо проанализировать изменения состояний данных приложения до удаления объекта

из истории сообщений и после, используя графический интерфейс самого мессенджера. Под удаляемыми объектами будут пониматься следующие понятия:

- 1) текстовое сообщение в стандартном чате;
- 2) текстовое сообщение в групповом чате;
- 3) сообщение с вложением;
- 4) информация о вызове (аудио- и видеозвонок) через приложение.

Для качественной оценки изменений данных будут применяться следующие признаки:

- 1) соответствовала ли информация в графическом интерфейсе приложения новому состоянию;

- 2) соответствовала ли информация в хранилищах данных без побитового поиска новому состоянию;
- 3) соответствовала ли информация в хранилищах данных с побитовым поиском новому состоянию;
- 4) возможность восстановления удаленной информации из различных источников и максимальный срок между удалением и восстановлением [1];
- 5) возможность восстановления удаленной информации по метаданным приложения и максимальный срок между удалением и восстановлением [1].

Результаты анализа данных при изменении представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа данных при изменении

Наименование признака	Текстовое сообщение в диалоге	Текстовое сообщение в групповом чате	Удаление сообщения с вложением	Удаление информации о вызове
Соответствие в интерфейсе приложения	+	+	+	+
Соответствие в хранилище без расширенного поиска	+	+	+	+
Соответствие в хранилище с расширенным поиском	±	±	±	±
Возможность восстановления из различных источников	–	–	–	–
Возможность восстановления по метаданным	–	–	–	–

Стоит отметить, что при всех сценариях ручного удаления информация может быть восстановлена в исходном виде из-за организации структуры хранения информации в БД, где логические блоки файла с удаляемыми данными лишь помечаются как удаленные, которые в будущем могут быть перезаписаны другой информацией. Вследствие этого данные некоторое время спустя после удаления их пользователем через графический интерфейс приложения все еще будут доступны.

#### Анализ защищенности данных в приложении

Для оценки защищенности критичной информации в мессенджере будет использоваться следующий список возможных мер защиты:

1) аутентификация при открытии приложения (ПИН-код, графический ключ, отпечаток пальца, снимок лица и т.д.);

2) защищенное хранение контрольных данных аутентификации при входе в приложение (использование средств шифрования, хэш-функций) [4–6, 8];

3) защита содержимого на текущем экране приложения от несанкционированного просмотра вне контекста работы приложения на примере списка активных приложений, где представлены снимки экранов на момент сворачивания приложения [7] (далее – защита от несанкционированного просмотра);

4) ввод конфиденциальной информации реализован в виде собственного локального решения (к примеру, собственная виртуальная клавиатура) [7];

5) участие данных аутентификации в защите информации приложения;

6) наличие проверок в приложении повышенных привилегий пользователя (root – доступ) [7, 9, 13, 14];

7) ограничение копирования данных в файл резервной копии устройства [16];

8) устойчивость защиты данных приложения вследствие эксплуатации уязвимостей операционной системы;

9) восстановление измененных или удаленных данных на логическом уровне организации памяти;

10) восстановление измененных или удаленных данных на аппаратном уровне организации памяти;

11) механизм идентификации несанкционированной подмены данных в основных хранилищах критичных данных;

12) наличие мер усложнения обратной разработки приложения [4, 11];

13) наличие механизмов защиты у основных хранилищ критичной информации приложения [16];

14) наличие механизмов защиты у файлов, образующихся в ходе работы с приложением, с конфиденциальными данными [16];

15) наличие конфиденциальной информации в метаданных приложения [4, 5];

16) наличие конфиденциальных сведений в исходном коде приложения;

17) оптимальная организация хранения конфиденциальных данных приложения [5, 16];

18) наличие дополнительных факторов аутентификации при входе в учетную запись.

Результат оценки защищенности критичной информации в мессенджере по указанному выше списку представлен в табл. 3.

В качестве нестандартной реализации защиты стоит отметить использование шифрования базы данных с помощью SQLCipher, сборки которой нет для ПК, что исключает возможность получения доступа к данным только с помощью исследовательского стенда в виде ПК. Использование шифрования в log-файлах компенсирует факт наличия конфиденциальных данных в них.

Как итог можно сказать следующее: исследованное приложение можно рассматривать как достаточно защищенное решение для приложений класса мессенджер при условии использования их на устройстве с ОС Android с версией 6.0 и выше сов-

местно с реализованным аппаратно защищенным хранилищем Android KeyStore. Выполнение данных условий обеспечит невозможность получения непосредственного доступа к критичным данным приложения.

Таблица 3

**Результат оценки защищенности критичной информации в мессенджере**

Механизм защиты	Наличие	Примечание
Аутентификация при открытии приложения	+	Опциональный ввод PIN-кода при открытии приложения
Защищенное хранение контрольных данных аутентификации	±	Использование криптографических средств при хранении PIN-кода для открытия приложения и ключей шифрования при версии ОС Android 6.0 и выше [8, 14]
Защита от несанкционированного просмотра	–	
Защищенный ввод конфиденциальной информации приложения [9]	–	
Участие данных аутентификации в защите информации приложения	+	Установленный опциональный PIN-код может использоваться как дополнительный составной элемент генерации ключей шифрования [12]
Наличие проверок в приложении повышенных привилегий пользователя	–	
Ограничение копирования данных в файл резервной копии устройства	+	
Устойчивость защиты при эксплуатации уязвимостей операционной системы	±	Устойчивость обеспечивается на устройствах с ОС Android с версии 7.0 и новее
Возможность восстановления измененных или удаленных данных на логическом уровне организации памяти [1]	±	Имеется возможность восстановить сообщения, удаленные пользователем вручную
Возможность восстановления измененных или удаленных данных на аппаратном уровне организации памяти	+	
Механизм идентификации несанкционированной подмены данных в основных хранилищах критичных данных	+	Для каждого сообщения в базе данных сохраняется его контрольная сумма
Наличие мер усложнения обратной разработки	–	Исходный код клиента находится в открытом доступе
Наличие механизмов защиты у основных хранилищ критичной информации приложения	+	БД шифруется с помощью SQLCipher
Наличие механизмов защиты у файлов, образующихся в ходе работы с приложением, с конфиденциальными данными	+	Медиа-файлы мессенджера шифруются по алгоритму симметричного шифрования AES с длиной ключа 256 бит
Наличие конфиденциальной информации в метаданных приложения	+	Факты отправки сообщений и совершения звонков, информация по медиа-вложениям
Оптимальная организация хранения конфиденциальных данных приложения	±	Хранение идентификатора учетной записи в Signal в открытом виде, хранение секретных ключей шифрования базы данных, log-файлов, медиа-вложений в открытом виде для устройств с версией ОС Android до 6.0
Наличие дополнительных факторов аутентификации при входе в учетную запись	+	Опциональная двухфакторная аутентификация при входе в учетную запись

### Заключение

В работе рассмотрены сценарии получения выборки тестовых данных, методы получения этих данных из устройства, определены критичные данные для приложений типа мессенджер, хранящиеся локально на устройстве. Эти данные можно использовать для других приложений родственного класса, установлена специфика работы с критичными данными, определен перечень используемых мер защиты для приложения, а также проведена оценка защищенности информации приложения Signal.

### Литература

1. Исследование остаточных артефактов Viber и Telegram в операционной системе Windows / А.И. Бородин, Р.Р. Вейнберг, Д.В. Писарев, О.В. Литвишко // Бизнес-информатика. – 2019. – Т. 13, № 4. – С. 39–48.

2. Безопасность – Поддержка Signal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://support.signal.org/hc/ru/categories/360000674811-Безопасность>, свободный (дата обращения: 30.09.2020).

3. Бюллетень по безопасности Android – август 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://source.android.com/security/bulletin/2020-08-01>, свободный (дата обращения: 03.10.2020).

4. Путьято М.М. Кибербезопасность как неотъемлемый атрибут многоуровневого защищенного киберпространства / М.М. Путьято, А.С. Макарян // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 3. – С. 94–102.

5. Путьято М.М. Классификация мессенджеров на основе анализа уровня безопасности хранимых данных / М.М. Путьято, А.С. Макарян // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 4. – С. 135–143.

6. Исследование системы идентификации и подтверждения легитимности доступа на основе динамиче-

ских методов биометрической аутентификации / М.М. Пустьято, А.С. Макарян, Ш.М. Чич, В.К. Маркова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 3. – С. 83–93.

7. Уязвимости и угрозы мобильных приложений, 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/mobile-application-security-threats-and-vulnerabilities-2019/#id6>, свободный (дата обращения: 27.09.2020).

8. App security best practices, 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [//developer.android.com/topic/security/best-practices](https://developer.android.com/topic/security/best-practices), свободный (дата обращения: 03.10.2020).

9. NISTIR 8144 (Draft) Assessing Threats to Mobile Devices & Infrastructure. / C. Brown, S. Dog, J. Franklin, N. McNab, S. Voss-Northrop, M. Peck, B. Stidham. – The Mobile Threat Catalogue, 2016. – 44 p.

10. The role of mobile forensics in terrorism investigations involving the use of cloud storage service and communication apps / N.D.W. Cahyani, N.H. Ab Rahman, W.B. Glisson, K.-K.R. Choo // Mobile Networks and Applications. – 2017. – Vol. 22, No. 2. – P. 240–254. DOI: 10.1007/s11036-016-07919.

11. Github – rehmanmuradali/android-security-guides: Is Your App Ready To Get Live? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/rehmanmuradali/android-security-guides>, свободный (дата обращения: 02.10.2020).

12. Github – signalapp / Signal-Android: A private messenger for Android [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/signalapp/Signal-Android>, свободный (дата обращения: 30.09.2020).

13. Mueller B. OWASP Mobile Security Testing Guide / B. Mueller, S. Schleier, J. Willemsen. – 2020. – 536 p.

14. Schleier S. OWASP Mobile Application Security Verification Standard, Mobile application security check standard / S. Schleier, J. Willemsen, C. Holguera. – 2020. – 49 p.

15. SQLCipher – Zetetic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zetetic.net/sqlcipher/>, свободный (дата обращения: 03.10.2020).

16. Telegram, Signal, Wickr Me: выбираем самый безопасный мессенджер и разбираемся, существует ли он [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/en/companys/group-ib/blog/522178/>, свободный (дата обращения: 20.12.2020).

#### Кучер Виктор Алексеевич

Канд. техн. наук, профессор каф. компьютерных технологий и информационной безопасности Кубанского государственного технологического университета (КубГТУ) Московская ул., 2, г. Краснодар, Россия, 350072 Тел.: +7-905-402-64-98 Эл. почта: vakucher@bk.ru

#### Пустьято Михаил Михайлович

Канд. техн. наук, доцент каф. компьютерных технологий и информационной безопасности КубГТУ Московская ул., 2, г. Краснодар, Россия, 350072 Тел.: +7-964-904-05-55 Эл. почта: putyato.m@gmail.com

#### Макарян Александр Самвелович

Канд. техн. наук, доцент каф. компьютерных технологий и информационной безопасности КубГТУ Московская ул., 2, г. Краснодар, Россия, 350072 Тел.: +7-918-444-64-47 Эл. почта: msanya@yandex.ru

#### Карманов Михаил Александрович

Аспирант каф. компьютерных технологий и информационной безопасности КубГТУ Московская ул., 2, г. Краснодар, Россия, 350072 Тел.: +7-905-470-63-74 Эл. почта: michaelkdev15@gmail.com

#### Kucher V.A., Putyato M.M., Makaryan A.S., Karmanov M.A. Investigation of User Data Security for Android-based «Signal» Messenger

The article presents the security analysis of locally stored end-user data, as well as the specifics of working with them in the application called “Signal” based on Android OS. The investigated version 5.3.12 was the most recent one up to the time of writing this article. According to a certain scenario, test user data was generated in the application, and then the sources information with critical data was extracted from this data. Using the open-source code available, the mechanisms of the application's operation, including the implementation of protection measures, with the specified critical data were identified and analyzed. A qualitative assessment of implementing protection mechanisms for locally stored critical data was made to distinguish the data with typical protection measures inherent for any mobile applications, and the one specific for applications of this particular class of messengers. As a result, the flaws were discovered related to the inaccessibility of certain protective mechanisms on specific versions of the Android operating system, which could compromise the user data. As an advantage of the messenger protection, the database encryption module could be specified, which provides strong protection against unauthorized access to information due to the lack of a specific version of the assembly for personal computers. This article also proposes an approach to decrypt messenger databases, which requires either an emulator of an Android-based device, or a real mobile device with a specially developed application.

**Keywords:** mobile apps, Android, static analysis, dynamic analysis, decompilation, reverse engineering, database, cybersecurity, data protection.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-23-28

#### References

1. Borodin A.I., Veynberg R.R., Pisarev D.V., Litvishko O.V. [Simulation of artifact detection in Viber and Telegram instant messengers in Windows operations systems]. *Business informatics*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 39–48 (in Russ.).
2. Security – Signal Support. Available at: <https://support.signal.org/hc/en/categories/360000674811-Security> (Accessed: September 30, 2020) (in Russ.).
3. Android Security Bulletin – august 2020. Available at: <https://source.android.com/security/bulletin/2020-08-01> (Accessed: October 3, 2020) (in Russ.).
4. Putyato M.M., Makaryan A.S. [Cybersecurity as an integral attribute of a multilevel protected cyberspace]. *Caspian journal: management and high technologies*. 2020, no. 3, pp. 94–102 (in Russ.).

5. Putyato M.M., Makaryan A.S. [Classification of messengers based on analysis of the security level of stored data]. *Caspian journal: management and high technologies*. 2020, no. 3, pp. 94–112 (in Russ.).

6. Putyato M.M., Makaryan A.S., Chich S.M., Markova V.K. [Investigation of the system of identification and confirmation of the legitimacy of access based on dynamic methods of biometric authentication]. *Caspian journal: management and high technologies*. 2020, no. 3, pp. 83–93 (in Russ.).

7. Uyazvimosti i ugrozy mobil'nykh prilozhenii [Weak points and threats of mobile applications], 2019. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/mobile-application-security-threats-and-vulnerabilities-2019/#id6> (Accessed: September 27, 2020 (in Russ.)).

8. App security best practices, 2020. Available at: <https://developer.android.com/topic/security/best-practices> (Accessed: October 3, 2020).

9. Brown C., Dog S., Franklin J., McNab N., Voss-Northrop S., Peck M., Stidham B. NISTIR 8144 (Draft) Assessing Threats to Mobile Devices & Infrastructure. *The Mobile Threat Catalogue*. 2016. 44 p.

10. Cahyani N.D.W., Ab Rahman N.H., Glisson W.B., Choo K.-K.R. [The role of mobile forensics in terrorism investigations involving the use of cloud storage service and communication apps]. *Mobile Networks and Applications*. 2017. vol. 22, no. 2, pp. 240–254. doi: 10.1007/s11036-016-07919.

11. Github – rehmanmuradali/android-security-guides: Is Your App Ready To Get Live? Available at: <https://github.com/rehmanmuradali/android-security-guides> (Accessed: October 2, 2020).

12. Github – signalapp / Signal-Android: A private messenger for Android. Available at: <https://github.com/signalapp/Signal-Android> (Accessed: September 30, 2020).

13. Mueller B., Schleier S., Willemsen J. *OWASP Mobile Security Testing Guide*, 2020, 536 p.

14. Schleier S., Willemsen J., Holguera C. *OWASP Mobile Application Security Verification Standard, Mobile application security check guide standard*, 2020, 49 p.

15. SQLCipher – Zetetic. Available at: <https://www.zetetic.net/sqlcipher/> (Accessed: October 3, 2020).

16. Telegram, Signal, Wickr Me: vybiraem samyi bezopasnyi messendzher i razbiraemysya , sushchestvuet li on. [Choosing the safest messenger, if ever it exists] (in Russ.) Available at: <https://habr.com/en/company/group-ib/blog/522178/> (Accessed: December 20, 2020).

---

#### **Victor A. Kucher**

Candidate of Science in Engineering, Professor,  
Department of Computer Technologies and Information Security, Kuban State Technological University (KubSTU)  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russia, 350072  
Phone: +7-905-402-64-98  
Email: vakucher@bk.ru

#### **Mikhail M. Putyato**

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor,  
Department of Computer Technologies and Information Security, KubSTU  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russia, 350072  
Phone: +7-964-904-05-55  
Email: putyato.m@gmail.com

#### **Alexander S. Makaryan**

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor,  
Department of Computer Technologies and Information Security, KubSTU  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russia, 350072  
Phone: +7-918-444-64-47  
Email: msanya@yandex.ru

#### **Mikhail A. Karmanov**

Postgraduate student, Department of Computer Technologies and Information Security, KubSTU  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russia, 350072  
Phone: +7-964-904-05-55  
Email: michaelkdev15@gmail.com

УДК 004.032.26

Э.А. Яндашевская

## Разработка подсистемы стегоанализа цифровых изображений на основе сверточной нейронной сети для обнаружения и предотвращения атак, использующих скрытые стеганографические каналы

Представлен вариант реализации подсистемы стегоанализа цифровых изображений, циркулирующих в информационной системе. Данная подсистема расширяет функциональность существующих систем обнаружения/предотвращения вторжений с точки зрения обнаружения скрытых каналов, применяемых в компьютерных атаках. В представленном варианте предложена и реализована параметрическая модель сверточной нейронной сети для обнаружения полезной нагрузки в цифровых изображениях, выполненных рядом распознанных в реальных атаках алгоритмах стеговложений. Разработана программная реализация модульного генератора обучающей выборки (датасета), поддерживающего эти алгоритмы. Осуществлена экспериментальная оценка точности.

**Ключевые слова:** защита информации, скрытые стеганографические каналы, сверточная нейронная сеть, системы обнаружения и предотвращения вторжений, цифровые изображения.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-29-33

За период 2019/2020 годов компании, специализирующиеся на анализе инцидентов информационной безопасности, исследовали и провели технический анализ ряда специфических компьютерных атак, направленных, в первую очередь, на информационные инфраструктуры промышленных предприятий и коммерческих организаций. Целью этих атак является вымогательство либо путем блокирования доступа к информации, циркулирующей в атакуемых информационных системах, либо реализации техник перегрузки ресурсов вычислительных систем. Особенностью этих атак является использование на одном из этапов развития вектора атаки скрытых стеганографических каналов [1], базирующихся на цифровых изображениях (ЦИ), размещенных на легитимных публичных хостингах.

Так, в [2] проводится краткий технический анализ варианта такой атаки, направленной на десятки информационных систем предприятий и организаций в Японии, Италии, Германии и Великобритании с целью внедрения банковских троянов семейств

Bebloh и Ursnif. В [3] приведен подробный технический анализ варианта этой же атаки, связанной с распространением трояна Ursnif. Схемой распространения вектора атаки, начинающейся рассылкой фишинговых электронных писем с вложением офисных документов, имеющих вредоносный VBA-скрип, является организация запросов к публичным хостингам ЦИ, таким как imgur.com и imgbox.com (рассмотрены в [2]) или posting.cc (рассмотрен в [3]), с целью получения стегоконтейнеров, представленных легитимными ЦИ. В качестве стегоконтейнера используется ЦИ формата PNG. Стеговложение выполняется программой с открытым исходным кодом Invoke-PSImage [4], которая, получая на вход сценарий PowerShell, кодирует его байты в пиксели PNG-файла, используя модификацию метода LSB. В зависимости от варианта атаки такие ЦИ содержали либо обфурцированный скрипт PowerShell, реализующий дальнейшее развитие вектора атаки, либо непосредственно вредоносную полезную нагрузку. Этапы реализации указанных атак обобщены на рис. 1.

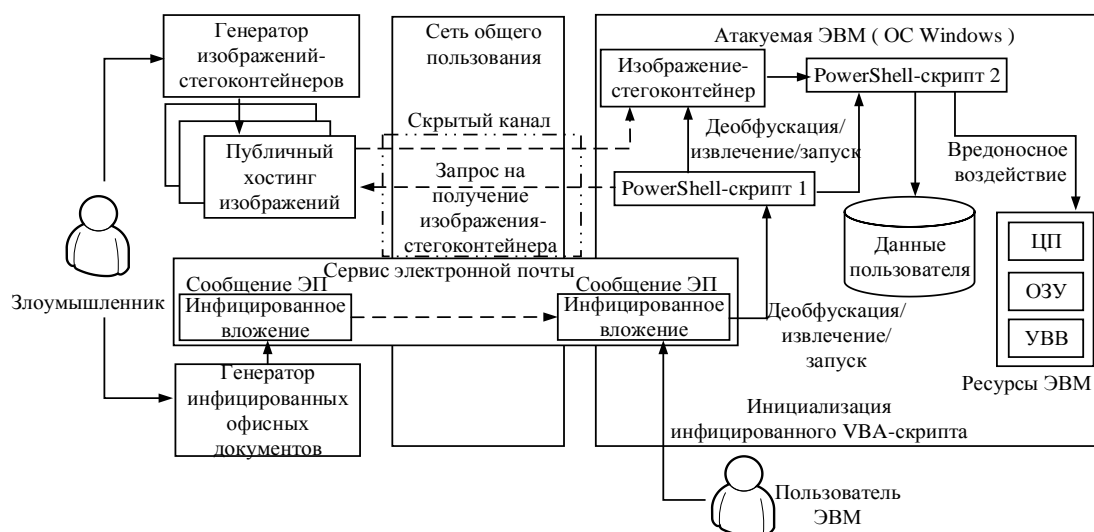


Рис. 1. Этапы компьютерных атак для распространения банковских троянов Bebloh и Ursnif со скрытым стеганографическим каналом на основе ЦИ формата PNG



Кроме того, в [5] приведен технический анализ атаки, выявленной летом 2020 г. Основой атаки является «MT3» (MontysThree) – многомодульный набор C++ инструментов, используемых для промышленного шпионажа. Как и в случае атак, представленных в [2, 3], их первым этапом является рассылка фишинговой корреспонденции с вредоносным вложением в офисные документы. На рис. 2 показана диаграмма взаимодействия модулей «MT3», из которой видно, что модуль ядра передается в виде полезной нагрузки в стегоконтейнере ЦИ, представленном bitmap-файлом. Анализ указанного контейнера выявил многоэтапный процесс его распаковки и дешифрования. Особенностью модуля стеганографии в «MT3» является то, что его алгоритм является заказным, а не взят из стороннего репозитория с открытым исходным кодом.

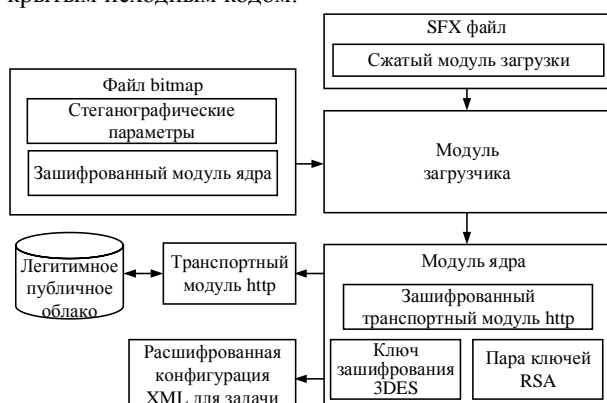


Рис. 2. Роль и место стеганографического контейнера, представленного bitmap-файлом, в наборе инструментов MontysThree [5]

Высокий процент успешных атак, выполненных на основе представленных примеров, показывает, что наряду с такими факторами, как социальная инженерия, их реализации способствовало сокрытие ряда компонентов в стегоконтейнерах ЦИ.

Поскольку системы защиты атакуемых предприятий и организаций, основанные на IDPS/DLP-системах с традиционными для них контейнерным и сигнатурным видами анализа циркулирующей информации, не обнаруживают стегоконтейнеры ЦИ, относя канал их получения к легитимным каналам информационной системы, это делает задачу их обнаружения актуальной.

Решением этой проблемы может быть расширение функциональности IDPS/DLP-систем [6], включение в них модуля стегоанализа ЦИ с соответствующим перехватчиком, обеспечивающего решение задачи распознавания ЦИ – потенциальных стегоконтейнеров (рис. 3).

При этом важной исследовательской задачей является выбор метода распознавания, обеспечивающего оптимальную точность распознавания при низких временных и ресурсных издержках. Дополнительным условием является достаточная гибкость метода, позволяющая подстраиваться под модификации алгоритмов встраивания, используемых в реальных компьютерных атаках.

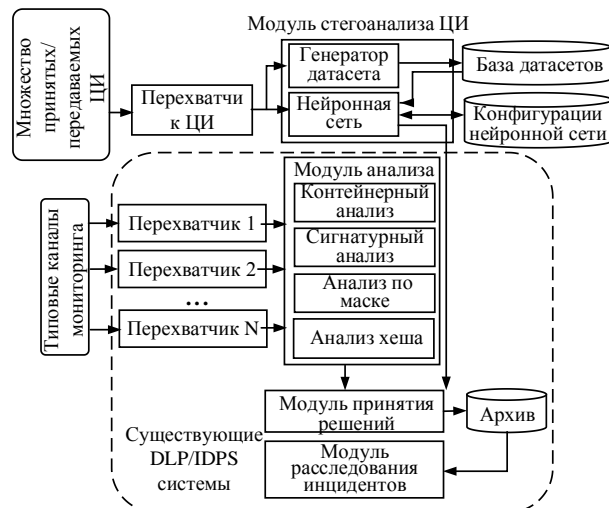


Рис. 3. Архитектура комбинированной IDPS/DLP-системы с дополнительным модулем стегоанализа ЦИ

### Анализ существующих решений, используемых для обнаружения стеговложения

В настоящее время в зависимости от класса решаемой задачи распознавания стегоконтейнеров ЦИ существуют как исследовательские, так и коммерческие решения, основанные на двух видах классификаторов:

1. Двухэтапная классификация, основанная на моделях Rich Image Model (RIM) для пространственной или частотной областей ЦИ и статистических бинарных классификаторах, таких метод опорных векторов, линейный дискриминантный анализ или многослойный перцептрон.

Примеры подобных проектов стегоанализаторов представлены в [7, 8].

Существенным недостатком таких решений является ограниченность используемых методов распознавания стеговложений к модификациям вариантов стегоконтейнеров. Частично, решение этой проблемы преодолевается использованием ансамбля классификаторов (Ensemble Classifier). Одно из таких решений представлено в [9].

2. Классификация на основе методов глубокого обучения, представленная глубокими сетями доверия (DBN), сверточными нейронными сетями (CNN), а также вариантами резервуарных вычислений, таких как эхо сети (ECN) и машины жидкостного состояния (LSM). Реализации проектов на основе указанных методов представлены в [10]. Достоинством методов глубокого обучения является возможность их переобучения на распознавание конкретного набора стегоконтейнеров ЦИ с сохранением структурно-параметрических характеристик нейронной сети для повторного использования. К недостаткам стоит отнести достаточно сложный этап обучения сети [11], требующий тщательного подбора обучающей выборки ЦИ – датасета.

### Вариант модуля стегоанализа цифровых изображений на основе сверточной нейронной сети

В исследовании в качестве основы модуля стегоанализа ЦИ предлагается использование варианта

сверточной нейронной сети (СНС). Обоснование такого выбора и достоинства ее применения представлены в работе автора [12]. Структура разработанной СНС в общем случае соответствует представленной в [13] архитектуре сверточных сетей и представлена следующими типами слоев: сверточные слои; слои подвыборки (pooling); полносвязные слои.

Сверточные слои, начиная с первого, распознают низкоуровневые признаки ЦИ. По мере продвижения по ним эти признаки обобщаются, что позволяет переходить к высокоуровневым признакам ЦИ. Базовая функция сверточного слоя и слоя подвыборки уменьшение ядра – матрицы весов. Их параметрами являются:  $f$  (filters count) – количество фильтров в слое;  $K$  (kernel size) – размер (высота и ширина) ядра;  $s$  (stride) – шаг свертки (количество пикселей, на которое перемещается матрица фильтра по входному изображению);  $p$  (padding) – дополнения нулями (количество пикселей, которые добавляются с каждого края изображения). Перемещением ядра над пикселями ЦИ выполняется перемножение и последующее суммирование его весов и значение пикселей, над которыми находится ядро. Эта функция именуется двумерной сверткой. Ее результатом для последующего сверточного слоя новое ядро меньшего размера. Сверточные слои и слои подвыборки используются для предварительной обработки ЦИ. В таблице представлены значения параметров сверточных слоев и слоев подвыборки разработанной СНС.

**Значения параметров сверточных слоев и слоев подвыборки разработанной СНС**

Слой	Значение $f$ (in/out)	Размер $K$	Значение $s$	Значение $p$
Сверточный слой 1	3/8	5	1	2
Сверточный слой 2	8/16	5	1	2
Сверточный слой 3	16/64	5	1	2
Слой подвыборки 1		5	4	2
Слой подвыборки 2		5	4	2

Полносвязный слой реализует вариант нелинейной функции, которая, проверяя комбинации входных данных, реализует бинарную (Cover/Stego) классификацию ЦИ. В разработанной СНС реализовано 5 полносвязных слоев, редуцирующих значения  $f$  (in/out) с 4096/2048 до 128/2, где 2 – результат решения задачи бинарной классификации.

Важной задачей при разработке СНС явилась задача выбора обучающей выборки – датасета. Ее особенностью применительно к решаемой задаче явилось то, что большинство исследований в области разработки СНС-стегоанализаторов ЦИ в качестве базы ЦИ используют известные проекты, такие, например, как BOSS (Break Our Steganographic System) [14] и RAISE (The Raw Images Dataset) [15],

применяя для формирования стегоконтейнеров известные варианты алгоритмов с высоким соотношением скрытности к объему полезной нагрузки, такие как steGO (HUGO), WOW, UNIWARD, STABYLO, EAI-LSBM, MVG [16].

Однако, как было рассмотрено выше, в реальных реализациях атак с использованием стегоконтейнеров для последних применяются специфические для вида атаки алгоритмы стеговложения. Примером является рассмотренный выше алгоритм Invoke-PSImage, реализующий стеговложение строго для сценариев PowerShell. В связи с этим было принято решение реализовать генератор датасета СНС, имеющий модульную структуру и позволяющий подключать распознанные алгоритмы стеговложений реальных компьютерных атак. В качестве базы ЦИ было предложено использовать наиболее известные публичные хостинги ЦИ, также применяемые в ходе этих атак.

**Результаты эксперимента**

Обучение СНС выполнялось на массиве из 35000 ЦИ, полученных из публичного хостинга imgur.com. На базе 15000 из них, с использованием алгоритма Invoke-PSImage, были реализованы PNG-стегоконтейнеры с различной полезной нагрузкой. Тестирование обученной СНС производилось на 2000 ЦИ, из которых 1000 были представлены вариантами Invoke-PSImage стегоконтейнеров. И в процессе обучения, и в процессе тестирования размер батча (подмножества ЦИ, подаваемого на вход СНС) был равен 64. На рис. 4 представлены графики точности распознавания (accuracy) и функции потерь для этапов обучения и тестирования СНС.

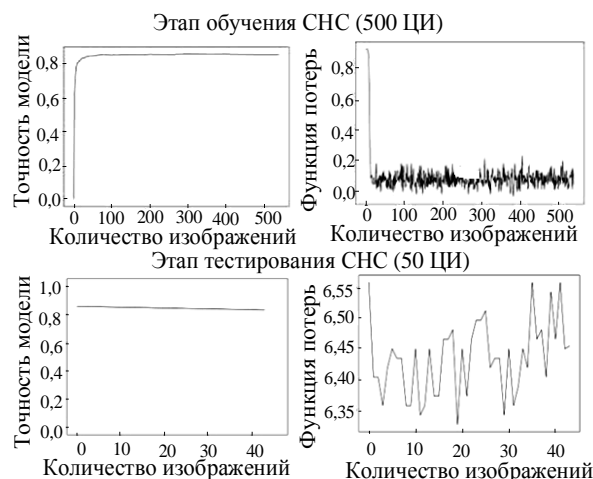


Рис. 4. Результаты экспериментальной оценки разработанной СНС

**Заключение**

В статье на примерах зафиксированных компьютерных атак с использованием скрытых стеганографических каналов предложен подход по расширению функциональности современных систем обнаружения и предотвращения вторжений за счет использования модуля стегоанализа цифровых изображений, циркулирующих в защищаемой ин-

формационной системе. В качестве базы такого модуля обоснован выбор аппарата сверточных нейронных сетей. Предложен вариант сверточной нейронной сети, а также модульный генератор датасета для нее, обеспечивающий подключение распознанных в реальных атаках алгоритмов стеговложений. На основе сформированных обучающей и тестовой выборок цифровых изображений, полученных с использованием в компьютерных атаках публичного хостинга, проведен эксперимент, демонстрирующий приемлемую степень распознавания. Направлением дальнейших исследований является совершенствование предложенного стегоанализатора путем комбинирования методов статистической бинарной классификации и сверточных нейронных сетей с целью сокращения временных и ресурсных затрат, связанных с этапом обучения сети.

### Литература

1. Яндашевская Э.А. Подход к тестированию на проникновение в информационные сервисы сети RSNNet по скрытым каналам, основанным на методах стеганографического преобразования информации // Науч.-техн. журнал «I-Methods» / ООО «Институт ИНТЕХ». – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 1–14.
2. Стеганография в атаках на промышленные предприятия (обновлено) // Лаборатория Касперского. – 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://icscert.kaspersky.ru/reports/2020/06/17/steganography-in-attacks-on-industrial-enterprises/>, свободный (дата обращения: 21.01.2021).
3. Paqanin P. Ursnif: Long Live the Steganography and AtomBombing! // Security affairs. – 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://securityaffairs.co/wordpress/80777/malware/ursnif-steganography-atombombing.html> (дата обращения: 21.01.2021).
4. InvokePSImage source code [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/peewpw/Invoke-PSImage>, свободный (дата обращения: 15.10.2020).
5. Legezo D. MontysThree: Industrial espionage with steganography and a Russian accent on both sides. – 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://securelist.com/montysthree-industrial-espionage/98972/>, свободный (дата обращения: 15.10.2020).
6. Белова А.Л. Сравнительный анализ систем обнаружения вторжений / А.Л. Белова, Д.А. Бородавкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – № 1. – С. 742–744.
7. Fridrich J.J. Rich models for steganalysis of digital images / J.J. Fridrich, J. Kodovsk'y // IEEE Trans Inform Forensics Secur. – 2012. – Vol. 7, No. 3. – P. 868–882.
8. Holub V. Random projections of residuals for digital image steganalysis / V. Holub, J.J. Fridrich // IEEE Trans Inform Forensics Security. – 2013. – Vol. 8, No. 12. – P. 1996–2006.
9. Kodovsk'y J. Ensemble classifiers for steganalysis of digital media / J. Kodovsk'y, J.J. Fridrich, V. Holub // IEEE Trans Inform Forensics Security – 2012. – Vol. 7, No. 2. – P. 432–444.
10. Maass W. Liquid state machines: motivation, theory, and applications // Computability in context: computation and logic in the real world. – 2010. – С. 275–296.
11. Moiseev O.V. To the question of sensitivity checking of the conventional neural network for digital images steganalysis to the sampling parameters at the learning stage / O.V. Moiseev, E.A. Yandashevskaya // MIP2021'SCT: Proceedings of the XXVI-th International Open Science. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House. – 2021. – P. 59–63.
12. Полуниин А.А. Использование аппарата сверточных нейронных сетей для стегоанализа цифровых изображений / А.А. Полуниин, Э.А. Яндашевская // Труды ИСП РАН. – 2020. – № 32(4). – С. 155–164.
13. Qian Y. Deep learning for steganalysis via convolutional neural networks / Y. Qian, J. Dong, W. Wang, T. Tan // IS&T/SPIE Electronic Imaging. – 2015. DOI: 10.1117/12.2083479.
14. Be the boss of the BOSS, Break Our Steganographic System! BOSS – Break Our Steganographic System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agents.fel.cvut.cz/boss/index.php?mode=VIEW&tmpl=materials>, свободный (дата обращения: 10.11.2020).
15. RAISE – RAW Images Dataset [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://loki.disi.unitn.it/RAISE/>, свободный (дата обращения: 10.11.2020).
16. Pevn'y T. Using high-dimensional image models to perform highly undetectable steganography / T. Pevn'y, T. Filler, P. Bas // Information Hiding – 12<sup>th</sup> International Conference. – 2010. – P. 161–177.

### Яндашевская Элина Андреевна

Сотрудник ФГКВУВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации»  
Приборостроительная ул., 35, г. Орел, Россия, 302025  
Тел.: +7 (486-2) 54-99-33  
Эл. почта: elenayanda@yandex.ru

Yandashevskaya E.A.

### Development of a Subsystem for Steganalysis of Digital Images Based on a Convolutional Neural Network to Detect and Prevent Attacks Using Hidden Steganographic Channels

This article presents a way to implement the subsystem for steganalysis of digital images circulating in the information system. This subsystem expands the functionality of existing intrusion detection / prevention systems in terms of detecting covert channels used in computer attacks. In the presented solution, a parametric model of a convolutional neural network is proposed and implemented to detect a payload in digital images, performed by a number of steg-nesting algorithms recognized in real attacks. A software implementation of a modular generator of a training sample (dataset) that supports these algorithms has been developed. An experimental assessment of the accuracy has been carried out.

**Keywords:** information protection, hidden steganographic channels, convolutional neural network, intrusion detection and prevention systems, digital images.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-29-33

### References

1. Yandashevskaya E.A. [An approach to penetration testing of information services of the RSNNet network through covert channels based on methods of steganographic transformation of information]. *Scientific and Technical Journal «I-Methods»*. Institute INTECH LLC, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 1–14 (in Russ.).
2. Steganography in attacks on industrial enterprises (updated). *Kaspersky Lab*, 2020. (In Russ.). Available at: <https://icscert.kaspersky.ru/reports/2020/06/17/steganography->

- in-attacks-on-industrial-enterprises/, free (Accessed: January 21, 2021).
3. Paqanin P. Ursnif: Long Live the Steganography and AtomBombing! *Security Affairs*, 2019. Available at: <https://securityaffairs.co/wordpress/80777/malware/ursnif-steganography-atombombing.html>, free (Accessed: January 21, 2021).
  4. InvokePSImage source code. *GitHub*, 2019. Available at: <https://github.com/peewpw/Invoke-PSImage>, free (Accessed: October 15, 2020).
  5. Legezo D. MontysThree: Industrial espionage with steganography and a Russian accent on both sides. *Securelist by Kaspersky*, 2020. Available at: <https://securelist.com/montysthree-industrial-espionage/98972/>, free (Accessed: October 15, 2020).
  6. Belova A.L., Wartkin D.A. [Comparative analysis of intrusion detection systems]. *Actual Problems of Aviation and Astronautics*, 2016, no. 1, pp. 742–744 (in Russ.).
  7. Fridrich J.J., Kodovsk'y J. [Rich models for steganalysis of digital images]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 868–882.
  8. Holub V., Fridrich J.J. [Random projections of residuals for digital image steganalysis]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2013, no. 12, pp. 1996–2006.
  9. Kodovsk'y J., Fridrich J.J., Holub V. [Ensemble classifiers for steganalysis of digital media]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 432–444.
  10. Maass W. [Liquid state machines: motivation, theory, and applications]. *Computability in Context: Computation and Logic in the Real World*, 2010, pp. 275–296.
  11. Moiseev O.V., Yandashevskaya E.A. [To the question of sensitivity checking of the conventional neural network for digital images stegoanalysis to the sampling parameters at the learning stage] *MIP2021'SCT: Proceedings of the XXVI-th International Open Science Conference*. Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O.Ja. Kravets. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2021, pp. 59–63 (in Russ.).
  12. Polunin A.A., Yandashevskaya E.A. [Using the apparatus of convolutional neural networks for steganalysis of digital images]. *Proceedings of ISP RAS*, 2020, vol. 32, no. 4, pp. 155–164 (in Russ.).
  13. Qian Y., Dong J., Wang W., Tan T. [Deep learning for steganalysis via convolutional neural networks]. *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, 2015. doi: 10.1117/12.2083479
  14. Be the boss of the BOSS, Break Our Steganographic System! Available at: <http://agents.fel.cvut.cz/boss/index.php?mode=VIEW&tmpl=materials>, free (Accessed: November 10, 2020).
  15. RAISE – RAW Images Dataset. Introducing RAISE dataset. Available at: <http://loki.disi.unitn.it/RAISE/>, free (Accessed: November 10, 2020).
  16. Pevn'y T., Filler T., Bas P. [Using high-dimensional image models to perform highly undetectable steganography]. *Information Hiding – 12<sup>th</sup> International Conference*, 2010, pp. 161–177.
- 

**Elina A. Yandashevskaya**

Employee, Academy of the Federal Guard Service  
35, Priborostroitel'naya st., Orel, Russia, 302034  
Phone: +7 (486-2) 54-99-33  
Email: elenayanda@yandex.ru

УДК 004.932

А.И. Шапошников

## Подбор вектора признаков для процедуры MeanShift

Дано описание вектора признаков, который является пригодным для процедуры MeanShift, использует всю цветовую информацию формата RGB24 и имеет размерность, незначительно, лишь в 1,5 раза, превышающую размерность наименьшего из пригодных для процедуры Kernel Based Object Tracking 512-мерного вектора. Для описанного вектора признаков построена функция схожести двух эллиптических областей кадра. Для функции схожести найдены формулы для вектора градиента – вектора сдвига среднего, указывающего направление роста схожести в четырехмерном пространстве всех эллиптических областей, охватывающих объект в кадре. На основании знания о наибольшем значении функции схожести двух эллиптических областей найдена длина вектора смещения в четырехмерном пространстве всех эллиптических областей, на который надо перемещать в текущий момент предыдущую точку пространства, т.е. значения координат центра и размеры эллипса, для получения наилучшей схожести текущей эллиптической области с предыдущей. В завершение, чтобы осуществить Kernel Based Object Tracking, разработан алгоритм последовательных итераций (метод Ньютона), позволяющий найти параметры того эллипса, который имеет действительно наилучшую схожесть. Проведены эксперименты и представлены и обсуждены их результаты.

**Ключевые слова:** вектор признаков (фиче-вектор), MeanShift, Kernel Based Object Tracking, цветовая компонента.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-34-38

В цикле работ [1–3] был продемонстрирован способ слежения за объектом, впоследствии названный Kernel Based Object Tracking, с помощью технологии MeanShift (сдвиг среднего). Основным инструментом технологии стало отыскание двумерных координат центра круговой области – «ядра» (kernel) и сравнение векторов признаков цветового характера. Построение различных векторов признаков является важным элементом анализа изображений и образов [4, 5]. Также в [1–3] было осознано, что случаи, для которых достаточно отслеживать координаты центра ядра, редки, что необходимо учитывать размер ядра, и были продемонстрированы приемы подбора радиуса ядра.

Следующим этапом в Kernel Based Object Tracking явилось понимание целостности комплекта параметров ядра в случае плоской картинке: требуется 4 или 5 параметров – для оптимального охвата объекта ядром последнее (ядро) должно быть эллиптическим. Это означает, что параметры ядра – это абсцисса и ордината центра эллипса + его полуоси для случая четырех параметров, для случая пяти параметров добавляется угол поворота эллипса. С другой стороны, задача расщепляется на две относительно независимые подзадачи: 1) отслеживание параметров ядра и 2) подбор вектора признаков.

С момента пионерских работ к разнообразным операциям с ядром прикован постоянный интерес: работы последних лет [6–10]. В цикле работ [11–16] получен необходимый инструмент для отслеживания четырех и пяти параметров ядра. Данная работа посвящена подбору наиболее подходящего вектора признаков «объекта» – выделенной области кадра для осуществления Kernel Based Object Tracking. Поскольку независимость двух подзадач, как отмечено выше, лишь интуитивно относительна, то ищем вектор признаков, подходящий для инструмента из [11–16].

### Построение вектора признаков

Воспользуемся тем, что каждый пиксель  $p$  изображения задан тройкой чисел от 0 до 256:  $p = (r, g, b)$ . Каждая координата такого представления соответствует отдельной цветовой компоненте (красной, зеленой и синей) и имеет независимое частотное распределение. Обозначим частотные распределения красной, зеленой и синей цветовых компонент произвольного участка  $A$  прямоугольного кадра  $P \supset A$  соответственно  $R(A)$ ,  $G(A)$  и  $B(A)$ . То есть имеются три отображения множества подмножеств  $P$  – булеана  $2^P$  [обозначение взято из википедии]:

$$\begin{aligned} \text{для } A \subseteq P &= [0; d_1] \times [0; d_2] \\ R &= \{R_1, \dots, R_{256}\} : 2^P \rightarrow \mathbb{Z}_+^{256}, \\ G &= \{G_1, \dots, G_{256}\} : 2^P \rightarrow \mathbb{Z}_+^{256}, \\ B &= \{B_1, \dots, B_{256}\} : 2^P \rightarrow \mathbb{Z}_+^{256}. \end{aligned}$$

Строим  $H = \{H_1, \dots, H_{768}\} : 2^P \rightarrow \mathbb{Z}_+^{768}$  по следующему правилу:

$$\begin{aligned} \text{для } i &= 1, \dots, 256; H_i = R_i, \\ \text{для } i &= 257, \dots, 512; H_i = G_{i-256}, \\ \text{для } i &= 513, \dots, 768; H_i = B_{i-512}. \end{aligned}$$

Замечание. Образу  $H(A) = (a_1, \dots, a_{768})$  можно придать вид столбчатой диаграммы – гистограммы, однако как функция  $H = \{H_1, \dots, H_{768}\}$  гистограммой не является, хотя бы потому, что каждый элемент множества  $A$  в кумулятивной функции  $H(A)$  посчитан трижды.

По аналогии с характеристической функцией из [11] необходимо определить ряд функций  $\chi_i : P \rightarrow \{0, 1\}$  для  $i = 1, \dots, 768$  (полное наименование  $\chi_{f(i)^{-1}}$  имеет неточность и чрезмерно громоздко).

Для изображения как заданной функции  $f = (f_1, f_2, f_3) : P \rightarrow \mathbb{Z}_+^3$ , где  $P = [0; d_1] \times [0; d_2]$  – прямоугольник, для  $x \in [0; d_1] \times [0; d_2]$  пусть  $\chi_i(x) = 1$ , если:

при  $i = 1, \dots, 256$  красная компонента элемента  $x$  равна  $i$ , т.е.  $f_1(x) = i$ ;

при  $i = 257, \dots, 512$  зеленая компонента элемента  $x$  равна  $i$ , т.е.  $f_2(x) = i$ ;

при  $i = 513, \dots, 768$  синяя компонента элемента  $x$  равна  $i$ , т.е.  $f_3(x) = i$ ;

и  $\chi_i(x) = 0$  в противном случае.

Теперь для  $H = \{H_1, \dots, H_{768}\} : \mathbf{2}^P \rightarrow \mathbb{Z}_+^{768}$  получаем формулу: для  $i = 1, \dots, 768$  и подмножества  $A \subseteq P$   $H_i(A) = \iint_P \chi_i(x) \cdot \chi_A(x) dx_1 dx_2$ , где  $\chi_A$  – характеристическая функция множества  $A \subseteq P$ , т.е.  $\chi_A(x) = 1$ , если  $x \in A$  и  $\chi_A(x) = 0$  в противном случае.

**Kernel Based Object Tracking: описание объекта вектором признаков и построение функции схожести**

Введем в рассмотрение семейство функций

$$g(x) = \max \left( 0, 1 - \left( \frac{x_1 - y_1}{l_1} \right)^2 - \left( \frac{x_2 - y_2}{l_2} \right)^2 \right), \text{ где } x_1, x_2$$

являются переменными,  $y_1, y_2, l_1, l_2$  – параметры,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2) \in P = [0; d_1] \times [0; d_2]$ ,  $\mathbf{y} = (y_1, y_2) \in P = [0; d_1] \times [0; d_2]$ ,  $l_1, l_2 \in \mathbb{R}$ . Такую функцию будем называть ядром  $G$ . Точки прямоугольника  $P$ , для которых  $g(\mathbf{x}) \neq 0$ , образуют внутренность эллипса. Такой участок будем называть областью  $G$ .



Рис 1. Трехмерный график функции  $g$

Для  $i = 1, \dots, 768$  определим величину  $H_i(\mathbf{y}, \mathbf{l}) = \iint_P \chi_i(x) \cdot g(x) dx_1 dx_2$  – скалярное произведение  $\chi_i(x)$  и ядра  $G$ , где  $\mathbf{y} = (y_1, y_2)$ ,  $\mathbf{l} = (l_1, l_2)$ . Существование интеграла следует из тех двух фактов, что все разрывы функции  $\chi_i(x)$  первого рода и множество точек разрыва есть множество меры нуль. Из  $H_i, i = 1, \dots, 768$ , составляем вектор  $\mathbf{H} = \{H_i | i = 1, \dots, 768\}$ . Вещественнозначный вектор  $\mathbf{H} = \{H_i | i = 1, \dots, 768\}$  определяется цветовыми характеристиками и параметрами некоторой эллиптической области кадра,

$H_i \geq 0$ , все  $H_i = 0$  только для области, в которой нет пикселей, – области нулевого размера.

Для построенного таким образом вектора признаков полностью подходят расчеты из [11]. Приведем здесь результаты применения этих расчетов и рассуждений к построенному выше новому вектору признаков. Вектор  $\mathbf{H} = \{H_i | i = 1, \dots, 768\}$  не подходит для сравнения участков кадра, поскольку значения  $H_i$  изменяются при масштабировании. Чтобы избежать этих ненужных изменений, рассматривают вектор относительных весов каждого цвета участка кадра  $\mathbf{h} = \{h_i | i = 1, \dots, 768\}$ , где  $h_i = h_i(\mathbf{y}, \mathbf{l}) = H_i / \sum_{i=1}^{768} H_i = H_i / \sum \mathbf{H}$ . Такой вектор не изменится,

если объект подвергнуть простому масштабированию, но будет плавно меняться при изменении размеров  $\mathbf{l} = (l_1, l_2)$  и положения  $\mathbf{y} = (y_1, y_2)$  объекта.

Функцией схожести таких векторов служит коэффициент Бхаттачарьи [2, 3]  $\rho = \frac{1}{\sum_{i=1}^{768} \sqrt{h_{0i} \cdot h_i}}$ , где

$\mathbf{h}_0 = (h_{01}, \dots, h_{0768})$  – некоторый вектор, с которым производим сравнение. Тогда если в качестве векторов  $\mathbf{h} = \{h_i | i = 1, \dots, 768\}$  брать векторы признаков областей  $G$ , то  $\rho$  становится функцией, зависящей от параметров  $y_1, y_2, l_1, l_2$  ядер  $G$ , т.е. от положения и размеров. Для нахождения позиции ядра  $G$  с максимально схожим вектором признаков  $\mathbf{h} = \{h_i | i = 1, \dots, 768\}$  необходимо продифференцировать схожесть  $\rho$ . Чтобы продифференцировать  $\rho$ , запишем  $\rho = \sum \rho_i$ , где  $\rho_i = \sqrt{h_{0i} \cdot h_i}$ . Дифференцируем функцию  $\rho$ : сначала находим

$$\frac{\partial H_i}{\partial y_k} = \frac{2}{l_k^2} \iint_P \chi_i(x) \cdot (g(x) \neq 0) \cdot (x_k - y_k) dx_1 dx_2$$

и

$$\frac{\partial H_i}{\partial l_k} = \frac{2}{l_k^3} \iint_P \chi_i(x) \cdot (g(x) \neq 0) \cdot (x_k - y_k)^2 dx_1 dx_2$$

для  $i = 1, \dots, 768, k = 1, k = 2$ . Через производные вектора  $\mathbf{H} = \{H_i | i = 1, \dots, 768\}$  находим

$$\frac{\partial h_i}{\partial y_k} = \frac{\frac{\partial H_i}{\partial y_k} - h_i \cdot \sum_{i=1}^{768} \frac{\partial H_i}{\partial y_k}}{\sum_{i=1}^{768} H_i} \text{ и } \frac{\partial h_i}{\partial l_k} = \frac{\frac{\partial H_i}{\partial l_k} - h_i \cdot \sum_{i=1}^{768} \frac{\partial H_i}{\partial l_k}}{\sum_{i=1}^{768} H_i}$$

для  $i = 1, \dots, 768, k = 1, k = 2$ .

Теперь имеем для производных функции схожести  $\frac{\partial \rho_i}{\partial y_k} = \sum_{i=1}^{768} \frac{\partial h_i}{\partial y_k} \cdot \frac{\rho_i}{2h_i}$  и  $\frac{\partial \rho_i}{\partial l_k} = \sum_{i=1}^{768} \frac{\partial h_i}{\partial l_k} \cdot \frac{\rho_i}{2h_i}, k = 1, k = 2$ .

Зная производные функции схожести и максимально возможное ее значение 1, определяем направление движения и величину шага для достижения ее



максимуму: для областей с параметрами, близкими к  $\mathbf{y}_0 = (y_{01}, y_{02})$  и  $\mathbf{l}_0 = (l_{01}, l_{02})$ , имеем [12] для смещения области

$$\Delta y_1 = \frac{1 - \rho(y_{01}, y_{02}, l_{01}, l_{02})}{\frac{\partial \rho^2}{\partial y_1} + \frac{\partial \rho^2}{\partial y_2} + \frac{\partial \rho^2}{\partial l_1} + \frac{\partial \rho^2}{\partial l_2}} \frac{\partial \rho}{\partial y_1},$$

$$\Delta y_2 = \frac{1 - \rho(y_{01}, y_{02}, l_{01}, l_{02})}{\frac{\partial \rho^2}{\partial y_1} + \frac{\partial \rho^2}{\partial y_2} + \frac{\partial \rho^2}{\partial l_1} + \frac{\partial \rho^2}{\partial l_2}} \frac{\partial \rho}{\partial y_2},$$

для изменения размеров области

$$\Delta l_1 = \frac{1 - \rho(y_{01}, y_{02}, l_{01}, l_{02})}{\frac{\partial \rho^2}{\partial y_1} + \frac{\partial \rho^2}{\partial y_2} + \frac{\partial \rho^2}{\partial l_1} + \frac{\partial \rho^2}{\partial l_2}} \frac{\partial \rho}{\partial l_1},$$

$$\Delta l_2 = \frac{1 - \rho(y_{01}, y_{02}, l_{01}, l_{02})}{\frac{\partial \rho^2}{\partial y_1} + \frac{\partial \rho^2}{\partial y_2} + \frac{\partial \rho^2}{\partial l_1} + \frac{\partial \rho^2}{\partial l_2}} \frac{\partial \rho}{\partial l_2}.$$

### Свойства используемых векторов признаков

Рассмотрим свойства трех векторов признаков (точнее векторнозначных функций) областей цветной цифровой картинке: построенного выше вектора  $\mathbf{h} = \{h_i | i = 1, \dots, 768\}$ , в дальнейшем будем называть его  $\mathbf{h}768$ , и используемые в [1–3, 11–16] два вектора, построенные на цветовых гистограммах, которые здесь будем называть по их размерностям  $\mathbf{h}16777216$  и  $\mathbf{h}512$ . Напомним способы построения  $\mathbf{h}16777216$  и  $\mathbf{h}512$ :  $\mathbf{h}16777216$  – это относительные распределения различных вариантов цвета в цифровой записи картинке в формате RGB24, получается  $256^3 = 16777216$  различных вариантов – 16777216-мерный вектор. В [3] используется также относительное распределение различных вариантов цвета в цифровой записи картинке, но каждая из компонент (R, G и B) разбита на 8 градаций. Всего получается  $8^3 = 512$  различных вариантов – 512-мерный вектор, который и назван  $\mathbf{h}512$ . Для экспериментов подходят 512-мерный и 768-мерный векторы, на 16777216-мерном векторе (~16 мегабайт) расчеты потребовали более мощных ресурсов, чем настольный компьютер.

На рис. 2 показаны результаты экспериментов. На иллюстрации сверху переходы между зонами одного цвета скачкообразные, что создает неестественные градиентные разводы даже на монотонной стене. Наличие разводов обусловлено малым количеством – всего 512, различных цветов, а следовательно, и малым количеством бинов гистограммы, и малой размерностью вектора  $\mathbf{h}512$ . Зато с таким вектором можно отследить трек объекта (отметить и обвести объект красным прямоугольником) даже в реальном времени. Снизу приведен тот же фрагмент, но с использованием всех возможных цветов, которые позволяют сгенерировать стандарт RGB24. Как следствие – более естественные цвета, но вектор признаков увеличивается более чем в 32000 раз и требует

разработки иных особенных методов обработки. Однако с вектором  $\mathbf{h}768$  отследить трек объекта уже имеющимся инструментом делается возможным, поскольку вектор признаков увеличился всего в 1,5 раза, что незначительно.

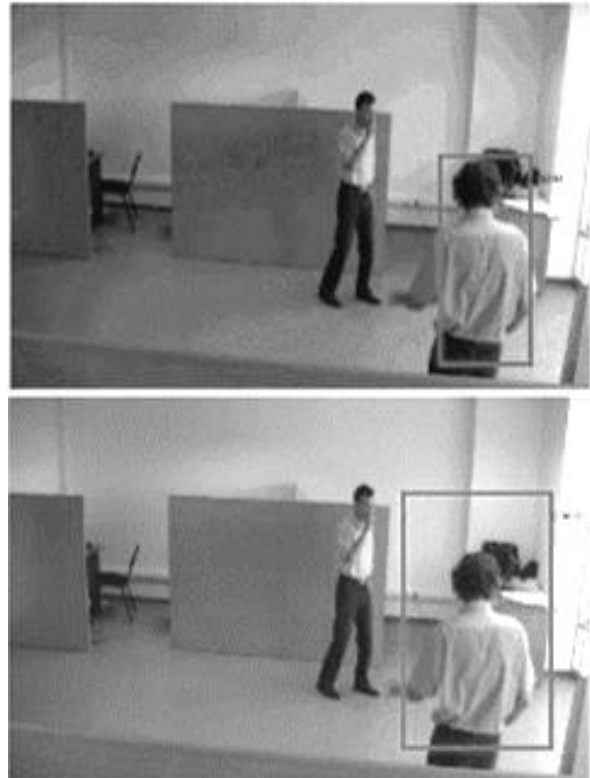


Рис. 2. Кадры из экспериментальных роликов: сверху – 512-мерный; снизу – 768-мерный векторы



Рис. 3. Кадры из экспериментальных роликов: слева – 512-мерный, справа – 768-мерный векторы

На рис. 3 также хорошо видны последствия уменьшения количества цветов в виде градиентных скачков на снежном поле слева, тогда как на кадре справа поле однородно. Неестественные градиентные переходы видны и на небе.

### Выводы

По результатам слежения – количество кадров и точность накрытия цели – векторы признаков **h768** и **h512** дают близкие результаты при попадании изображений в узкий цветовой интервал. По диапазону применения: с помощью вектора признаков **h768** можно обрабатывать изображения в цветах, не доступных для **h512**.

### Литература

1. Comaniciu D. Mean Shift: A robust approach toward feature space analysis / D. Comaniciu, P. Meer // *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions. – May, 2002. – Vol. 24. – P. 603–519.
2. Comaniciu D. Kernel-based object tracking/ D. Comaniciu, V. Ramesh, P. Meer // *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions. – May, 2003. – Vol. 25, No. 5. – P. 564–577.
3. Comaniciu D. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift / D. Comaniciu, V. Ramesh, P. Meer // *IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* – 2000. – Vol. 2, No. 2. – P. 142–149.
4. Pastushkov A.V. Search and tracking method of cloud fields on image/ A.V. Pastushkov, V.T. Kalaida // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering.* – 2015. – Vol. 9680. – P. 96805V-1–96805V-4.
5. Petrov A.A. Comparison of the effectiveness of optic atmosphere investigation tasks distribution techniques in local network/ A.A. Petrov, V.T. Kalaida // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering.* – 2015. – Vol. 9680. – P. 968035-1–968035-4.
6. Lijia W. An Adaptive Kernel based Correlation Filter Algorithm for Real Time Object Tracking / W. Lijia, W. Binbin, C. Xufeng // *12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC).* – 2020. – P. 144–148.
7. Dargazany A. Multibandwidth Kernel-Based Object Tracking / A. Dargazany, A. Soleimani, A. Ahmadyfard // *Advances in Artificial Intelligence.* – 2010. – Vol. 2010. – Article ID 175603.
8. Shixiang C. Flying Point Target Tracking Using Infrared Images / C. Shixiang, H. Hongyan // *Proceedings of the 5th International Conference on Multimedia and Image Processing.* – 2020. – P. 23–27.
9. Iswanto I.A. Object Tracking Based on Meanshift and Particle-Kalman Filter Algorithm with Multi Features / I.A. Iswanto, T.W. Choa, B. Li // *Procedia Computer Science.* – 2019. – Vol. 157. – P. 521–529.
10. Hyochang A. A Research of CNN-based Object Detection for Multiple Object Tracking in Image / A. Hyochang, L. Yong-Hwan // *Journal of the Semiconductor & Display Technology.* – 2019. – Vol. 18, No. 3. – P. 110–114.
11. Шапошников А.И. Компьютерное слежение с масштабированием, основанное на градиентном спуске / А.И. Шапошников, Е.В. Шапошникова // *ГрафиКон'2011: 21-я Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению: Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 26–30 сентября 2011 г.: Труды конференции.* – М.: МАКС-Пресс, 2011. – С. 231–234.
12. Шапошников А.А. К вопросу о качестве работы алгоритмов слежения за объектами / А.А. Шапошников, А.И. Шапошников, Е.В. Шапошникова // *Компьютерные исследования и моделирование.* – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 495–502.
13. Шапошников А.И. Выделение движущихся объектов в анализе изображения неподвижной камеры // *Информационные технологии и математическое моделирование: матер. VIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (13–14 ноября 2009 г.).* – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2009. – Ч. 2. – С. 297–301.
14. Шапошников А.И. О кластеризации в анализе движения в изображении с неподвижной камеры / А.И. Шапошников, Е.В. Шапошникова // *Пятая Сибирская конф. по параллельным и высокопроизводительным вычислениям: сб. трудов (1–3 декабря 2009 г.).* – С. 148–153.
15. Шапошников А.И. Электронный информационный образовательный ресурс: Алгоритм «Локализация объекта в кадре» / А.И. Шапошников, Е.В. Шапошникова // *Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», октябрь 2012.* – № 10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2012/10.doc>, свободный (дата обращения: 23.06.2021).
16. Шапошников А.А. Зависимость эффективности алгоритма слежения, основанного на пятипараметрическом градиентном спуске, от качества изображения объекта // *Вопросы науки.* – 2015. – Т. 1. – С. 99–101.

### Шапошников Альберт Игоревич

Канд. физ.-мат. наук, доцент лаб. автоматизации радиофизических исследований (ЛАРИДА) Национального исследовательского Томского государственного ун-та (НИ ТГУ) Ленина пр-т, 36, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-802-62-55  
Эл. почта: albertelena@mail.ru

Shaposhnikov A.I.

### Feature-vector for the MeanShift

The article gives the description of the feature vector, which is suitable for the MeanShift procedure, uses all the color information of the RGB24 format and has a dimension exceeding only 1.5 times the dimension of the smallest 512-dimensional vector used for the Kernel Based Object Tracking procedure. For the described feature vector, a function of similarity of two elliptical areas of the frame is built. For the similarity function, formulas are found for the gradient vector - the mean shift vector, which indicates the direction of the growth of similarity in four-dimensional space of all elliptical regions covering the object in the frame. Knowing the greatest value of the similarity function of two elliptical regions, the length of the displacement vector in the four-dimensional space of all elliptical regions was found. To this vector the previous point in space must be moved at the current moment, i.e. the values of the coordinates of the center and the dimensions of the ellipse, in order to obtain the best similarity of the current elliptical area from the previous one. Finally, so as to implement Kernel Based Object Tracking, an algorithm of successive iterations (Newton's method) has been developed, which allows finding the parameters of the ellipse that really has the best similarity. The experiments were carried out and their results were presented and discussed.

**Keywords:** feature vector, Kernel Based Object Tracking, MeanShift, color component.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-34-38

## References

1. Comaniciu D., Meer P. Mean Shift: A robust approach toward feature space analysis. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, May, 2002, vol. 24, pp. 603–519.
2. Comaniciu D., Ramesh V., Meer P. Kernel-based object tracking. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, May, 2003, vol. 25, no. 5, pp. 564–577.
3. Comaniciu D., Ramesh V., Meer P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift. *IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, 2000, vol. 2, no. 2, pp. 142–149.
4. Pastushkov A.V., Kalaida V.T. Search and tracking method of cloud fields on image. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2015, vol. 9680, pp. 96805V-1–96805V-4.
5. Petrov A. A., Kalaida V.T. Comparison of the effectiveness of optic atmosphere investigation tasks distribution techniques in local network. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2015, vol. 9680, pp. 968035-1–968035-4.
6. Lijia W., Binbin W., Xufeng C. An Adaptive Kernel based Correlation Filter Algorithm for Real Time Object Tracking. *12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 2020, pp. 144–148.
7. Dargazany A., Soleimani A., Ahmadyfard A. Multi-bandwidth Kernel-Based Object Tracking. *Advances in Artificial Intelligence*, 2010, vol. 2010, article ID 175603.
8. Shixiang C., Hongyan H. Flying Point Target Tracking Using Infrared Images. *Proceedings of the 5th International Conference on Multimedia and Image Processing*, 2020, pp. 23–27.
9. Iswanto I. A., Choa T.W., Li B. Object Tracking Based on Meanshift and Particle-Kalman Filter Algorithm with Multi Features. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 157, pp. 521–529.
10. Hyochang A., Yong-Hwan L. A Research of CNN-based Object Detection for Multiple Object Tracking in Image. *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, 2019, vol. 18, is. 3, pp. 110–114.
11. Shaposhnikov A.I., Shaposhnikova E.V. Komp'yuternoe slezhenie s masshtabirovaniem, osnovannoe na gradientnom spuske [Gradient descent based computer scaling tracking]. *GraphiCon '2011: The 21st International Conference on Computer Graphics and Vision September 26–30, 2011 Moscow, Russia Conference: Proceedings*, M.: MAKS-Press, 2011, pp. 231–234.
12. Shaposhnikov A.A., Shaposhnikov A.I., Shaposhnikova E.V. About quality of Kernel based object tracking. *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 495–502.
13. Shaposhnikov A.I. Vydelenie dvizhushchihya ob'ektov v analize izobrazheniya nepodvizhnoy kamery [Highlighting Moving Objects in the Analysis of a Fixed Camera Image]. *Information Technologies and Mathematical Modelling: Materials of 8th Russian research-practice conference with international participate (13–14 November 2009)*. – Tomsk: Izd-vo Tom. Un-ta, 2009, pt. 2, pp. 297–301.
14. Shaposhnikov A.I., Shaposhnikova E.V. O klasterizacii v analize dvizheniya v izobrazhenii s nepodvizhnoy kamery [About clustering in motion analysis in images from a fixed camera]. *Fifth Siberian Conference on Parallel and High Performance Computing: Proceedings (1–3 December 2009)*, pp. 148–153.
15. Shaposhnikov A.I., Shaposhnikova E.V. Electronic information educational resource: Algoritm «Lokalizaciya ob'ekta v kadre» [Localization of an object in the frame] // *Chronicles OFERNIO*, October 2012, no. 10. Available at: <http://ofermio.ru/portal/newspaper/ofernio/2012/10.doc>, free. (Accessed: June 23, 2021).
16. Shaposhnikov A.A. Zavisimost' effektivnosti algoritma slezheniya, osnovannogo na pyatiparametricheskom gradientnom spuske, ot kachestva izobrazheniya ob'ekta [Dependence of the efficiency of the tracking algorithm based on a five-parameter gradient descent on the image quality of the object]. *Voprosy Nauki*, 2015, vol.1, pp. 99–101.

**Albert I. Shaposhnikov**

Candidate of Science in Physics and Mathematics,  
 Assistant Professor, Tomsk State University (NS TSU)  
 36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
 Phone: +7-913-802-62-55  
 Email: albertelena@mail.ru

УДК 004.62

С.В. Разумников

## Алгоритм и программное обеспечение для построения агрегированных рейтингов

При принятии решений о выборе какой-либо альтернативы необходимо узнать, какой из рассматриваемых вариантов будет лучше. Здесь важно установить критерии, по которым будет производиться оценка, и определиться со шкалой. При этом следует уделить внимание некомпенсаторному характеру значений критериев. Учесть эти нюансы позволяет метод порогового агрегирования, используя который, можно построить рейтинг, который будет отражать сравнительную значимость различных альтернатив для предприятия. Использование данного метода не позволит компенсировать низкие оценки экспертов другими более высокими оценками по другим критериям. В статье представлены схема этапов оценки по некомпенсаторной модели порогового агрегирования для построения рейтингов и алгоритм для разработки программного обеспечения «Формирование агрегированного рейтинга». Данная модель была запрограммирована на языке С# в среде Visual Studio 2019.

**Ключевые слова:** пороговое агрегирование, модель, алгоритм, схема, программа, рейтинг, критерии, альтернативы, градации.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-39-44

Проблема выбора наилучшей альтернативы является одной из важных направлений в теории принятия решений [1]. Как правило, при выборе альтернативы оцениваются по множеству критериев и формируется проранжированный вектор, по которому уже определяются лучшие. В случае важного выбора необходимо учитывать некомпенсаторный характер значений критериев. Поэтому оценка альтернатив без учета компенсаций является современной актуальной задачей [1–3].

Для избегания проблемы с компенсацией предлагается сформировать агрегированный рейтинг с применением правила порогового агрегирования, который используется в задачах многокритериальной оценки. Особенность этого правила в некомпенсаторном характере, который заключается в том, что невозможно будет компенсировать низкое значение критерия другими более высокими значениями. Благодаря этому свойству уменьшится возможность принудительного улучшения альтернативы своих значений в рейтинге [4–7].

Целью данной работы является разработка схемы, алгоритма и программного обеспечения для построения агрегированного рейтинга некомпенсаторным методом порогового агрегирования.

### Модель порогового агрегирования

Пусть  $k$  – это количество альтернатив, которые необходимо оценить по  $n$  критериям. В задаче для построения рейтинга в качестве альтернатив могут выступать различные субъекты или объекты, например сотрудники, поставщики или проекты. Подробное описание модели приведено в [4].

Оцениваться альтернативы могут по выбранной градационной шкале, которая может быть от двух и выше. Часто применяется пятиградационная шкала, так как это привычная для эксперта шкала оценивания (например, в школах и университетах). Также удобна 10-балльная шкала для разнесения по градациям. Более 10 использовать не уместно, хотя

и возможно. Будем придерживаться десятиградационной шкалы для создания программного обеспечения при построении агрегированных рейтингов. Приведем пример десятиградационной шкалы оценок (табл. 1) для разнесения значений показателей альтернатив по градациям. Пусть  $m$  – это число градаций.

Таблица 1

10-градационная шкала оценок

Балл	Описание значения
1	Самое худшее значение показателя
2	Показатель чуть выше минимальных значений
3	Показатель более высокий по сравнению с минимальным значением
4	Значение показателя на хорошем уровне
5	Значение выше хорошего уровня
6	Очень хороший уровень показателя
7	Отличный уровень
8	Показатель более низкий по сравнению с максимальным значением
9	Показатель чуть ниже максимальных значений
10	Самый высокий показатель

### Алгоритм разработки программного обеспечения

Алгоритм программы состоит из 5 этапов-выводов. После ввода данных сначала находится количество одинаковых оценок. Далее сумма  $V_j(x)$ . Потом определяются значения  $a$  и  $b$ . Причем значения  $a$  еще и для идеального варианта, 4-й вывод – это значения сочетаний для  $F_{(x)}$  и  $F_{\max}$ . И последнее – вывод расчета индекса предпочтения и нормированного индекса. Вывод 5 данных будет выполнен специально для просмотра промежуточных результатов при расчетах плюс удобство в программировании.

На рис. 1 представлена схема (алгоритм) этапов оценки по модели некомпенсаторного агрегирования.

На рис. 2 представлен алгоритм разработки программного обеспечения для формирования агрегированных рейтингов.



Рис. 1. Схема этапов оценки по модели некомпенсаторного агрегирования

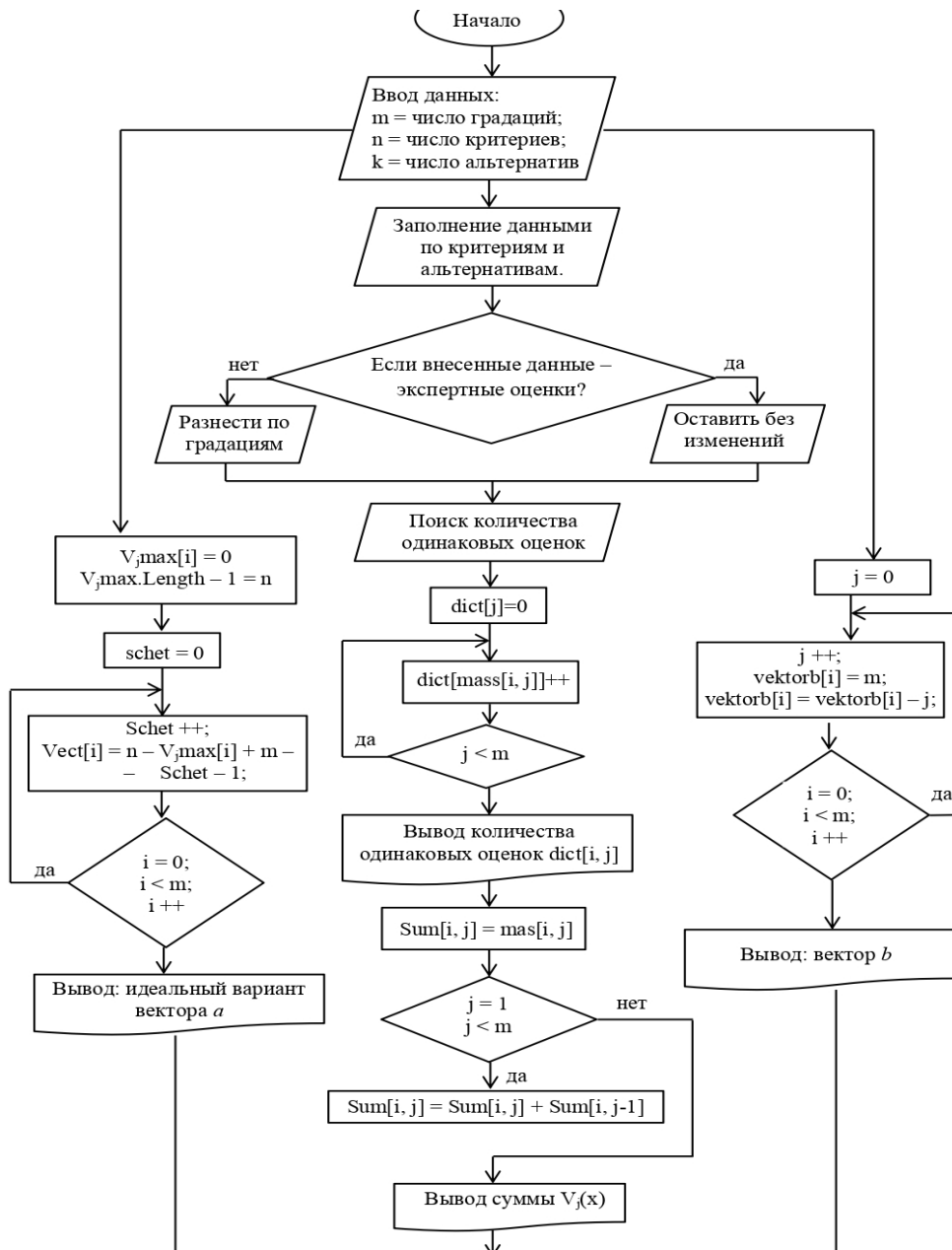


Рис. 2 (начало)

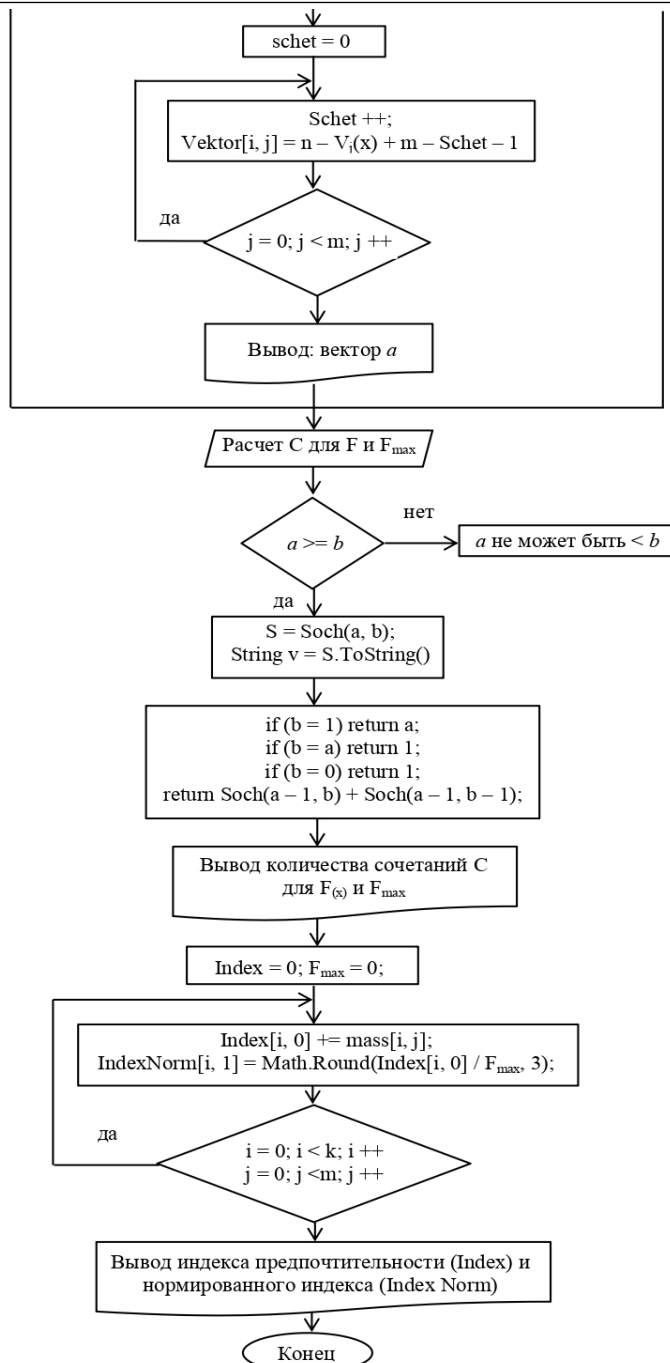


Рис. 2 (окончание). Алгоритм программы «Формирование агрегированного рейтинга»

Для получения агрегированного рейтинга оцениваемых объектов необходимо выполнение этапов, представленных в данной схеме.

Программа реализует следующие функции:

1. Учет данных об альтернативах, критериях и градациях для оценивания.
2. Расчет параметров и количества сочетаний.
3. Расчет индекса предпочтения для построения агрегированного рейтинга.
4. Формирование графика рейтинга.

#### Программа для построения агрегированных рейтингов и анализ результатов оценки рейтинга

На основе модели некомпенсаторного агрегирования и построенного алгоритма была разработана программа «Формирование агрегированных рейтингов»

на языке C#. Согласно построенному алгоритму в программе предусмотрено 5 выводов данных, включая итоговый – индекс предпочтения, на основе которого и будет строиться рейтинг.

Заполнение базы данных по альтернативам и критериям может быть уникальным для каждого предприятия, исходя из его специфики. Программа разработана максимально универсально для любой области, где можно так или иначе составлять рейтинги. На рис. 3 представлено диалоговое окно для построения обобщенного рейтинга провайдеров облачных услуг.

Рассмотрим пример построения рейтинга для провайдеров облачных услуг на основе реальных данных, полученных аналитическими компаниями.

Оценку проведем по 5 критериям: выручка за услуги IaaS за 2018 и 2019 гг.; соотношение выручки; доля выручки IaaS от совокупной выручки предприятия и

количество клиентов (заказчиков IaaS). На основе полученного рейтинга проведем анализ результатов оценки рейтинга.

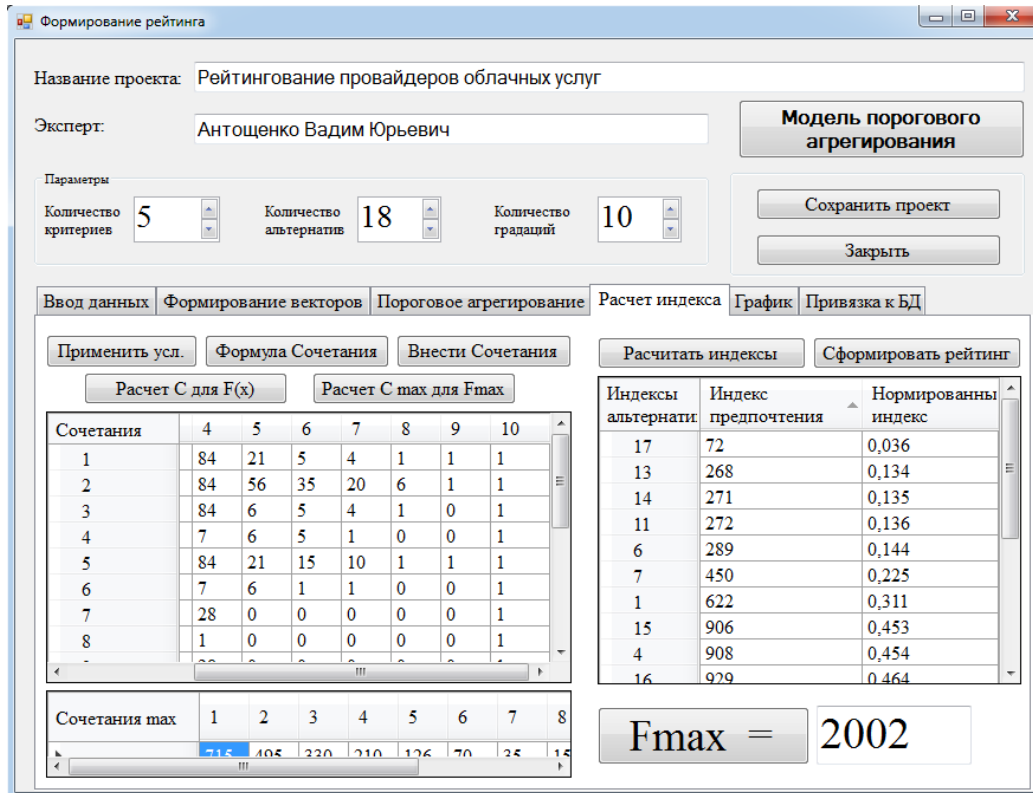


Рис. 3. Диалоговое окно программы «Формирование агрегированных рейтингов», вкладка «Расчет индекса»

В примере рассмотрим данные 18 крупнейших поставщиков IaaS. При построении рейтинга в качестве альтернатив будут выступать конкретные фирмы-поставщики IaaS-услуг. Данные по критериям внесем в программу и выполним все расчеты. Результаты сформированного проранжированного рейтинга представлены на рис. 3 в диалоговом окне программы и в табл. 2.

Таблица 2

Рейтинг поставщиков IaaS  
со значениями индекса предпочтения

№ п/п	Наименование провайдера	Индекс предпочтения	Нормированный индекс
1	Selectel	1673	0,836
2	ИТ-ГРАД	1533	0,766
3	Ростелеком	1432	0,715
4	M1Cloud	1364	0,681
5	IBS	1361	0,6798
6	OnCloud	1250	0,624
7	Oxygen	1230	0,614
9	DataLine	929	0,464
10	ОблакоТеха	908	0,454
8	RUVDS.com	906	0,453
11	Softline	622	0,311
12	Сервионика	450	0,225
13	Крок	289	0,144
14	CorpSoft24	272	0,136
15	3data	271	0,135
16	Linxdatacenter	268	0,134
17	Caravan Aero	72	0,036
18	LanCloud	34	0,017

Данные расчеты также были выполнены и вручную для проверки правильности работы программы, ее тестирования. Результат полностью сошелся, что говорит о правильности написания программного кода. Использование программы позволяет за считанные секунды после внесения данных рассчитать итоговый индекс предпочтения. Это значительно ускоряет процесс построения рейтинга. Вручную, даже с использованием онлайн-калькуляторов при нахождении количества сочетаний по комбинаторной формуле, данный процесс занял несколько часов.

В результате расчетов по модели некоторые позиции векторов, которые были сначала представлены для поставщиков, изменились. Это говорит о том, что простое упорядочивание по баллам не даст точный результат. Только после выполненных расчетов по модели порогового агрегирования можно утверждать о верной позиции в рейтинге.

Из полученных расчетов по модели лучшим в рейтинге поставщиком IaaS является Selectel. Его индекс предпочтения равен 1673. LanCloud со значением 34 занимает последнее место в рейтинге.

С использованием программы был построен рейтинг крупнейших поставщиков IaaS, который отражает сравнительную значимость различных IaaS-провайдеров для предприятия. Согласно построенному рейтингу можно выбрать лучшего провайдера при использовании облачных услуг.



### Заключение

При принятии решений о выборе какой-либо альтернативы необходимо узнать, какой из рассматриваемых вариантов будет лучше. Здесь важно установить критерии, по которым будет производиться оценка, и определиться со шкалой. При этом следует уделить внимание некомпенсаторному характеру значений критериев. Учесть эти нюансы позволяет метод порогового агрегирования, используя который, можно построить рейтинг, который будет отражать сравнительную значимость различных альтернатив для предприятия.

В статье представлена модель некомпенсаторного агрегирования для построения рейтингов, в основе которой лежит правило порогового агрегирования, применяемого в задачах многокритериального оценивания. Были разработаны схема этапов оценки по данной модели и алгоритм для разработки программного обеспечения «Формирование агрегированного рейтинга». Данная модель была запрограммирована на языке C# в среде Visual Studio 2019. Приведен пример расчета и построения рейтинга в программе для поставщиков облачных услуг.

Работа выполнена при финансовой поддержке Стипендии Президента РФ.

### Литература

1. Разумников С.В. Планирование развития облачной стратегии на основе применения многокритериальной оптимизации и метода STEM // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 53–61.
2. Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy / S. Breedveld, D. Craft, R. Haveren, B. Heijmen // European Journal of Operational Research. – 2019. – Vol. 277, No. 1. – P. 1–19.
3. Measurement of chip morphology and multi criteria optimization of turning parameters for machining of AISI 4340 steel using Y-ZTA cutting insert / B.K. Singh, H. Roy, B. Mondal, S.S. Roy, N. Mandal // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – 2019. – Vol. 142. – P. 181–194.
4. Разумников С.В. Некомпенсаторное агрегирование и рейтингование провайдеров облачных услуг // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 63–69.
5. Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of isolated simply supported highway bridges / J.Q. Wang, S. Li, F. Hedayati Dezfouli, M.S. Alam // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 189. – P. 509–522.
6. Андрейчиков А.В. Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: ЛИБРИКОМ, 2013. – 304 с.
7. Алескеров Ф.Т. Бинарные отношения, графы и коллективные решения / Ф.Т. Алескеров, Э.Л. Хабина, Д.А. Шварц. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2012. – 344 с.
8. Калягин В.А. Аксиоматическая модель некомпенсаторного агрегирования: Препринт WP7/2009/01 / В.А. Калягин, В.В. Чистяков. – М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2009. – 76 с.
9. Алескеров Ф.Т. Оценка вклада научных работников методом порогового агрегирования / Ф.Т. Алескеров, Е.С. Катаева, В.В. Писляков, А.И. Якуба // Управление большими системами. – Спец. вып. 44: Наукометрия и экспертиза в управлении наукой. – 2013. – С. 172–189.
10. Алескеров Ф.Т. Пороговое агрегирование трехградационных ранжировок / Ф.Т. Алескеров, Д.А. Юзбашев, В.И. Якуба // Автоматика и телемеханика. – 2007. – Вып. 1. – С. 147–152.
11. Aleskerov F. A threshold aggregation of three-graded rankings / F. Aleskerov, V. Yakuba, D. Yuzbashev // Math. Social Sci. 53. – 2007. – P. 106–110.
12. Aleskerov F. The threshold aggregation / F. Aleskerov, V.V. Chistyakov, V.A. Kalyagin // Econ. lett. 107. – 2010. – No. 2. – P. 161–162.
13. Aleskerov F. Social threshold aggregations / F. Aleskerov, V. Chistyakov, V. Kalyagin // Social Choice and Welfare. – 2010. – Vol. 35, No. 4. – P. 627–646.
14. Sultan N. Knowledge management in the age of cloud computing and Web 2.0: Experiencing the power of disruptive innovations // International journal of information management. – 2013. – Vol. 33, No. 1. – P. 160–165.
15. Maroukhine O.V. Expert support system for making decision by the results of computer-based testing within the ends of teaching quality evaluation / O.V. Maroukhine, O.G. Berestneva // Proceedings – KORUS 2003: 7th Korea–Russia International Symposium on Science and Technology. – 2003. – Vol. 2. – P. 416–419.
16. Razumnikov S.V. Integrated model to assess cloud deployment effectiveness when developing an IT-strategy / S.V. Razumnikov, D. Prankevich // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 127: Urgent Problems of Modern Mechanical Engineering [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/127/1/012018>, свободный (дата обращения: 16.05.2021).

### Разумников Сергей Викторович

Канд. техн. наук, доцент Юргинского технологического института (ф-ла) Национального исследовательского Томского политехнического университета  
Ленинградская ул., 26, г. Юрга, Россия, 652057  
Тел.: +7 (384-5) 17-77-64  
Эл. почта: demolove7@inbox.ru

Razumnikov S.V.

### Algorithm and Software for Building Aggregated Rankings

When deciding on the choice of any alternative, it is necessary to find out which of the considered options will be better. In this perspective it is important to establish the assessment criteria and to determine the scale. In this case, the attention should be paid to the non-compensatory nature of the values of the criteria. The method of threshold aggregation allows considering these nuances. Using it, one can build a ranking that will reflect the comparative importance of various alternatives for the enterprise. The use of this method will prevent from compensating the low scores of experts with other higher scores on other criteria. The article presents a non-compensatory aggregation model to compile rankings, which is based on the threshold aggregation rule. A diagram of the assessment stages for this model and an algorithm for the de-



velopment of software «Compiling an Aggregated Ranking» are presented. This model was programmed in C # in the Visual Studio 2019 environment.

**Keywords:** threshold aggregation, model, algorithm, scheme, program, rating, criteria, alternatives, gradations.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-39-44

### References

1. Razumnikov S.V. [Planning the development of a cloud strategy based on the application of multicriteria optimization and the STEM method]. *Proceedings of the TUSUR University*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 53–61 (in Russ.)

2. Breedveld S., Craft D., Haveren R., Heijmen B. Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy. *European Journal of Operational Research*, 2019, vol. 277, no. 1, pp. 1–19.

3. Singh B.K., Roy H., Mondal B., Roy S.S., Mandal N. Measurement of chip morphology and multi criteria optimization of turning parameters for machining of AISI 4340 steel using Y-ZTA cutting insert. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2019, vol. 142, pp. 181–194.

4. Razumnikov S.V. [Non-compensatory aggregation and rating of cloud service providers]. *Proceedings of the TUSUR University*, vol. 21, no. 4, pp. 63–69 (in Russ.).

5. Wang J.Q., Li S., Hedayati Dezfali F., Alam M.S. Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of isolated simply supported highway bridges. *Engineering Structures*, 2019, vol. 189, pp. 509–522.

6. Andreichikov A.V., Andreichikova O.N. [Systematic analysis of strategic decisions in innovation. Mathematical, heuristic and intellectual methods of system analysis and synthesis of innovations]. Moscow, Book House «LIBRICOM», 2013. 304 p.

7. Aleskerov F.T., Habina E.H.L., Shvarc D.A. [Binary relationships, graphs and collective solutions]. Moscow, Fismatlit, 2012. 344 p. (in Russ.).

8. Kalyagin V.A., Chistyakov V.V. [Axiomatic model of non-compensatory aggregation]. Preprint. Moscow, GU VShE publ., 2009, 76 p. (in Russ.).

9. Aleskerov F.T., Kataeva E.S., Pisyakov V.V., Yakuba A.I. Ocenka vklada nauchnyh rabotnikov metodom porogovogo agregirovaniya [Assessment of the contribution of

researchers by the method of threshold aggregation]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large system management]. 2013, pp. 172–189 (in Russ.).

10. Aleskerov F.T., Yuzbashev D.A., Yakuba V.I. Porogovoe agregirovanie trekhgradacionnyh ranzhirovok [Threshold aggregation of three-grade rankings]. *Avtomatika i telemekhanika*. [Automation and Remote Control], 2007, vol. 1, pp. 147–152 (in Russ.).

11. Aleskerov F., Yakuba V., Yuzbashev D. A threshold aggregation of three-graded rankings. *Math. Social Sci.*, 53, 2007, pp. 106–110.

12. Aleskerov F., Chistyakov V.V., Kalyagin V.A. The threshold aggregation. *Econ. Let.*, 107, 2010, № 2, pp. 161–162.

13. Aleskerov F., Chistyakov V., Kalyagin V. *Social threshold aggregations // Social Choice and Welfare*, 2010, vol. 35, no. 4, pp. 627–646.

14. Sultan N. Knowledge management in the age of cloud computing and Web 2.0: Experiencing the power of disruptive innovations. *International Journal of Information Management*, 2013, vol. 33, no. 1, pp. 160–165.

15. Maroukhine O.V., Berestneva O.V. Expert support system for making decision by the results of computer-based testing within the ends of teaching quality evaluation. *Proceedings – KORUS 2003: 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology*, 2003, vol. 2, pp. 416–419.

16. Razumnikov S.V., Prankevich D.P. Integrated model to assess cloud deployment effectiveness when developing an IT-strategy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 127. Urgent Problems of Modern Mechanical Engineering. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/127/1/012018>, free. (Accessed: May 16, 2021).

---

### Sergey V. Razumnikov

Candidate of Science in Engineering, Associate Professor, Department of Digital Technology, Yurga Technological Institute (branch) of the National Research Tomsk Polytechnic University 26, Leningradskaya st., Yurga, Russia, 652055  
Phone: +7 (384-5) 17-77-64  
Email: demolove7@inbox.ru

УДК [004.6+57.087]:004.056.5

М.В. Еленец, М.М. Немирович-Данченко

## Оконная обработка электроэнцефалографических записей методом Прони

Рассмотрено применение метода Прони для обработки цифровых данных в скользящем окне. Изложены этапы алгоритма, приведены основные уравнения. На модельном примере показаны особенности построения спектров Прони. Особое внимание уделяется биометрическим данным (записи ЭЭГ). Для них обсуждается методика оконной обработки с выделением и визуализацией комплексных корней. Показана и обоснована возможность применения оконной обработки для выявления мысленных коррелятов в записях ЭЭГ. Выделение особенностей на отдельных участках ЭЭГ может иметь существенное значение в проблематике биометрической идентификации.

**Ключевые слова:** спектральные преобразования, метод Прони, спектр, электроэнцефалограмма, оконная обработка, комплексные корни, мысленные корреляты.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-45-50

Цифровая обработка и анализ сигналов находят в последнее время всё более широкое применение. Связь, медицина, построение систем безопасности и многие другие области жизни людей немислимы без цифровых данных, что обуславливает актуальность поиска новых методов обработки таких данных.

Среди методов цифровой обработки можно выделить методы спектрального оценивания (анализа).

Методы спектрального анализа – это широко распространённый подход к цифровой обработке, позволяющий выделять отдельные частоты в спектре измеряемого сигнала [1]. Такие методы оперируют оценками спектральной плотности энергии и иными спектральными параметрами. Спектральный анализ может решать разные задачи. Например, можно использовать метод для обнаружения сигнала, можно с помощью спектрального анализа выделить признаки, несущие информацию об изменении состояния источника сигнала, и пр. [2].

Обработка сигнала подразумевает использование конечной цифровой последовательности. Свойства сигналов априори, как правило, неизвестны, и определение этих свойств на конечном отрезке затрудняется наличием шумов и помех. Поэтому в работе внимание уделено не только выбору и описанию метода, но и параметрам окна обработки. Рассмотрены суть метода моделирования выборочных данных в виде линейной комбинации экспоненциальных функций, известного как метод Прони [1], некоторые особенности применения этого метода, результаты опыта применения и некоторые практические приложения преобразования.

### Метод Прони

Существуют различные инструменты, позволяющие извлекать информацию о частотном составе сигналов. В качестве примера можно привести преобразование Фурье, метод Гильберта–Хуанга, S-преобразование, метод Прони. Теоретический анализ возможностей отдельных методов и сравнение их приводятся, например, в работе [2].

Метод Прони [3] выделяется среди других методов спектрального анализа тем, что является методом поиска модели сигнала на основе минимизации

ошибки моделирования, поэтому в литературе его часто называют методом наименьших квадратов Прони [1, 2]. Это делает его перспективным для ряда исследовательских задач, в том числе – при необходимости обрабатывать небольшие отрезки числовых рядов [1]. Преобразование Прони (ПП) позволяет находить параметры сигнала и строить его спектр. При этом кроме обычных для преобразования Фурье параметров – амплитуд и цифровых частот – на выходе ПП получаются также фазы и коэффициенты затухания.

Рассмотрим суть метода. Основой ПП является разложение функции в ряд, слагаемыми которого являются комплекснозначные экспоненты. Число слагаемых ряда в методе Прони не зависит ни от шага наблюдений, ни от интервала обработки и определяется только значениями ряда.

Допустим, что есть  $n-1$  значений временного ряда  $x(i)$ . Также есть диапазон наблюдаемых данных от 1 до  $N$  и число  $n$  такое, что  $1 \leq n \leq N$  во временном интервале  $T$ . В этом случае будем искать значение  $x(n)$  как сумму из  $p$  слагаемых (эту сумму иногда называют –  $p$ -членной моделью комплексных экспонент [1]):

$$x(n) = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{(n-1)}. \quad (1)$$

Все величины в формуле (1) в общем случае комплексны. Комплексные амплитуды  $h_k$  и комплексные параметры  $z_k$  определяются выражениями:

$$h_k = A_k \exp(j\theta_k), \quad z_k = \exp[(\alpha_k + j2\pi f_k)], \quad (2)$$

где  $A$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $f$  – это амплитуда, фаза (в радианах), затухание (в  $c^{-1}$ ) и частота (в Гц)  $k$ -го слагаемого соответственно.

Для рядов из действительных чисел ряд (1) принимает вид

$$x(n) = \sum_{k=1}^{p/2} 2A_k \exp[\alpha_k(n-1)T] \cos[2\pi f_k(n-1)T + \theta_k]. \quad (3)$$

Ряд в формуле (3) по сравнению с рядом (2) имеет усеченный характер. Членов ряда становится в два раза меньше ( $p/2$  вместо  $p$ ) в силу комплексной сопряженности слагаемых.

С точки зрения вычислительной ПП разбивается на три шага (четвёртый шаг, необязательный в традиционном ПП, – это вычисление спектральной плотности энергии (СПЭ)).

На первом шаге определяются параметры линейного предсказания (подгонка данных). На втором шаге из коэффициентов линейного предсказания формируется полином, корни которого  $z_k$  уже позволяют проводить анализ свойств исследуемого сигнала. В этом смысле второй шаг во многих наших расчётах был последним.

Кроме того, полученные корни однозначно определяют коэффициенты затухания и частоты синусоид для каждого экспоненциального члена.

Наконец, на третьем шаге ищутся значения  $h_k$  как решение системы линейных уравнений. Это даёт оценки амплитуд и фаз синусоид ряда (3).

Рассмотрим эти этапы несколько более подробно, следуя [1].

Уравнение (1) – это прогноз значения  $x(n)$  по сумме из  $p$  значений,  $1 < p < N$ ,  $N$  – общее число значений,  $n$  – текущее значение.

Выпишем сумму квадратов ошибки этого прогноза

$$\rho = \sum_{n=1}^N |\varepsilon[n]|^2, \quad (4)$$

где

$$\varepsilon[n] = x[n] - \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1}.$$

Для решения задачи подгонки параметров оценивания нужно найти минимум квадрата ошибки (4). Это сводится к минимизации сразу по трём параметрам –  $h_k$ ,  $z_k$  и числу  $p$ . Для примера в работе [1] рассмотрена модель с одной экспонентой и показано, что даже в таком простейшем случае поиск минимума (4) сводится к существенно нелинейной задаче.

Вклад Прони в решение этой нелинейной задачи как раз и состоял в том, чтобы заменить нелинейные соотношения (1) такой системой уравнений, в которой значение выборки данных  $x[n]$  линейно зависит от предыдущих  $p$  значений.

Запишем эту линейную зависимость в матричной форме

$$\mathbf{T} \times \mathbf{A} = -\mathbf{X}. \quad (5)$$

Здесь квадратная Тёплицева матрица  $\mathbf{T}$  имеет размерность  $p \times p$ , вектор коэффициентов линейного предсказания  $\mathbf{A}$  имеет размерность  $p \times 1$ , а  $\mathbf{X}$  – наблюдаемые данные  $x_i$  в следующей точке – также  $p \times 1$ .

Приведём для ясности и удобства первые две строки уравнения (5):

$$\begin{pmatrix} x[p] & x[p-1] & \dots & x[1] \\ x[p+1] & x[p] & \dots & x[2] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a[1] \\ a[2] \\ \dots \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x[p+1] \\ x[p+2] \\ \dots \end{pmatrix}.$$

Решение системы (5) доставляет нам числа  $a_i$  – это коэффициенты характеристического многочлена Прони (6). Это и есть первый шаг алгоритма, его первый крупный этап.

На втором шаге ищутся корни полинома, сформированного из чисел  $a_i$ :

$$z^p + a[1]z^{p-1} + a[2]z^{p-2} + \dots + a[p] = 0. \quad (6)$$

По найденным корням  $z_i$  значения частот  $f$  и коэффициентов затуханий  $\alpha$  вычисляются следующим образом:

$$\alpha_i = \ln |z_i| / T, \quad c^{-1}; \quad (7)$$

$$f_i = \arctg[\text{Im}(z_i) / \text{Re}(z_i)] / (2\pi T), \quad \text{Гц}.$$

Здесь и ниже под  $\arctg(y/x)$  подразумевается четырехквadrантная встроенная функция MatLab  $\text{atan2}(y, x)$ , возвращающая значения угла от  $-\pi$  до  $+\pi$ .

После вычисления корней полинома наступает третий этап преобразования Прони. Он заключается в формировании элементов матрицы исходного уравнения (1), при этом используются корни, полученные на втором этапе. Выпишем полученное уравнение в матричной форме:

$$\mathbf{Z} \times \mathbf{H} = \mathbf{X} \quad (8)$$

и приведем первые строки этого уравнения:

$$\begin{pmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_p^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x[1] \\ x[2] \\ \dots \end{pmatrix}.$$

Уравнение (8) решается относительно параметров  $h[1], \dots, h[p]$ . Наконец, амплитуда  $A_i$  и начальная фаза  $\theta_i$  определяются по найденным значениям  $h_i$  по формулам:

$$A_k = |h_k|, \quad \text{y.e.}; \quad (9)$$

$$\theta_k = \arctg[\text{Im}(h_k) / \text{Re}(h_k)], \quad \text{рад}.$$

Итак, формулы (7) и (9) доставляют вычисление искомым параметров метода Прони –  $A$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $f$  – амплитуду, фазу, затухание и частоту каждого слагаемого уравнения (1).

Для данной статьи вычисление корней Прони будет проводиться в MatLab (см., например, алгоритм в [4]). Кроме того, при вычислениях будут использованы программы на языке FORTRAN [1, 5], адаптированные для использования в среде MatLab.

### Построение спектра Прони

Несколько видов возможных спектров Прони может быть определено в зависимости от принятых допущений относительно вида колебаний вне интервала наблюдения (в связи с этим см., например, в [6] понятия мгновенного и текущего спектров). Спектр Прони ниже определяется в терминах экспоненциальной аппроксимации  $\hat{x}[n]$ , а не в терминах исходной временной последовательности  $x[n]$ .

Спектр можно строить, принимая допущение, что сумма экспонент определяется односторонней функцией или двухсторонней функцией. В зависимости от этого будет изменяться результат построения спектра.

При определении модели односторонней функцией спектральная плотность энергии (СПЭ) будет определяться следующим выражением:

$$\hat{S}_1(f) = |T\hat{X}_1(\exp[j2\pi fT])|^2, \tag{10}$$

$$\hat{X}_1(z) = \sum_{k=1}^p \frac{h_k}{1-z_k z^{-1}}.$$

Значения  $f$  здесь определены на интервале частот  $-1/2T \leq f \leq 1/2T$ .

Такой спектр удобен для описания кратковременных сигналов.

При описании модели двусторонней функцией результирующая СПЭ будет иметь вид

$$\hat{S}_2(f) = |\hat{X}_2(f)|^2, \tag{11}$$

где  $\hat{X}_2$  определяется следующим образом:

$$\hat{X}_2(f) = \sum_{k=1}^p h_k \left( \frac{1}{1-z_k z^{-1}} - \frac{1}{1-(z_k^* z)^{-1}} \right),$$

$$z_k = \exp[(\alpha_k T + j2\pi f_k T)], \tag{12}$$

$$(z_k^*)^{-1} = \exp[-(\alpha_k T + j2\pi f_k T)].$$

Автор [1] считает использование двусторонней функции более предпочтительным, так как незатухающая синусоида определяется в нем на бесконечном временном интервале.

**Некоторые преимущества спектра Прони относительно спектра Фурье. Модельный пример**

Спектральные представления используются в широком круге задач [6]. Для многих из них большое значение имеет точность построения спектра.

Одним из преимуществ использования преобразования Прони является более точная картина получаемого спектра, чем при использовании преобразования Фурье.

Это преимущество обусловлено разницей подбора гармоник для этих преобразований.

В преобразовании Фурье гармоники подбираются в зависимости от количества отсчетов и шага обработки. Таким образом, мы имеем набор строго фиксированных частот для построения спектра. Однако переданный для обработки ряд может иметь и частоты, не кратные полученным гармоникам. Так мы теряем при построении спектра часть информации.

В преобразовании Прони гармоники рассчитываются исходя из точек значений переданного для обработки ряда. При таком подходе в спектре учитываются все частоты сигнала и потери информации не происходит.

Эту разницу можно особенно четко проследить на примере функции с очень близкими значениями гармонических составляющих. Чтобы продемонстрировать это, проведем модельный эксперимент в среде Matlab.

Ниже приведены данные, использовавшиеся в MatLab для построения отрезка временного ряда. Ряд составлен из двух затухающих сигналов с близкими частотами.

Число отсчетов формируется следующим образом:  
 $t = 0:1:31 - 32$  отсчета.

Коэффициенты затухания экспонент:

$$\text{att}_1 = -0,1;$$

$$\text{att}_2 = -0,2.$$

Использованы следующие частоты гармонических составляющих:

$$f_1 = 0,51;$$

$$f_2 = 0,56.$$

Было проведено формирование следующего временного ряда:

$$s_1 = \text{att}_1 + j2\pi f_1;$$

$$s_2 = \text{att}_2 + j2\pi f_2;$$

$$y = \exp(s_1 t) + \exp(s_2 t).$$

Вид полученной функции  $y$  изображен на рис. 1.

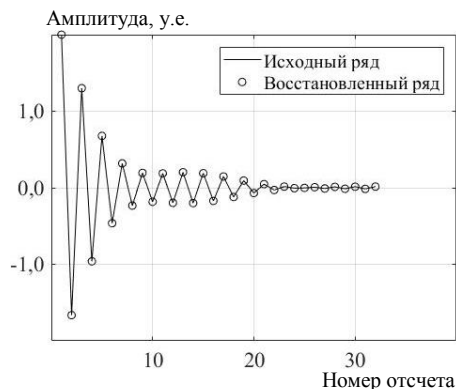


Рис. 1. Модельная кривая

По самому уравнению для  $y(t)$  видно, что колебание формируется двумя слагаемыми –  $\exp(s_1)$  и  $\exp(s_2)$ . Вычисление даёт  $\exp(s_1) = -0,9031 - 0,0568i$ ,  $\exp(s_2) = -0,7612 - 0,3014i$ .

Для этой модельной кривой ПП выполняется при  $p = 2$ , т.е. достаточно двух членов ряда (1) для подгонки параметров (2). Значения корней полинома (6) равны при этом  $-0,9031 - 0,0568i$  и  $-0,7612 - 0,3014i$ , что точно совпадает с входными данными. Для этой же кривой быстрое преобразование Фурье (БПФ) выполняется с получением 32 слагаемых ряда Фурье. На рис. 1 показаны исходный ряд (сплошная линия) и данные, восстановленные методом Прони (маркеры). Среднеквадратичная ошибка составила  $2,0584 \cdot 10^{-11}$ .

Построим спектры Прони и Фурье для модельной функции (рис. 2).

Несмотря на то, что для построения спектра Прони использовались всего два слагаемых – два корня полинома (6), точность спектра Фурье, построенного по 32 слагаемым, хуже по следующим параметрам. Во-первых, частота  $f = 0,51$ , заданная в модельной кривой, определена в точке  $f = 0,5$ , ошибка составляет 20%. Во-вторых, пик второго колебания не локализован, что хорошо видно из рис. 2.

Таким образом, использование преобразования Прони позволяет с большей точностью определять характерные для ряда данные частоты, сохранять на спектре больше деталей, что может быть существенно в задачах анализа и прогноза временных рядов.

В заключение данного раздела заметим, что оба спектра – Фурье и Прони – при построении не нормировались. Кроме того, нужно подчеркнуть, что существуют и активно развиваются специальные методики для того, чтобы повышать разрешающую способность БПФ и других методов получения спектральных оценок [2, 7].

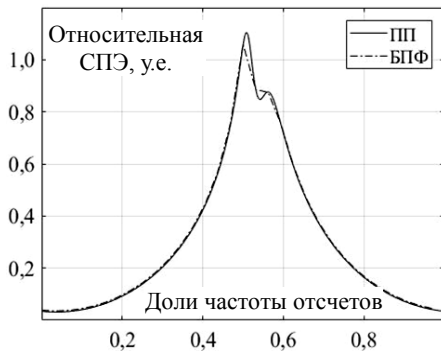


Рис. 2. Спектры Фурье (штрихпунктирная линия) и Прони, построенные для модельной функции

#### Некоторые практические приложения метода Прони для анализа биометрических сигналов

Метод Прони может быть применен для разных целей. В частности, перспективным направлением его приложения может быть анализ биомедицинских сигналов.

В работе [8] авторы используют метод Прони для моделирования эпилептического сигнала ЭЭГ. Авторы используют ПП для вычисления полюсов ЭЭГ-сигнала (корней полинома (6)). Полюсы сигнала записей ЭЭГ на фоне эпилептического припадка используются для моделирования этого расстройства. В случае эпилепсии появляются новые полюса, в то время как другие полюса исчезают по сравнению с нормальным сигналом ЭЭГ. Модель сигнала основана как на расположении полюсов, так и на их количестве.

Качественное моделирование патологических процессов, в том числе на основе ПП, в будущем может помочь их изучению и, соответственно, поиску правильного лечения. В работе [9] на основе модификаций ПП разрабатывается автоматизированная система для комплексной обработки медицинских данных. Такая система позволит обрабатывать лабораторные данные, отражающие состояние определенной системы организма. Правильная обработка таких данных является важной частью диагностики.

Метод Прони можно применять и в анализе сердечных ритмов ЭКГ. Так, авторы статьи [10] демонстрируют применение дискретного преобразования Фурье, вейвлет-преобразования и метода Прони к записям ЭКГ, обозначая результаты применения каждого метода. Из преимуществ преобразования Прони авторы статьи выделяют возможность получения более точных спектральных оценок для коротких последовательностей данных, что находится в хорошем соответствии и с нашими результатами.

Возможно применение метода Прони и для обработки данных в биометрических системах безопасности.

Сейчас ведутся разработки, направленные на создание систем идентификации, использующих в качестве идентификатора ЭЭГ человека или проводящих аутентификацию на ее основе [11–14]. Это делается с целью повышения безопасности систем идентификации, ведь подобные данные нельзя незаметно украсть, подделать и передать на датчики в отсутствие владельца. Одной из задач, которая встает перед исследователями, является уменьшение количества электродов ЭЭГ, требуемого для анализа и верной идентификации. Делается это при помощи исключения каналов, дающих избыточную или неоптимальную информацию. Вот именно в процедуре исключения каналов нам и может быть полезен метод Прони.

Один из вариантов использования метода – выявление мысленных коррелятов ЭЭГ при определенных мыслительных процессах. Для решения этой задачи были взяты данные из базы записей ЭЭГ кафедры высшей нервной деятельности МГУ [15]. На рис. 3 приводятся записи с электрода F3 (левое лобное отведение, система 10–20%) для состояния покоя и мысленного движения правой рукой.

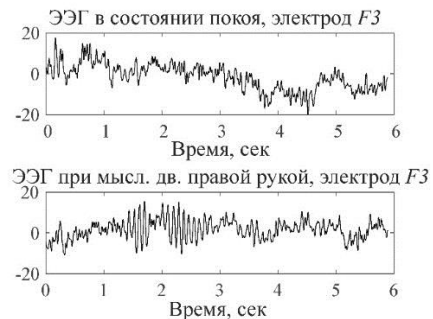


Рис. 3. Записи с электрода F3

Эти записи можно назвать типичными, они не являются исключением. Проанализируем их. На нижней записи хорошо видны участки с выдержанными колебаниями приблизительно одной частоты, соответствующие альфа- или мю-ритмам (8–12 Гц). Это диапазон записи с 1,5 до 3 с. На верхней записи, произведенной в состоянии покоя, таких почти монохромных участков нет.

Здесь под монохромной записью подразумевается наличие одной преобладающей гармоникой. Метод Прони позволяет сразу выявлять значение такой преобладающей частоты. Поэтому обработка велась следующим образом. Все записи обрабатывались, начиная со 2 с, весь диапазон обработки – 0,5 с, ширина окна ПП – 50 точек (0,1 с), перекрытие окон – 0,096 с.

Располагая вычисленные корни Прони внутри единичной окружности для сигналов ЭЭГ, снятых при разных состояниях оператора (пациента), мы получаем разные карты распределения этих корней. При размере окна 50 точек и порядке ПП  $p = 3$  будет

обнаружено два комплексно-сопряжённых корня и один вещественный. Для записи в состоянии мысленного представления движения в окне лежит одно колебание хорошо видимой частоты, близкой к альфа- (или мю-) ритму. Поэтому комплексный корень уравнения (6) будет лежать близко к оси абсцисс почти на единичной окружности. Для записи в состоянии покоя в окне вмещается несколько колебаний разной частоты, превышающей, как правило, частоту альфаритма, тем самым комплексный корень уравнения (6) для этой записи будет расположен дальше от оси абсцисс, но также недалеко от границы единичной окружности. Для записей обоих типов третий корень – вещественный – характеризует затухание отрезка ЭЭГ в окне обработки и всегда лежит на оси абсцисс.

Эти рассуждения иллюстрирует рис. 4, на котором представлено распределение корней для двух сигналов ЭЭГ, снятых с электрода F3: мысленного движения правой рукой и состояния релаксации.

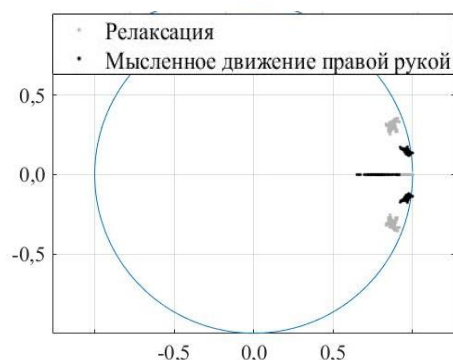


Рис. 4. Распределение корней Прони (черный цвет – мысленное движение правой рукой, серый цвет – релаксация)

Изменение расположения «точек релаксации» и «точек движения» можно объяснить тем, что когда человек расслаблен и не думает о чем-то конкретном, сигналы, считываемые с его мозга, более беспорядочны, нежели при представлении движения. Это объяснение также подтверждается результатами экспериментов, проводимых авторами работы [15].

Получив представление о закономерностях в распределении корней, можно не только выявить определенные мысленные корреляты, но и выяснить, данные с каких электродов наименее подвержены влиянию таких коррелятов. На таких электродах картина распределения корней Прони не должна (или почти не должна) меняться от действия к действию. Данные с таких электродов и могут быть использованы в задачах идентификации, так как будут нести индивидуальные черты человека, но при этом будут менее подвержены влиянию случайных искажений при, например, случайных движениях [11].

#### Выводы

В ходе работы для обработки цифровых данных было применено преобразование Прони. Выписаны основные этапы выполнения метода Прони, включая построение спектров. Для модельного сигнала спектр Прони сравнивался со спектром Фурье. Применение ПП продемонстрировало большую точность вычисления спектральной оценки для модельного сигнала.

Дальнейшие результаты работы были основаны на использовании базы биометрических записей МГУ и сравнении результатов оконного ПП для записей ЭЭГ в состоянии покоя и записей ЭЭГ в состоянии мысленного движения. Показана принципиальная различимость таких записей ЭЭГ с использованием метода Прони в части вычисления корней полиномов. Полученные результаты могут оказаться существенными для построения систем идентификации личности.

#### Литература

1. Marple S. Digital Spectral Analysis with Applications. – New Jersey: Prentice Hall, 1987. – 584 p.
2. Kay S.M. Spectrum analysis—A modern perspective / S.M. Kay, S.L. Marple // Proceedings of the IEEE. – 1981. – Vol. 69, No. 11. – P. 1380–1419.
3. Prony R. Essai expérimental et analytique: Sur les lois de la Dilatabilité des fluides élastiques et sur celles de la Force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alkool, à différentes températures // Journal de l'École Polytechnique Floréal et Plairial. – 3(1795). – Vol. 1, No 22. – P. 24–79.
4. Coding Prony's method in Matlab and applying it to biomedical signal filtering / A.F. Rodríguez, L. de Santiago Rodrigo, E.L. Guillén, J.R. Ascariz, J.M. Jiménez, L. Boquete // BMC bioinformatics. – 2018. – No. 19(1). – P. 1–14.
5. Marple S. Spectral line analysis via a fast Prony algorithm // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1982. – P. 1375–1378.
6. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. – 236 с.
7. Князев Б.А., Черкасский В.С. Дискретное преобразование Фурье – как это делается // Вестник НГУ. Сер.: Физика. – 2008. – Т. 3, вып. 4. – С. 74–86.
8. Elsayed O.A. Modeling of Epilepsy EEG Signal using Prony's Method / O.A. Elsayed, A. Eldeib, F.M. Elhefnawi // International Journal of Simulation: Systems. – 2012. – No. 13(6). – P. 32–35.
9. Анистратенко О.Ю. Автоматизированная система для комплексной обработки клиничко-лабораторных данных с помощью модифицированного метода Прони / О.Ю. Анистратенко, Б.Н. Варавва // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 2(9). – С. 5–8.
10. Применение вейвлет-преобразования и метода Прони для идентификации биогенных сигналов / А.В. Колмейцева, Г.В. Мишугова, А.П. Мул, Г.Ю. Рябых // Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 10, № 4(47). – С. 455–465.
11. Moctezuma L.A. Towards a minimal EEG channel array for a biometric system using resting-state and a genetic algorithm for channel selection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.nature.com/articles/s41598-020-72051-1?error=cookies\\_not\\_supported&code=7d4b016f-5920-4dca-ac45-bd6816570d14](https://www.nature.com/articles/s41598-020-72051-1?error=cookies_not_supported&code=7d4b016f-5920-4dca-ac45-bd6816570d14), свободный (дата обращения: 10.04.2021).
12. Person Identification by Using AR Model for EEG Signals / G. Mohammadi, P. Shoushtari, A.B. Molaei, M.B. Shamsollahi // Proceedings of World Academy of science, engineering and technology. – 2006. – Vol. 11, No. 3. – P. 281–285.
13. Armstrong B.C Assessing the uniqueness, collectability, and permanence of a novel method for ERP biometrics // Neurocomputing. – 2015. – Vol. 156. – P. 59–67.
14. Marcel S. Person Authentication Using Brainwaves (EEG) and Maximum A Posteriori Model Adaptation / S. Marcel, J.D.R. Millan // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2007. – No. 29 (4). – P. 743–752.

15. Научные ресурсы: каф. высшей нервной деятельности МГУ им. Ломоносова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.neurobiology.ru/doc/index.php?ID=78>, свободный (дата обращения: 12.04.2021).

16. Motor execution reduces EEG signals complexity: Recurrence quantification analysis study / E. Pitsik, N. Frolov, V. Grubov, V. Maksimenko, J. Kurths, A. Hramov // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. – 2020. – Vol. 30, No. 2. – P. 1–13.

#### Еленец Мария Владимировна

Студентка каф. безопасности информационных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-281-47-28  
Эл. почта: marichka.elenetz@mail.ru

#### Немирович-Данченко Михаил Михайлович

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРА Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-906-199-99-95  
Эл. почта: michnd@mail.ru

Elenetz M.V., Nemirovich-Danchenko M.M.

#### Window Processing of EEG Records by the Prony's Method

The paper considers the application of the Prony analysis for processing digital data in a sliding window. The stages of the algorithm are stated; the basic equations are given. On a model example, the features of constructing the Prony spectra are shown. Particular attention is paid to biometric data (EEG recordings). For them, the method of windowing with the extraction and visualization of complex roots is discussed. The possibility of using window processing to identify mental correlates in EEG records is shown and substantiated. Isolation of features in individual sections of the EEG can be of significant importance in the problems of biometric identification.

**Keywords:** analysis of biometrics, Prony's method, electroencephalogram, Fourier spectrum, Prony's spectrum, mental correlates.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-45-50

#### References

1. Marple S. *Digital Spectral Analysis with Applications*. New Jersey, Prentice Hall, 1987, 584 p.
2. Kay S.M., Marple S.L. Spectrum analysis—A modern perspective. *Proceedings of the IEEE*, 1981, vol. 69, no. 11, pp. 1380–1419.
3. Prony R. Essai expérimental et analytique: Sur les lois de la Dilatabilité des fluides élastiques et sur celles de la Force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alcool, à différentes températures. *Journal de l'École Polytechnique Floréal et Plairial*, 1795, vol. 1, no. 22, pp. 24–79.
4. Rodríguez A.F., Santiago Rodrigo L, Guillén E.L., Ascariz J.R., Jiménez J.M., Boquete L. Coding Prony's method in Matlab and applying it to biomedical signal filtering. *BMC bioinformatics*, 2018, no. 19(1), pp.1–14.
5. Marple S. Spectral line analysis via a fast Prony algorithm. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1982, pp. 1375–1378.
6. Harkevich A.A. *Spektry i analiz*. [Spectra and analyses] Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1957, 236 p. (in Russ.).
7. Knyazev B.A., Cherkasskij V.S. Diskretnoe preobrazovanie Furie – kak eto delaetsya [Discrete Fourier Transforms –

How it is Implemented]. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 74–86 (in Russ.).

8. Osama A.E., Eldeib A., Elhefnawi F.M. Modeling of Epilepsy EEG Signal using Prony's Method. *International Journal of Simulation: Systems*, 2012, no. 3 (6), pp. 32–35.

9. Anistratenko O.YU., Varava B.N. Avtomatizirovannaya sistema dlya kompleksnoy obrabotki kliniko-laboratornykh dannykh s pomoshchyu modifitsirovannogo metoda Proni [Automated System for Complex Processing of Clinical Laboratory Data Using Modified Prony's Method], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2006, no. 2(9), pp. 5–8 (in Russ.).

10. Kolomejceva A.V., Mishugova G.V., Mul A.P., Rya-byh G.YU. Primenenie veyvlet-preobrazovaniya i metoda Proni dlya identifikatsii biogennykh signalov [Application of Wavelet Transform and Prony's Method to Identify Biogeneous Signals]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 10, no. 4 (47), pp. 455–465 (in Russ.).

11. Moctezuma L.A. Molinas M. Towards a minimal EEG chan-nel array for a biometric system using resting-state and a genetic algorithm for channel selection. Available at: [https://www.nature.com/articles/s41598-020-72051-1?error=cookies\\_not\\_supported&code=7d4b016f-5920-4dca-ac45-bd6816570d14](https://www.nature.com/articles/s41598-020-72051-1?error=cookies_not_supported&code=7d4b016f-5920-4dca-ac45-bd6816570d14), free. (Accessed: April 10, 2021).

12. Mohammadi G., Shoushtari P., Molaei A.B., Shamsollahi M.B. Person Identification by Using AR Model for EEG Signals. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006, vol. 11, no. 3, pp. 281–285.

13. Armstrong B.C Assessing the uniqueness, collectability, and permanence of a novel method for ERP biometrics. *Neurocomputing*, 2015, vol. 156, pp. 59–67.

14. Marcel S., Millan Person Authentication J.D.R Using Brainwaves (EEG) and Maximum A Posteriori Model Adaptation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, no. 29(4), pp. 743–752.

15. [Scientific resources – Department of Higher Nervous Activity, Lomonosov Moscow State University]. Available at: <http://www.neurobiology.ru/doc/index.php?ID=78>, free. (Accessed: April 12, 2021) (in Russ.).

16. Pitsik E., Frolov N., Grubov V., Maksimenko V., Kurths J., Hramov A. Motor execution reduces EEG signals complexity: Recurrence quantification analysis study. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2020, vol. 30, no. 2, pp. 1–13.

#### Maria V. Elenetz

Student, Department of Information System Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-281-47-28  
Email: marichka.elenetz@mail.ru

#### Mikhail M. Nemirovich-Danchenko,

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Department of Complex Information Security of Computer Systems, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4510-8045>  
Phone: +7-906-199-99-95  
Email: michnd@mail.ru

УДК 531.768:612.766

М.Ю. Катаев, Н.Г. Катаева, Р.А. Чернов

## Оценка параметров ходьбы человека с помощью двух акселерометров

Решение задачи оценки параметров ходьбы человека при использовании нескольких акселерометров, закрепленных на теле человека, является основой данной статьи. Приводится решение, которое позволяет получать корректные данные о пространственном перемещении конечности человека во времени и пространстве. Такой подход, по мнению авторов, может быть использован для диагностики состояния опорно-двигательного аппарата человека.

**Ключевые слова:** датчик, акселерометр, походка человека, методика.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-51-55

Наблюдение за движением человека и использованием этого в различных целях (медицина, война и др.) выполняется уже не одну тысячу лет [1]. В настоящее время наблюдение становится цифровым и позволяет выполнять измерение и анализ двигательных функций человека в разных направлениях: медицина, спорт, военная подготовка, автомобилестроение и др. Цифровые формы измерений позволяют в настоящее время оценивать характеристики движения тела человека не только во фронтальном, сагиттальном, но и в трехмерном пространстве. Один из самых популярных подходов связан с использованием компьютерного зрения и алгоритмов обработки изображений. Кроме плюсов, для каждого изображения есть и недостатки, связанные с условиями измерений: сцена, освещенность, тени и др.

Большинство методик нацелено на применение маркеров на теле человека, для обработки данных изображений при этом требуется дорогостоящее аппаратное обеспечение (видеокамеры, вычислительная техника). Кроме того, для изображения четко определенной является сцена, имеющая небольшой размер, позволяющая фиксировать лишь несколько шагов. Возможны и варианты использования более простых подходов обработки и дешевых камер, например, как в работе [2]. Однако все же изображение является проекцией трехмерного мира и лишь частично, в виде некоторой модели отражает изменение положения тела человека в пространстве.

В последнее время технические характеристики устройств измерения (точность, надежность, минимальный размер и др.) положения тела человека в пространстве значительно улучшились, что дает возможность использовать их в практических работах медицины, спорта и т.д. Одним из таких устройств является смартфон и его уже штатный элемент – акселерометр. Применение акселерометров в медицине является важным, так как позволяет выполнять оценку параметров движения человека в пространстве и времени. Активно эти устройства применяются и в спортивных датчиках, которые позволяют определять число и темп шагов. Отметим, что большинство исследований основывается на обработке данных одного акселерометра.

Цель данной работы заключается в проектировании и реализации программно-аппаратного комплекса для сбора, обработки и анализа данных о ходьбе человека, полученных при помощи двух акселерометров.

### Ходьба человека

Ходьба человека – это циклическое перемещение ног человека с решением задачи равновесия. При таком перемещении каждая нога проходит несколько фаз движения, связанных с отталкиванием ноги от поверхности, переносом ноги в воздухе и касанием ноги поверхности. Надо заметить, что при ходьбе человека его тело смещается вверх, вниз с в такт движения и при этом одна из ног всегда связана с поверхностью. Упор на поверхность выполняется то на одну ногу, то на обе ноги в момент переноса тела. Характеристикой движения являются время и длина шага правой и левой ногой, а также двойной шаг, равный сумме длин шагов правой и левой ногой. Каждый шаг правой и левой ногой состоит из заднего и переднего. Задний шаг – это та часть шага, когда нога находится сзади линии, проходящей перпендикулярно к поверхности через тело человека, а передний шаг наоборот, когда нога расположена впереди. В процессе движения шаг правой, левой ногой, а также двойной шаг характеризуют движение человека через такие параметры, как симметричность, ритмичность и др.

Для того чтобы находить параметры походки человека, типично восстанавливают такую характеристику, как центр масс (ЦМ) тела. Изучением поведения ЦМ можно вычислить длину каждого шага, двойного шага и на этой основе скорость перемещения и ритмичность [3]. Определение длины шага связано с пониманием базы опоры, т.е. расстояния от одной пятки до другой, при этом, кривая ЦМ принимает либо максимальные или минимальные значения. В принципе время на отталкивание может показать стиль ходьбы, что важно для различных диагностических задач. Важным для человека является ритмичность походки, когда сравнивается время переноса правой или левой ноги в разных фазах движения, а также для двойного шага. Например, у здорового человека ритмичность близка к единице, а



у человека с заболеваниями может быть меньше, что опять является важным для диагностики параметром. Такая характеристика, как скорость ходьбы, показывает, сколько сделал человек шагов за определенный промежуток времени. Заметим, что характеристики походки существенно зависят от массы тела, высоты и формы фигуры человека.

#### Акселерометр

Акселерометр – это устройство, позволяющее измерять проекцию кажущегося ускорения или разности между истинным ускорением некоторой массы, расположенной в устройстве, и гравитационным ускорением. При перемещении человека возникают отклонения массы от исходного положения, что и является основой для оценки величины ускорения. Существует несколько видов акселерометров: однокомпонентные, двухкомпонентные и трехкомпонентные, что позволяет измерять ускорение вдоль одной, двух или трех осей  $\{XYZ\}$ . Отдельные акселерометры содержат в себе системы сбора, обработки и передачи данных.

Параметры, по которым можно подбирать акселерометры: 1) масштабный коэффициент, являющийся пропорциональным измеряемым ускорением и выходным сигналом; 2) пороговая чувствительность – определяет минимальную величину измеряемого ускорения; 3) смещение нуля показывает величину ускорения в состоянии покоя прибора; 4) случайное блуждание – это среднеквадратичное отклонение ускорения от нуля и 5) нелинейность – показывает зависимость между выходным сигналом и ускорением [4].

Измерение угла наклона тела человека акселерометром при ходьбе основано на измерении проекции вектора силы тяжести на ось измерения. Акселерометр чувствителен не только к действию ускорения свободного падения, но и ускорения, вращения или вибрации [5, 6]. За счет того, что эти ускорения также воздействуют на оси датчиков акселерометра, они искажают действие ускорения свободного падения, что приводит к зашумлению измерений.

Единицами измерения акселерометра являются три ускорения по осям  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ , которые позволяют построить общее ускорение  $A$ :

$$A(k) = \sqrt{\{A_x^2(k) + A_y^2(k) + A_z^2(k)\}}. \quad (1)$$

#### Разрабатываемое устройство

Для работы выбран трехосный акселерометр MPU6050 [https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/], который возвращает данные по осям  $\{XYZ\}$ . Данный акселерометр позволяет считывать ускорения в трех проекциях на оси  $\{XYZ\}$ . Это дает возможность определять перемещение прибора, закрепленного на человеке: углы крена, дифферента (тангажа) по таким параметрам, как вектор силы тяжести и скорость вращения. При движении человека можно таким устройством определять линейное ускорение и угловую скорость по трем осям.

В устройстве MPU6050 расположено два устройства: акселерометр и гироскоп. После считывания, предварительной обработки результаты передаются по последовательному интерфейсу I2C в микроконтроллер. Получаемые данные измеряются в величинах LSB (Least Significant Bit или наименьший значащий бит), которая зависит от уровня измеряемого сигнала. Так как ходьба – это направленное движение во времени и пространстве, то измеряемые данные переводятся в ускорение ( $m/c^2$ ) [7]. В текущей аппаратной части для продуктивной обработки данных и получения истинной картины используется чувствительность  $\pm 2g$ , где  $g$  – ускорение свободного падения.

Для нахождения ускорения по оси  $X$  используется преобразование  $gX = \text{accelX}/16384.00$ , где  $\text{accelX}$  – наименьший значащий бит на оси  $X$ . Значение LSB находится в диапазоне от  $-32\,768$  до  $+32\,768$  бит. После преобразования получаем ускорение от  $-2,00$  до  $+2,00$   $m/c^2$ .

Для разработки аппаратной части была выбрана платформа Arduino, которая представляет собой открытую платформу, способную соединять в едином интерфейсе разные электронные устройства. Соединенными через Arduino устройствами можно управлять или использовать их автономно. Платформа состоит из аппаратной и программной частей, которые позволяют работать с разнообразными устройствами. Для программирования используется версия языка программирования C++ под названием Wiring. Arduino Uno это микроконтроллер на базе процессора Atmega328. Платформа содержит 14 цифровых входов и выходов (6 из которых могут использоваться как выходы широтно-импульсной модуляции), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки.

Чип ESP8266 представляет собой мини-микроконтроллер с WiFi-передатчиком, который может работать независимо от платформы, т.е. автономно, без подключения к плате Arduino. Для передачи информации о температуре и влажности применяется модуль ESP-01. Чип ESP8266 позволяет управлять устройством удаленно и пересылать результаты через интернет. Устройство можно подключать к социальным сетям и реагировать на данные, которые передаются через API от веб-сервисов. Микроконтроллер имеет 2 аналоговых выхода, что позволяет подключить без дополнительных доработок датчики типа MPU по разным адресам. На рис. 1 показана схема подключения аппаратной части.

На рис. 2 показан один из вариантов крепления устройства на теле человека. Таких вариантов может быть много, например, такие пары, как (стопа–колени), (колени–бедро), (пояс–грудь), (голова–грудь) и т.д. Эти комбинации датчиков позволяют оценить перемещение фигуры человека в пространстве с высокой точностью, быть калибровочными значениями для методов технического зрения [8] и др.

Источник питания

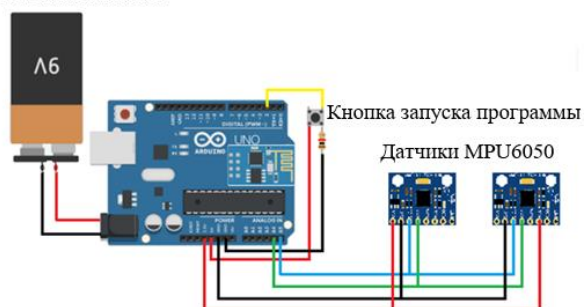


Рис. 1. Схема подключения аппаратной части



Рис. 2. Один из вариантов крепления устройства на теле человека

### Полученные результаты

На основе вышепредставленных устройств был разработан программно-технический комплекс, который в действии показан на рис. 2. Для взаимодействия датчиков с устройством накопления информации было написано клиент-серверное приложение, позволяющее последовательно опрашивать датчики с высокой частотой. При таком варианте измеряемые сигналы являются зашумленными, что требует применения методики сглаживания, представленной формулой (5) [9]. Полученные результаты анализировались отдельно на более мощном компьютере.

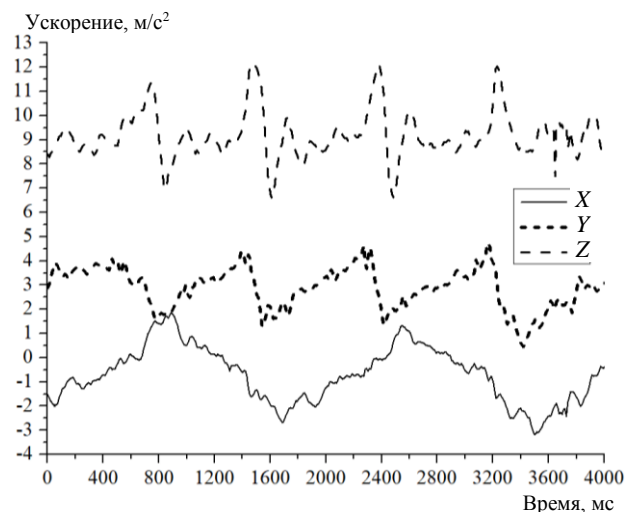


Рис. 3. Измеренные ускорения акселерометром по трем осям

Результаты измерения ускорения, при движении человека по трем осям (X, Y, Z), получаемые с одного акселерометра, показаны на рис. 3.

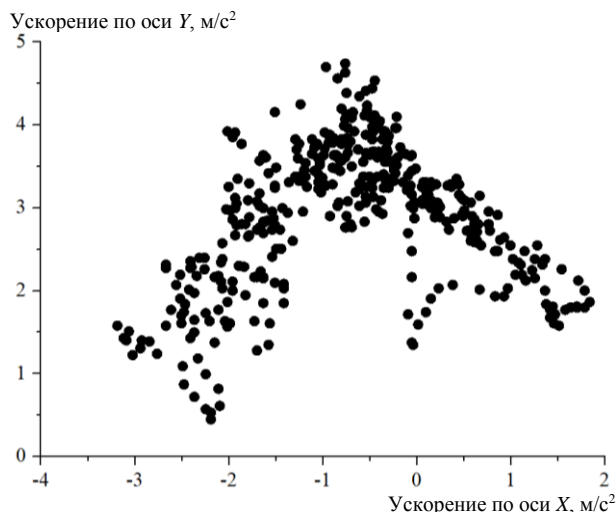


Рис. 4. Совместное представление измерений ускорения акселерометром в плоскости X и Y

Из рис. 3 видно, что кривая, показывающая ускорение по оси X, отражает общее перемещение корпуса за время движения (два двойных шага), кривые по осям Y и Z показывают число шагов (2 шага правой и 2 шага левой ногой) и стиль движения человека [10, 11].

Интересным является совместное представление измерений ускорения акселерометром в плоскости X и Y (рис. 4) [12]. Хорошо видно, что при движении не наблюдается симметрии перемещения фигуры человека и перемещение более регулярное для одной ноги, чем для другой (при движении корпус заваливается в одну сторону).

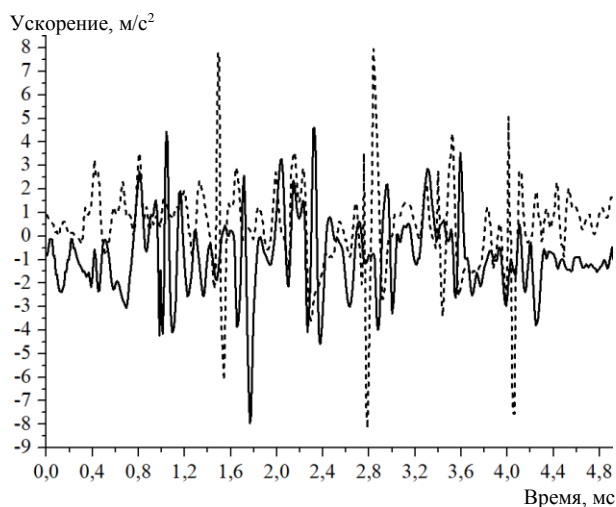


Рис. 5. Сравнение ускорений по оси X для правого (сплошная кривая) и левого колена (пунктирная кривая) в процессе движения

На рис. 5 показано сравнение движения человека при установке акселерометров на правое и левое колено. Видно, что движения, выполняемые левой ногой, более регулярные, чем правой, и это

подтверждает выводы, полученные при анализе информации, представленной на рис. 4.

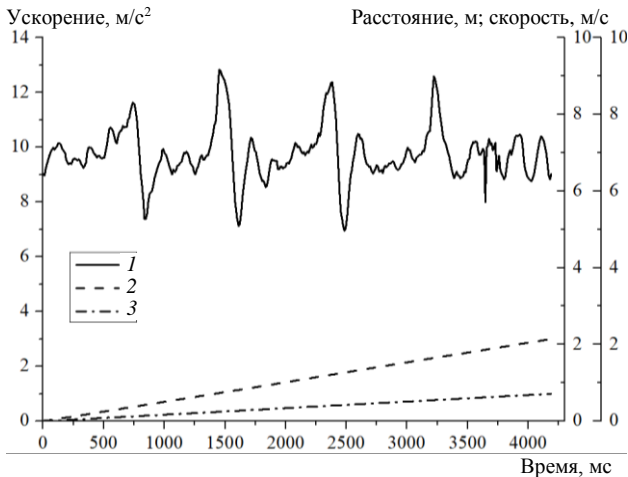


Рис. 6. Оценка ускорения (1), пройденного расстояния (2) и скорости (3) в процессе движения

На рис. 6 показаны результаты оценки скорости и расстояния, пройденного в процессе движения. Скорость движения составила 1,15 м/с, а пройденное расстояние 3,2 м, что составляет средний размер шага 0,8 м при 4 сделанных шагах, и это является типичным для движения человека [11].

#### Заключение

В ходе выполнения данной работы получены следующие результаты: разработаны структура и программная часть клиент-серверного приложения [13], в котором реализованы алгоритмы сбора, хранения и минимальной обработки данных о ходьбе человека. Анализ результатов измерения позволил найти устойчивый алгоритм сглаживания шумовой составляющей. Итоговая версия сборки аппаратной и программной части [14] позволила собрать и обработать данные о ходьбе человека. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что получена достоверная информация об изменении положения в пространстве частей фигуры человека, связанных с положением акселерометров.

Особенностью конкретной сборки (устройства) является применение двух датчиков акселерометров, что позволяет проводить одновременный сравнительный анализ перемещения двух точек фигуры человека [15]. Для полноценного анализа нарушений в процессах ходьбы и опорно-двигательной системы человека необходимо провести масштабный сбор данных о ходьбе человека у больных и здоровых людей. Это позволит улучшить разработанное устройство, а дальнейшим расширением возможностей является пространственная модель, объединяющая результаты двух (или более) датчиков в виде скелетной модели.

#### Литература

1. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений. – Иваново: Изд-во НППЦ «Стимул», 1996. – 344 с.
2. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. – М.: Наука, 1990. – 496 с.

3. Деревцова С.Н. Инструментальный метод исследования параметров ходьбы людей старших возрастных групп разных соматотипов // ВНМТ. – 2010. – № 2. – С. 181–185.

4. Винниченко Н.Т. Теория гироскопических приборов / Н.Т. Винниченко, Д.А. Кацай, А.А. Лысова. – Челябинск: ЮурГУ, 2010. – 141 с.

5. Греченева А.В. Акселерометрический метод измерения суставных перемещений / А.В. Греченева, О.Р. Кузичкин, Н.В. Дорофеев // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 1. – С. 51–54.

6. Васильев К.К. Методы обработки сигналов. – Ульяновск, 2001. – 80 с.

7. Ижболдина В.В. Анализ траектории движения конечности на основе данных с микромеханических датчиков / В.В. Ижболдина, В.Ю. Будков, А.В. Денисов // Научный результат. Информационные технологии. – 2018. – Т. 3, № 4. – С. 48–61.

8. Кашуба В. Современные оптикоэлектронные методы измерения и анализа двигательных действий спортсменов высокой квалификации / В. Кашуба, И. Хмельницкая // Наука в олимпийском спорте. – 2005. – № 2. – С. 138–140.

9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

10. Катаев М.Ю. Методика учета угла направления движения человека при изучении параметров походки по видеопоследовательности / М.Ю. Катаев, Е.В. Рудова // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 109–113.

11. Катаев М.Ю. Численный метод и алгоритм определения центра тяжести движущегося человека из анализа потока изображений / М.Ю. Катаев, С.Г. Катаев // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 201–205.

12. Clarke N.L. Authentication of users on mobile telephones. A survey of attitudes and practices / N.L. Clarke, S.M. Furnell // Comput. Secur. – 2005. – Vol. 24. – P. 519–527.

13. Sprager S. Inertial sensor-based gait recognition: A review / S. Sprager, M.B. Juric // Sensors. – 2015. – Vol. 15. – P. 22089–22127.

14. Pan G. Accelerometer-based gait recognition via voting by signature points / G. Pan, Y. Zhang, Z. Wu // Electron. Lett. – 2009. – Vol. 45. – P. 1116–1118.

15. Hoang T. Adaptive Cross-Device Gait Recognition Using a Mobile Accelerometer / T. Hoang, T.D. Nguyen, C. Luong, S. Do // J. Inf. Proc. Syst. – 2013. – Vol. 9. – P. 333–345.

#### Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

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

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85

Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

#### Катаева Надежда Григорьевна

Д-р мед. наук, профессор каф. неврологии и нейрохирургии Сибирского государственного медицинского университета (СибГМУ)

Московский тракт, 2, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 90-11-01

Эл. почта: nadi51@yandex.ru

**Чернов Руслан Андреевич**

Студент каф. АСУ ТУСУРа

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

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36

Эл. почта: chernruslan@gmail.com

Kataev M.Yu., Kataeva N.G., Chernov R.A.

**Assessment of Human Walking Parameters with Two Accelerometers**

Movement is an integral part of a human activity. Maintaining human's health or doing sports, for example, requires an accurate assessment of a person's physical activity, and especially the way the person moves (gait). The natural age-related changes or diseases cause a disfunction of the musculoskeletal system, and limits human movement. Traditionally, the medical diagnostics consists in examination of a person in a static position or with a minimum level of movement. This article proposes a solution to the problem of assessing the parameters of a person's walking using several accelerometers fixed on the human body. This solution allows obtaining correct data on a human limb movement in time and space. The authors believe that this approach can be used to diagnose the state of the human musculoskeletal system.

**Keywords:** sensor, accelerometer, human gait, technique.**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-51-55*References*

1. Skvortsov D.V. [Clinical analysis of movements]. Ivanovo, Publishing house of SPC, Stimul, 1996, 344 p. (in Russ.).
2. Bernshtein N.A. [Physiology of movements and activity]. Moscow, Nauka, 1990. 496 p. (In Russ.).
3. Derevtsova S.N. An instrumental method for studying the walking parameters of people of older age groups of different somatotypes *VNMT*, 2010, no. 2, pp.181–185 (in Russ.).
4. Vinnichenko N.T., Katsai D.A. [Theory of gyroscopic devices]. Chelyabinsk, YuurGu, 2010, 141 p. (in Russ.).
5. Grecheneva A.V., Kuzichkin O.R., Dorofeev N.V. [Accelerometric method for measuring joint movements]. *Mechanical engineering and life safety*, 2015, no. 1, pp. 51–54 (in Russ.).
6. Vasiliev K.K. [Signal processing methods]. Ulyanovsk, 2001, 80 p. (in Russ.).
7. Izhboldina V.V., Budkov V.Yu., Denisov A.V. [Analysis of the trajectory of movement of the limb based on data from micromechanical sensors]. *Scientific result. Information Technology*, 2018, vol. 3, no. 4, pp.48–61 (in Russ.).
8. Kashuba V., Khmel'nitskaya I. [Modern optoelectronic methods for measuring and analyzing motor actions of highly

qualified athletes]. *Science in Olympic sport*, 2005, no. 2, pp. 138–140 (in Russ.).

9. Sergienko A.B. [Digital signal processing]. SPb., BHV-Petersburg, 2011, 768 p. (in Russ.).

10. Kataev M.Yu., Rudova E.V. [Methodology for taking into account the angle of direction of a person's movement when studying gait parameters by video sequence]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 109–113 (in Russ.).

11. Kataev M.Yu., Kataev S.G. Numerical method and algorithm for determining the center of gravity of a moving person from the analysis of the flow of images. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2 (24), part 3, pp. 201–205 (in Russ.).

12. Clarke N.L., Furnell S.M. Authentication of users on mobile telephones. A survey of attitudes and practices. *Comput. Secur.*, 2005, vol. 24, pp. 519–527

13. Sprager S., Juric M.B. Inertial sensor-based gait recognition: A review. *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 22089–22127.

14. Pan G., Zhang Y., Wu Z. Accelerometer-based gait recognition via voting by signature points. *Electron. Lett.*, 2009, vol. 45, pp. 1116–1118.

15. Hoang T., Nguyen T.D., Luong C., Do S. Adaptive Cross-Device Gait Recognition Using a Mobile Accelerometer. *J. Inf. Proc. Syst.* 2013, vol. 9, pp. 333–345.

**Mikhail Yu. Kataev**

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of 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, +7-960-975-27-85

Email: kmy@asu.tusur.ru

**Nadezhda G. Kataeva**

Doctor of Science in Medicine, Professor, Department of Neurology and Neurosurgery, Siberian State Medical University

2, Moscovsky tract, Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7 (382-2) 90-11-01

Email: nadi51@yandex.ru

**Ruslan A. Chernov**

Student, Department of Automated Control Systems, TUSUR

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7 (382-2) 70-15-36

Email: chernruslan@gmail.com

УДК 681.536:697.97

Нгуен Ван Вьонг, А.А. Шилин, В.Г. Букреев, Ф.В. Перовщиков, А.А. Брянцев

## Определение параметров ПИ-регулятора системы управления сложным технологическим объектом в режиме реального времени

Рассматривается методика вычисления в режиме реального времени параметров ПИ-регуляторов системы управления сложным объектом – сушильной установкой пиломатериалов. Алгоритм коррекции параметров регуляторов в проблемных режимах работы сушильной установки основан на интерполяции многочленом Лагранжа известных статистических данных. Показано, что разработанная на программируемом логическом контроллере (ПЛК) система управления обеспечивает регулирование температуры и влажности в объеме установки и ее стабильную работу при изменении режимов сушки материалов.

**Ключевые слова:** сушильная установка, линеаризованная модель, перенастраиваемый ПИ-регулятор, интерполяция Лагранжа.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-56-63

В настоящее время для промышленной сушки материалов широко используется конденсационный метод осушения [1, 2]. Наиболее эффективный вариант реализации такого метода предполагает использование холодной панели, поддерживающей температуру воздуха в сушильной установке на уровне температуры точки росы для конденсации и утилизации жидкости из высушиваемого материала. Помимо этого, используется нагреватель, который устанавливает оптимальную рабочую температуру процесса осушения [3]. Структурная схема объекта управления, использующего такой способ сушки материалов, представлена на рис. 1.

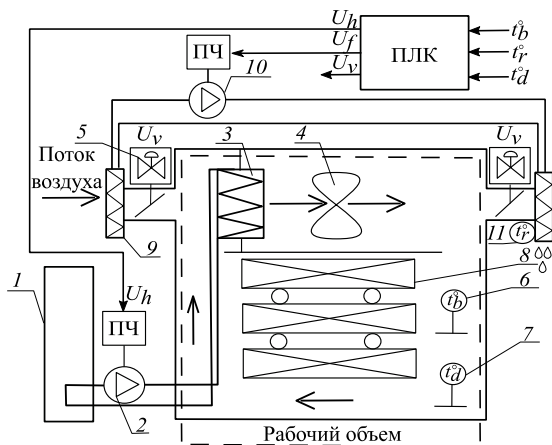


Рис. 1. Структурная схема сушильной установки

На рис. 1 представлены следующие элементы: источником тепла для сушки материалов является газовый котёл 1, при этом тепловой режим в рабочем объеме установки регулируется частотным электроприводом циркуляционного насоса 2. Насос обеспечивает перемещение теплоносителя между котлом 1 и воздушным калорифером 3, который обдувается потоком воздуха с помощью вентилятора 4. Управление влажностью в установке обеспечивается управляемыми воздушными клапанами 5. Оценка влажности в рабочем объеме производится по психометрической разности температур, получаемой с «мокрого»

датчика 6 температуры и «сухого» датчика 7. Подвергающийся процессу осушения пиломатериал 8 уложен соответствующим образом для хорошего проветривания. Жидкость выделяется на конденсационной панели 9 из циркулируемого воздуха в рабочем объеме установки. Тепловой режим этой панели регулируется за счет работы соответствующего циркуляционного насоса 10. В конечном итоге она приобретает температуру, близкую к температуре точки росы, которая измеряется датчиком температуры 11.

Для регулирования процесса осушения материала используется четырехконтурная система управления нагревом и скоростью потока воздуха [4, 5]. При этом следует учитывать, что физические процессы исследуемого объекта весьма сложны для аналитического описания, так как такой подход требует применения совокупности методов теории тепломассообмена, термодинамики и уравнений в частных производных [6–9]. Этот факт значительно усложняет процесс составления математической модели и реализации законов управления на микроконтроллере.

Поэтому актуальными задачами являются построение математической модели, опирающейся на статистические данные работы сушильной установки, и организация перенастраиваемого регулятора в режиме реального времени. Такой подход может быть универсальным для различных конфигураций сушильных аппаратов, в том числе и без аккумулирования жидкости на холодной панели, а также многоконтурных систем управления в целом.

### Построение математической модели системы управления сушильной установкой

Получение математической модели без детального описания физических процессов, происходящих в ней, возможно методами вычислительной математики. Таковыми являются способы интерполяции и аппроксимации экспериментальных данных. Стоит отметить то, что второй метод является вычислительно затратным и слабо реализуемым на МК из-за большого количества вычислений, которые образуются при использовании рекуррентных соотношений.

В качестве рационального решения предлагается рассмотреть задачу интерполяции многочленом Лагранжа [10, 11]. Для двухканального управления многочлен имеет следующий вид:

$$L(U_f, U_h) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M z_{nm} l_{nm}(U_f, U_h), \quad (1)$$

где  $N, M$  – количество узлов интерполяции;  $z_{nm}$  – значения температур в рабочем объеме или на конденсационной панели, соответствующие узлу  $(n, m)$ ;  $l_{nm}(U_f, U_h)$  – базисные функции;  $U_f, U_h$  – воздействия, управляющие вентилятором и нагревателем сушильной установки. Их значения нормированы относительно номинальных параметров объекта управления.

Базисные полиномы определяются следующим выражением:

$$l_{nm}(U_f, U_h) = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \frac{(U_f - U_{fi})(U_h - U_{hj})}{(U_{fn} - U_{fj})(U_{hm} - U_{hj})}, \quad (2)$$

где  $U_{fi}, U_{hj}$  – значения управления вентилятором и нагревателем в статическом режиме, соответствующие узлу  $(i, j)$ .

Если сетка, состоящая из значений задания, заранее известна, то базисные полиномы могут быть предварительно вычислены и записаны в оперативной памяти МК. Тогда интерполяция сводится к получению экспериментальных значений  $z_{nm}$  непосредственно на объекте с целью конечного формирования поверхности распределения температур  $L(U_f, U_h)$ .

В том случае, если область рабочих значений неизвестна, то необходима удобная форма записи для МК, которая позволила бы произвести интерполяцию в любой точке  $U_f, U_h$ . Этого можно достичь, используя векторные величины. Тогда базисные полиномы можно представить как произведение некоторых векторов (3):

$$l_{nm}(U_f, U_h) = \mathbf{L}_{nm} \mathbf{P}^T, \quad (3)$$

где  $\mathbf{P}$  – вектор базисных функций;  $\mathbf{L}_{nm}$  – вектор весовых коэффициентов.

Для случая  $(N, M) = (3, 3)$  вектор базисных функций принимает вид строки

$$\mathbf{P} = [U_f^2 U_h^2, U_f^2 U_h, U_f^2, U_f U_h^2, U_f U_h, U_f, U_h^2, U_h, 1].$$

В свою очередь, вектор-строка коэффициентов  $\mathbf{L}_{nm} = [c_k]$ ,  $k = 1, 9$  определяется набором значений переменных  $U_{fi}$  и  $U_{hj}$ ,  $i, j = \overline{1, 3}$ .

Для реализации многочленов Лагранжа в визуальной среде моделирования XCos Scilab была создана функция «Out», осуществляющая описанный алгоритм получения поверхности температур в рабочем объеме сушильной установки и температуры

конденсационной панели  $t_b^\circ(U_h, U_f)$  и  $t_r^\circ(U_h, U_f)$  (рис. 2).

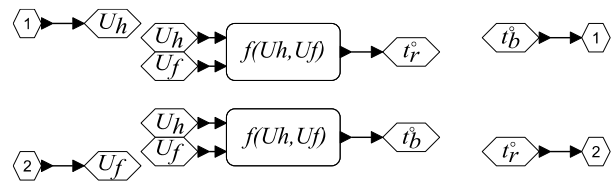


Рис. 2. Реализация функций Лагранжа в Scilab

### Синтез системы управления

На основе интерполированной математической модели была построена четырехконтурная САУ, реализованная на функциональных блоках в среде Scilab (рис. 3). Принцип ее работы заключается в том, чтобы по измеренным температурам  $t_b^\circ$  и  $t_r^\circ$  сформировать соответствующие рассогласования  $e_{tb}$  и  $e_{tr}$ . В свою очередь, каждая из ошибок умножается на индивидуальный коэффициент передачи  $K_{bh}, K_{rh}, K_{bf}, K_{rf}$  (обобщенно  $K_r$ ), который не содержится в самом блоке регулятора. Далее результат перемножения поступает в ПИ-регулятор «PI» для формирования управляющего значения, которое направляется в динамический блок «Dob». А с выхода динамического блока сигнал передается на сформированный ранее блок статистики, реализующий функции Лагранжа.

Следует отметить то, что объект управления является нелинейным. По этой причине использование аппарата линейной теории возможно только в окрестности точек равновесного состояния  $U_{h0}$  и  $U_{f0}$ . Поэтому в блоке динамики, который представлен передаточной функцией, необходимо учесть смещение начального состояния в нулевое значение.

Вид передаточной функции блока «Dob» получен из переходных процессов, снятых с экспериментальной установки под управлением среды CoDeSys с помощью ModBus протокола [12–15]. По этим данным можно заключить, что форма переходных процессов имеет вид кривой разгона передаточной функции аperiodического звена второго порядка:

$$W_{ob} = \frac{1}{(1 + T_1 \cdot s)(1 + T_2 \cdot s)}, \quad (4)$$

где  $T_1, T_2$  – постоянные времени объекта.

Для получения высокой сходимости модели объекта управления и реального объекта необходимо минимизировать среднеквадратичное отклонение между кривыми выходных величин. Этого можно достичь путем подбора значений постоянных времени передаточной функции (4). Поэтому объект управления был собран на экспериментальной установке, где среда CoDeSys выступает в роли средства сопряжения ПК с контроллером.

Эксперименты базировались на известной методике [16]. В конечном итоге было получено множество кривых переходных процессов  $t_b^\circ(t)$  и  $t_r^\circ(t)$  при



различных режимах работы. На рис. 4, 5 представлены результаты исследований при уменьшении энергии, потребляемой нагревателем.

Для количественной оценки сходимости модели температурных процессов вида (4) и экспериментальных данных в таблице приведены значения среднеквадратичных рассогласований.

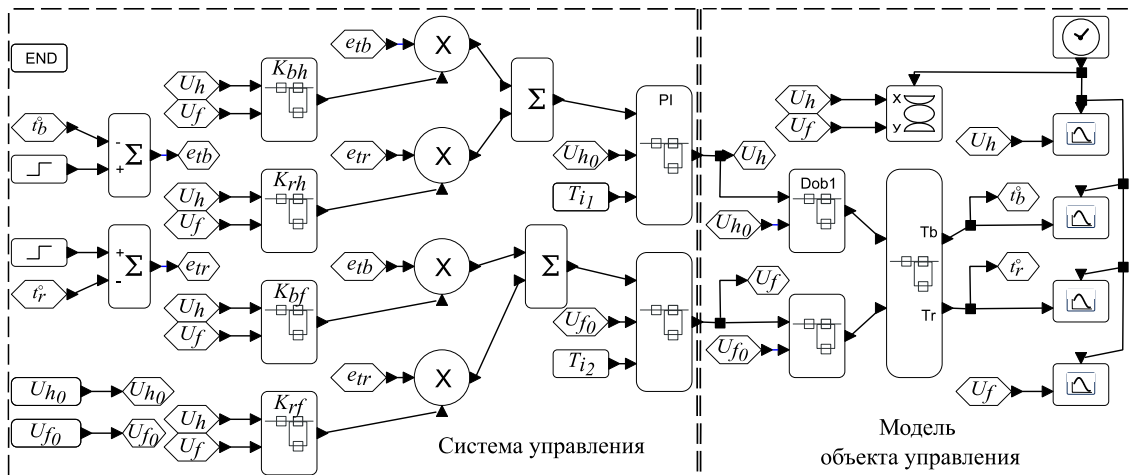


Рис. 3. Структурная схема модели системы управления и объекта в программной среде Scilab

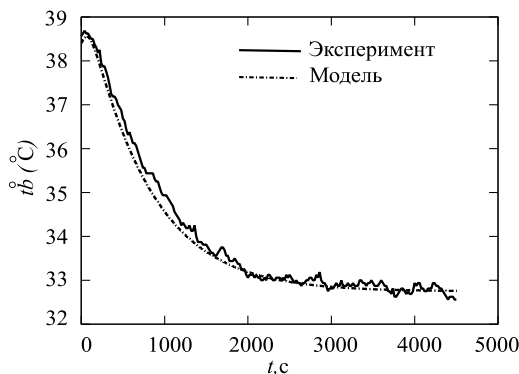


Рис. 4. Переходный процесс температуры в рабочем объеме при уменьшении энергии, потребляемой нагревателем

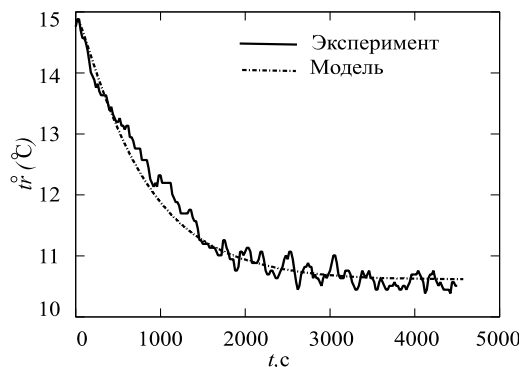


Рис. 5. Переходный процесс температуры конденсационной панели при уменьшении энергии, потребляемой нагревателем

**Значения рассогласований модели и эксперимента**

Условия эксперимента	Рассогласование для температуры радиатора (%)	Рассогласование для температуры бокса (%)
$U_f = \text{const}, U_h = \text{var}$	2,33	1,69
$U_h = \text{const}, U_f = \text{var}$	1,55	2,26

Из таблицы видно, что расхождение кривых находится в том же порядке, что и ошибки в канале измерений температуры, следовательно, адекватность модели достаточно высокая в статических и динамических режимах. В результате экспериментальных исследований были получены постоянные времени  $T_1 = 60$  с,  $T_2 = 850$  с для процесса изменения температуры (см. рис. 4) в рабочем объеме установки и  $T_1 = 10$  с,  $T_2 = 700$  с для процесса изменения температуры (см. рис. 5) на конденсационной панели.

**Определение параметров регуляторов**

Так как при управлении таким объектом существует некая неопределенность в направлении регулирования вентилятором и нагревателем, то необходимо определить коэффициенты передачи по каждому каналу управления. Это возможно оценить по скорости роста полученных ранее поверхностей  $t_b^\circ(U_h, U_f)$  и  $t_r^\circ(U_h, U_f)$  при изменении  $U_f$  и  $U_h$ . Для этого необходимо продифференцировать базисные полиномы по соответствующим направлениям. В матрично-векторной форме такая операция принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial l_{mn}(U_f, U_h)}{\partial U_f} = \partial L_{U_f} \cdot \mathbf{P}^T, \\ \frac{\partial l_{mn}(U_f, U_h)}{\partial U_h} = \partial L_{U_h} \cdot \mathbf{P}^T, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\partial L_{U_f} = [0, 2c_1, 0, 2c_3, 0, c_2, 2c_5, c_4, c_7]$  – вектор коэффициентов производной базисной функции по  $U_f$ ;  $\partial L_{U_h} = [0, 0, 2c_1, 2c_2, c_3, 0, c_4, 2c_6, c_8]$  – вектор коэффициентов производной базисной функции по  $U_h$ .

В итоге формируется четыре поверхности коэффициентов передач по соответствующим каналам:

$$\begin{cases} k_{bh}(U_h, U_f) = \partial_{U_h} t_b^\circ(U_h, U_f), \\ k_{rh}(U_h, U_f) = \partial_{U_h} t_r^\circ(U_h, U_f), \\ k_{bf}(U_h, U_f) = \partial_{U_f} t_b^\circ(U_h, U_f), \\ k_{rf}(U_h, U_f) = \partial_{U_f} t_r^\circ(U_h, U_f). \end{cases} \quad (6)$$

Большинство из них имеет положительный знак на всей области значений и ее изменение максимум в 2 раза. Особый интерес представляет поверхность  $k_{bf}(U_h, U_f)$ , которая на большей своей части находится в отрицательной области, а также переходит ноль и изменяет знак на положительный (рис. 6, а). Смена знака отчетливо видна на проекции поверхности  $k_{bf}(U_h, U_f)$  (рис. 6, б).

Полученные поверхности (6) позволяют перейти к процедуре настройки регуляторов, входящих в систему управления (см. рис. 3).

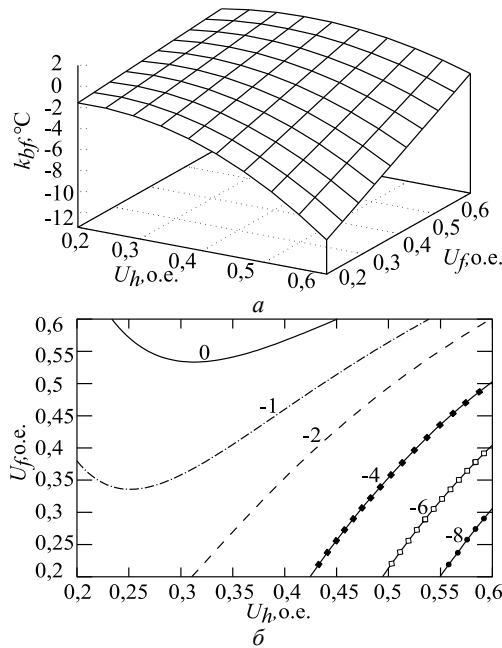


Рис. 6. Поверхность коэффициента передачи  $k_{bf}(U_h, U_f)$  – а; изолинии поверхности – б

Положим, что замкнутый контур оптимально настроен путем приведения его к передаточной функции [17]:

$$W_K(s) = \frac{1}{g \cdot T_\mu \cdot s \cdot (1 + T_\mu \cdot s)}, \quad (7)$$

где  $T_\mu$  – наименьшая некомпенсируемая постоянная времени контура;  $g$  – коэффициент, определяющий колебательность переходного процесса  $g \in (0,5; 3)$ .

С другой стороны, передаточная функция каждого контура, записанная поэлементно, имеет вид

$$W_K(s) = K_r \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \cdot k_{ob} \cdot W_{ob}. \quad (8)$$

После сопоставления передаточной функции (7) и (8) получим следующие условия для коэффициентов регулятора:

$$T_i = T_1, \quad K_r = \frac{T_1}{g \cdot T_2 \cdot k_{ob}}, \quad (9)$$

где  $k_{ob}$  – коэффициент передачи объекта. В силу нелинейности системы  $k_{ob}$  может менять свое значение в различных точках равновесного состояния, что показано на рис. 6. Для сохранения устойчивости во всем рассматриваемом диапазоне будем использовать их максимальное по модулю значение.

Такой подход хорошо работает для контуров, чей коэффициент передачи  $k_{ob}$  не меняет знак. Однако если при настройке контура с коэффициентом передачи  $k_{bf}$  принять в качестве максимального значения  $k_{bfm} = -4,5$ , то наблюдается интересный эффект – переходный процесс из устойчивой точки ( $U_f = 0,2$ ;  $U_h = 0,6$ ) в точку ( $U_f = 0,6$ ;  $U_h = 0,2$ ) сопровождается тем, что переменные состояния при такой настройке системы не достигают целевых значений. Это определяется тем, что в какой-то момент времени переходного процесса проявляется положительная обратная связь, образуемая из-за смены знака коэффициента передачи на положительный. Вследствие этого задающее напряжение вентилятора устанавливается в максимально возможное значение и фазовая траектория приобретает неустойчивый характер (рис. 7).

Как правило, в таком состоянии системы обслуживающий персонал переводит систему управления в ручной режим, зафиксировав ее неадекватную работу. Для достижения целевых значений требуется обеспечить уменьшение значения напряжения, подаваемого на обмотки двигателя вентилятора. Однако, эту проблему можно решить, если значение коэффициента передачи принимается равным  $k_{bfm} = -6$ . При такой настройке регуляторов система сохранила устойчивость (рис. 8).

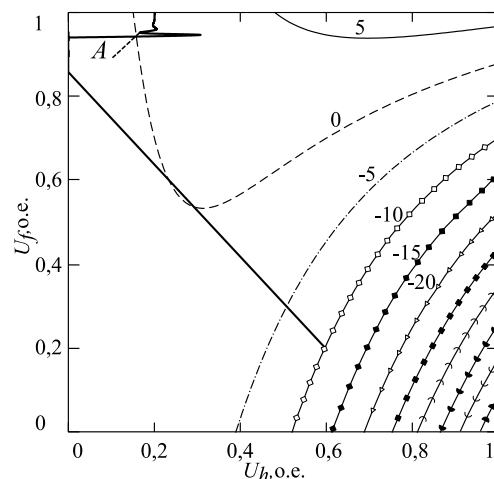


Рис. 7. Фазовый портрет управляющих воздействий при  $k_{bfm} = -4,5$  на фоне изолиний  $k_{bf}(U_h, U_f)$



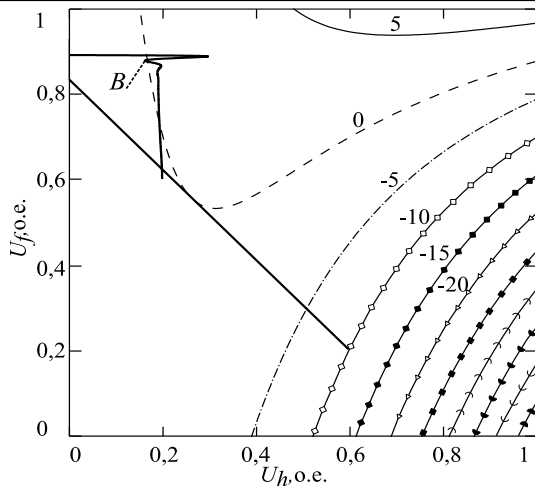


Рис. 8. Фазовый портрет управляющих воздействий при  $k_{bf} = -6$  на фоне изолиний  $k_{bf}(U_h, U_f)$

Критический момент соответствует точкам  $A$  и  $B$ . Точка  $A$  находится в контуре, образованном изолинией нулевого коэффициента передачи. В этом случае в системе возникает положительная обратная связь, что приведет к потере устойчивости. Точка  $B$  располагается в контуре, где сохраняется отрицательная обратная связь, соответственно обеспечивается устойчивость системы в целом.

Для общего решения этой проблемы предлагается следующее. С помощью коррекции коэффициента передачи возможно парировать влияние контура управления вентилятором на температуру в рабочем объеме. Суть работы корректирующего множителя заключается в придании нулевого значения соответствующему коэффициенту передачи регулятора в некоторой окрестности нуля  $k_{bf}$ . Если же значения  $k_{bf}$  выходят за рамки обозначенной нулевой области, то множитель равняется единице и не оказывает никакого влияния. Математическая запись изложенного алгоритма имеет следующий вид:

$$m_{bf}(k_{bf}) = \begin{cases} m_0, & \text{если } \left( \frac{k_{fb}}{k_{fbm}} < n_0 \right), \\ m_0 + \left( \frac{m_1 - m_0}{n_1 - n_0} \right) \left( \frac{k_{fb}}{k_{fbm}} - n_0 \right), & \text{если } \left( n_0 \leq \frac{k_{fb}}{k_{fbm}} < n_1 \right), \\ m_1 + \left( \frac{m_2 - m_1}{n_2 - n_1} \right) \left( \frac{k_{fb}}{k_{fbm}} - n_1 \right), & \text{если } \left( n_1 \leq \frac{k_{fb}}{k_{fbm}} < n_2 \right), \\ m_2 + \left( \frac{m_3 - m_2}{n_3 - n_2} \right) \left( \frac{k_{fb}}{k_{fbm}} - n_2 \right), & \text{если } \left( n_2 \leq \frac{k_{fb}}{k_{fbm}} < n_3 \right), \\ m_3, & \text{если } \left( n_3 \leq \frac{k_{fb}}{k_{fbm}} \right), \end{cases} \quad (10)$$

где  $n_i = (0, 1; 0, 25; 0, 75; 1)$  и  $m_i = (0; 0, 2; 0, 8; 1)$  – параметры, которые позволяют добиться плавности при изменении значений коэффициента регулятора. Их

использование исключает резкие изменения сигнала управления вентилятором. Наиболее наглядно выполнение условий (10) видно на проекции поверхности  $k_{bf}(P_h, P_f)$  (рис. 9).

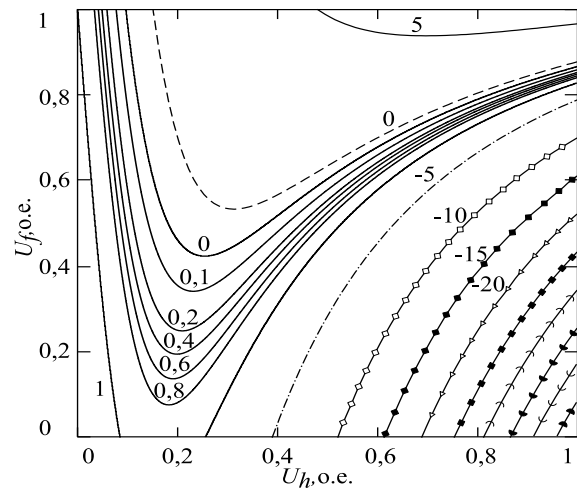


Рис. 9. Проекция множителя  $m_{bf}(k_{bf})$  на фоне изолиний  $k_{bf}(U_h, U_f)$

Как видно из рис. 9, в зоне нечувствительности ( $k_{bf} \approx 0 \pm \epsilon$ ) во избежание пагубного влияния положительной обратной связи  $m_{bf}(k_{bf})$  имеет нулевое значение, что полностью исключает регулирование в этом контуре. При приближении к областям с большими по модулю коэффициентами передачи – множитель плавно растет, вплоть до единицы.

Рассмотрим результаты моделирования с интегрированным алгоритмом коррекции в систему управления сушильной установкой. Полученный фазовый портрет управляющих воздействий представлен на рис. 10.

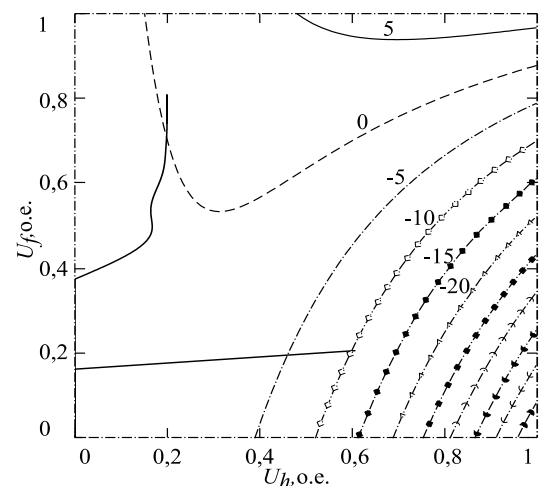


Рис. 10. Фазовый портрет управляющих воздействий при использовании разработанной системы управления на фоне изолиний  $k_{bf}(U_h, U_f)$

Как видно из кривых, представленных на рис. 10, устойчивость сохраняется при использовании разра-

ботанного алгоритма коррекции. Однако стоит отметить важный факт: нормальная работа аппарата обеспечивается только в области заранее определенной сетки значений задания, по которой строился исходный многочлен Лагранжа. Вне этой области нельзя гарантировать управляемость системы из-за существенной нелинейности полученных коэффициентов.

**Реализация алгоритма управления на ПЛК**

Для реализации системы разработан ПЛК на базе микропроцессора STM32f103C8Tx. В качестве операционной среды контроллера применяется RTos.

Экспериментальные данные удалось получить с производственной установки для сушки пиломатериалов объемом 80 м<sup>3</sup>, которая не имеет конденсационную панель. Поэтому второй канал управления регулирует положение воздушного клапана.

По результатам замеров можно заключить, что поверхности коэффициентов передачи не имеют границ изменений знака. Такое поведение полученных характеристик говорит о том, что корректирующий множитель будет иметь постоянное значение, модуль которого равняется единице. Вследствие этого непредсказуемость в управлении отсутствует. Однако существует небольшое исключение – поверхность коэффициента передачи температуры в боксе  $k_{bh}(U_v, U_h)$  по управлению нагревателем. Ее проекция представлена на рис. 11.

Значения  $k_{bh}(U_v, U_h)$  при закрытом клапане изменяются незначительно, поэтому корректирующий множитель будет выдавать значение ноль, отключая канал управления. Это позволит исключить неадекватную работу сушильной установки.

На рис. 12, 13 представлены переходные процессы сигналов управления нагревателем и воздушным клапаном.

Зашумленный вид сигналов обусловлен тем, что измерение с помощью АЦП подвержено шумам и ошибкам дискретизации. В результате шумовая составляющая усиливается ПИ-регулятором и значительно влияет на форму управляющих сигналов. Из приведенных переходных процессов сигналов управления видно стабильную и устойчивую работу без принятия ложных решений регулирования.

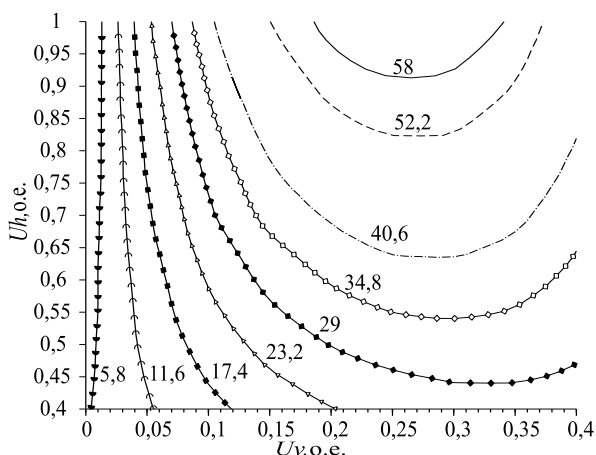


Рис. 11. Линии уровня поверхности  $k_{bh}(U_v, U_h)$

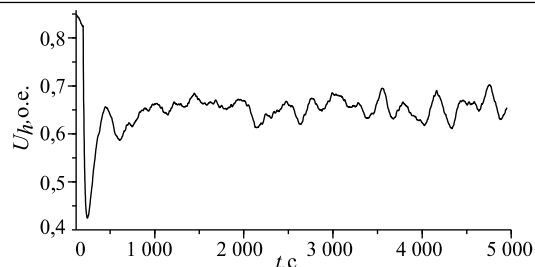


Рис. 12. Сигнал управления нагревателем

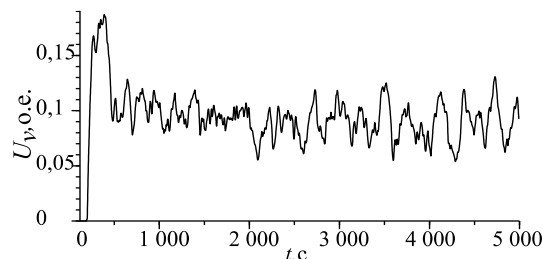


Рис. 13. Сигнал управления воздушным клапаном

**Заключение**

В настоящей работе предложена методика получения математической модели сушильной установки с помощью многочлена Лагранжа. Для четырехкантурной системы управления прототипом эксплуатируемой сушильной установки определены параметры ее динамической модели на основе экспериментальных данных с использованием программного среды CoDeSys. Расхождение экспериментальных и теоретических характеристик, полученных на модели, не превышает 3%.

В процессе исследований установлено, что коэффициенты передачи объекта, полученные с помощью многочлена Лагранжа, могут изменять знак, что влечет за собой появление положительных обратных связей, которые приводят систему в нерабочее состояние. Для исключения неадекватного поведения системы было предложено воспользоваться корректирующим множителем, который отключает непредсказуемый контур в зоне нечувствительности, где не требуется регулирование. Разработанная методика позволила исследовать устойчивые переходы из различных точек равновесного состояния на этапе моделирования.

Простота алгоритма и вычислительная легкость за счет матричных выражений и отсутствия рекуррентных соотношений позволяют реализовать алгоритм управления с коррекцией коэффициентов передачи на ПЛК в режиме реального времени. Для апробации результатов был использован недорогой процессор серии STM32f1xx. Результаты экспериментальных исследований показали, что обеспечивается предсказуемая и устойчивая работа промышленной сушильной установки. Отличительной особенностью алгоритма управления промышленной установкой по сравнению с лабораторным стендом является отсутствие смены знака статической поверхности  $k_{bh}(U_v, U_h)$  коэффициента передачи объекта. Это связано с тем, что в ее конструкции по экономическим причинам не применяется конденсационная па-

нель. Однако, разработанный алгоритм перенастройки параметров ПИ-регуляторов позволяет избежать неустойчивых зон в областях с изменяющимися режимами работы оборудования, что гарантирует предсказуемость работы сушильной установки.

#### Литература

1. Кизина О.А. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины / О.А. Кизина, А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 32–37.
2. Queslati A. Performance analysis of a new humid air dehumidifier / A. Queslati, A. Megriche // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 119. – P. 453–465.
3. Мусоров И.С. Осушитель воздуха на элементе Пельтье / И.С. Мусоров, С.Н. Торгаев, Д.С. Чертихина // Современные техника и технологии: сб. тр. XX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–18 апреля 2014 г.: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 123–124.
4. Habeebullah B.A. Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas // Desalination. – 2009. – Vol. 237, No. 1-3. – P. 330–345.
5. Analysis of power demand calculation for freeze prevention methods of counter-flow heat exchangers used in energy recovery from exhaust air / A. Pacak, A. Jedlikowski, M. Karpuk, S. Anisimov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 133. – P. 842–860.
6. Бежан А.В. Математическое описание водяного аккумулятора тепла кубической формы // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 6. – С. 59–64.
7. Расчетно-экспериментальные исследования фазового перехода воды в инновационной термоэлектрической установке / Д.А. Тихомиров, С.С. Трунов, И.Г. Ершова, Н.Г. Ламонов, Д.В. Поручиков // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 3. – С. 28–34.
8. Abbott P.F. The estimation of humidity parameters / P.F. Abbott, R.C. Tabony // Meteorological Magazine. – 1985. – Vol. 114, No. 1351. – P. 49–56.
9. Alduchov O.A. Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure / O.A. Alduchov, R.E. Eskridge // Journal of Applied Meteorology. – 1996. – Vol. 35, No. 4. – P. 601–609.
10. Тараник В.А. Применение интерполяционного многочлена Лагранжа для функций со многими переменными // ScienceRise. – 2015. – № 8. – С. 69–76.
11. Identification of Mathematical Model of Drying Unit / F.P. Perevoshchikov, N.V. Vuong, A.K. Shabo, A.A. Shilin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2020. – Vol. 795, No. 1. – P. 012021.
12. 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.
13. Дмитриев В.М. Система виртуальных инструментов и приборов для автоматизации учебных и научных экспериментов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, С.А. Панов // Программные продукты и системы. – 2016. – Т. 29, № 3. – С. 154–162.
14. Дмитриев В.М. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2 (36). – С. 24–35.
15. An experimental investigation on the performance of a thermoelectric dehumidification system / P. Rakkwamsuk, P. Paromupatham, K. Sathapornprasath, C. Lertsatitthanakorn, S. Soponronnarit // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2018. – Vol. 12, No. 4. – P. 4117–4126.
16. Методика постановки эксперимента в среде CoDeSys на примере системы управления вентиляцией / С.В. Прохоров, Нгуен Ван Вьонг, А.А. Шилин, Г.И. Однокопылов, В.А. Шевчук // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 109–115.
17. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 749 с.

#### Нгуен Ван Вьонг

Аспирант отд. электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ) Инженерной школы энергетики (ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-(983)-346-84-54  
Эл. почта: vuongoicolen@gmail.com

#### Шилин Александр Анатольевич

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-4761-7249  
Тел.: +7-903-954-00-88  
Эл. почта: shilin@tpu.ru

#### Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9861-9765  
Тел.: +7-913-854-21-96  
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

#### Перевошиков Филипп Владимирович

Магистрант ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-963-196-19-74  
Эл. почта: fvp2@tpu.ru

#### Брянцев Андрей Анатольевич

Аспирант ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-923-421-11-93  
Эл. почта: aa\_bryantsev@mail.ru

Nguyen V.V., Shilin A.A., Bukreev V.G.,  
Perevoshchikov F.V., Bryantsev A.A.

#### Synthesis of Regulators of the Drying Plant Control System Based on Statistical Data

In the article a method to carry out a synthesis of regulators of the drying plant control system is considered based on the integration of known statistical data by the Lagrange polynomial. An algorithm to correct the parameters of regulators in problematic modes of operation of the drying plant is proposed. It is shown that the control system developed and implemented on the PLC provides stable control of temperature and humidity during the drying of materials.

**Keywords:** drying plant control system, reconfigurable controller, Lagrange interpolation.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-56-63

## References

1. Kizina O.A., Adamovich A.L., Grozberg Y.G. *Analiz sovremennykh metodov i oborudovaniya dlya sushki drevesiny* [Analysis of modern methods and equipment for wood drying]. *Vestnik of Polotsk State University. Series. B. Industry. Applied Sciences*, 2011, no. 3, pp. 32–37 (in Russ.).
2. Queslati A., Megriche A. Performance analysis of a new humid air dehumidifier. *Energy Procedia*, 2017, vol. 119, pp. 453–465.
3. Musorov I.S., Torgaev S.N., Chertikhina, D.S. *Osu-shitel' vozduha na elemente Pel'te*. [Dehumidifier on the Peltier element]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sbornik trudov dvadcatoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh, Tomsk, 14-18.04.2014: v 3 t.* Tomsk, TPU Publ., 2014, vol. 1, pp. 123–124 (in Russ.).
4. Habeebullah B.A. Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas. *Desalination*, 2009, vol. 237, no. 1-3, pp. 330–345.
5. Pacak A., Jedlikowski A., Karpuk M., Anisimov S. Analysis of power demand calculation for freeze prevention methods of counter-flow heat exchangers used in energy recovery from exhaust air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 133, pp. 842–860.
6. Bejan A.V. *Matematicheskoe opisaniye vodyanogo akumul'yatora tepla kubicheskoy formy* [Mathematical description of a cubic-shaped water heat accumulator]. *Energy Saving and Water Treatment*, 2017, no. 6, pp. 59–64 (in Russ.).
7. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Ershova I.G., Lamonov N.G., Poruchikov D.V. *Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya fazovogo perekhoda vody v innovatsionnoy termoel'ektricheskoy ustanovke* [Computational and experimental studies of the water phase transition in an innovative thermoelectric installation]. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-industrial Complex*, 2019, no. 3, pp. 28–34 (in Russ.).
8. Abbott P.F., Tabony R.C. The estimation of humidity parameters. *Meteorological Magazine*, 1985, vol. 114, no. 1351, pp. 49–56.
9. Alduchov O.A., Eskridge R.E. Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, vol. 35, no. 4, pp. 601–609.
10. Taranik V.A. *Primeneniye interpol'yacionnogo mnogochlena Lagranzha dlya funktsiy so mnogimi peremennymi* [Application of the Lagrange interpolation polynomial for functions with many variables]. *ScienceRise*, 2015, no. 8, pp. 69–76 (in Russ.).
11. Perevoshchikov F.V., Vuong N.V., Shabo A.K., Shilin A.A. Identification of Mathematical Model of Drying Unit. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 795, pp. 012021.
12. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Panov S.A. *Komp'yuternoe modelirovaniye vizual'nykh interfejsov virtual'nykh instrumentov i priborov* [Computer modeling of visual interfaces of virtual instruments and devices]. *Scientific Visualization*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 111–131 (in Russ.).
13. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Panov S.A. *Sistema virtual'nykh instrumentov i priborov dlya avtomatizatsii uchebnykh i nauchnykh eksperimentov* [A system of virtual instruments and devices for automating educational and scientific experiments]. *Software Products and Systems*, 2016, vol. 29, no. 3, pp. 154–162 (in Russ.).
14. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. *Princip formirovaniya mnogourovnevnykh komp'yuternykh modelej SCADA – sistem dlya upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi ob'ektami* [The principle of forming multi-level computer models of SCADA systems for managing complex technological objects]. *Computer Science and Control Systems*, 2013, no. 2 (36), pp. 24–35 (in Russ.).
15. Rakkwamsuk P., Paromupatham P., Sathapornprasath K., Lertsatitthanakorn C., Soponronnarit S. An experimental investigation on the performance of a thermoelectric dehumidification system. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 4117–4126.
16. Prokhorov S.V., Vuong V. Nguen, Shilin A.A., Odnokopylov G.I., Shevchuk V.A. *Metodika postanovki eksperimenta v srede CoDeSys na primere sistema upravleniya ventilyatsionnoy ustanojki* [Methodology for setting up an experiment in CoDeSys using the example of a ventilation control system]. *TUSUR reports*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 109–115 (in Russ.).
17. Besekersky V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. St Petersburg, vol. 22, no. 4, pp. 109–115 (in Russ.).

---

**Vuong V. Nguyen**

Postgraduate student, Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU) 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-983-346-84-53  
Email: vuongoicolen@gmail.com

**Aleksander A. Shilin**

Doctor of Science in Engineering, 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

**Viktor G. Bukreev**

Doctor of Science in Engineering, Professor, Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering, NR TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>  
Phone: +7-913-854-21-96  
Email: bukreev@tpu.ru

**Filipp V. Perevoshchikov**

Undergraduate student, Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering, NR TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-963-196-19-74  
Email: fvp2@tpu.ru

**Andrey A. Bryantsev**

Postgraduate student, Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-923-421-11-93  
Email: aa\_bryantsev@mail.ru

УДК 004.273

А.О. Игумнов

## Архитектура программного обеспечения распределенной системы мониторинга и управления транспортом

Рассмотрены особенности некоторых систем мониторинга и управления транспортом. Сформулировано предложение о построении единой платформы. Для построения платформы представлены функциональные модули общего назначения. Описан интерфейс межмодульного взаимодействия, обеспечивающий соблюдение принципов построения распределённых систем.

**Ключевые слова:** системы мониторинга транспорта, социально-экономические системы, облачные вычисления, хостинг.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-64-68

В настоящее время наряду со стремительным расширением мирового автопарка растёт количество технических разработок, призванных обеспечить мониторинг местоположения транспортных средств в целях осуществления автоматизации деятельности диспетчерских служб и управления транспортными средствами. Системы мониторинга транспорта, направленные на работу и обслуживание населения, по своей сути являются социально-экономическими системами, использующими средства отслеживания местоположения и оборудование передачи данных для осуществления мониторинга подвижных объектов. Наиболее актуальными технологиями в области систем мониторинга и управления транспортом в наше время являются: спутниковая навигация для контроля местоположения и цифровые карты для его отображения [1].

Сегодня существуют системы мониторинга транспорта самого разного назначения: системы мониторинга общественного транспорта следят за соблюдением маршрутов транспортных средств и предоставляют публичный доступ к данным об их положении, мониторинг специального транспорта включает в себя управление статусами работы машин, а для таксомоторных парков, ко всему прочему, характерно использование Call-центров. В зависимости от сферы применения состав компонентов системы мониторинга будет различаться: помимо общей составляющей в виде вывода информации о местоположении транспортного средства, также будет включен набор специализированных функций для каждой подсистемы отдельно. Повышения эффективности процессов в сложных социально-экономических системах можно достигнуть за счёт упорядоченности и взаимосвязи отдельных служб оказания услуг населению.

Все существующие системы мониторинга выполняют функцию отслеживания положения транспортных средств, что позволяет предположить, что объединение данных от различных систем в единое пространство позволит оптимизировать движение транспорта для каждого предприятия отдельно. В результате проведённого анализа существующих систем мониторинга и диспетчеризации транспорта выявлена разобщённость систем, негативно влияю-

щая на функционирование транспортной структуры в целом. Для решения проблемы необходима единая система предоставления услуг, которая позволила бы учитывать работу различных предприятий и их общее воздействие на транспортную систему. При разработке подобного проекта следует учитывать многообразие функций, необходимых для обеспечения мониторинга транспорта и определять их как сервис в отдельных модулях. В свою очередь, в системе должно быть предусмотрено внутреннее взаимодействие модулей, что обеспечило бы возможность взаимодействия системы как платформы, для автоматизации мониторинга транспорта [2].

Ввиду большого количества общих функций для различных сфер транспортной деятельности мы исходим из предположения, что для каждой сферы будут различные варианты клиентского ПО, которые, в свою очередь, могут подключаться в равной степени к общему серверу или к серверу предприятия. Следовательно, независимо от расположения функциональных модулей на каждом сервере требуется включить механизм публикации для обеспечения внешнего доступа других модулей и клиентского ПО [3]. Любое предприятие, осуществляющее мониторинг и управление транспортом, будет ограничивать доступ к различной информации из соображений безопасности. Поэтому в общем ядре серверного ПО целесообразно встроить учёт прав доступа на основании подключаемого пользователя в виде отдельного модуля распределения прав (рис. 1).

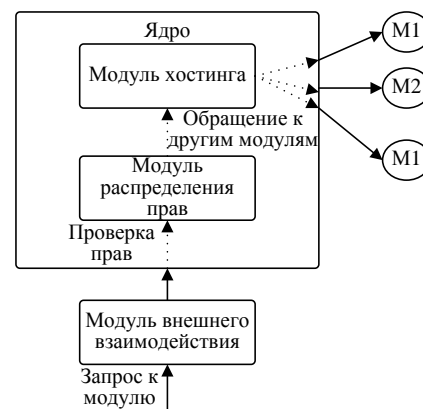


Рис. 1. Обязательное ядро серверного ПО

Поскольку модули распределены по программным компонентам, база данных не должна быть включена на каждом сервере [4]. По этой причине модуль взаимодействия с БД не входит в состав представленного ядра.

Используя это ядро, можно разработать общую распределённую платформу, предоставляющую услуги по обслуживанию транспортных предприятий как непосредственно, так и в интеграции с другими системами. При этом архитектура платформы

включает в себя: ядро, модуль работы с базой данных и другие модули, осуществляющие обработку данных: как модули общего назначения, так и индивидуальные соответствующие сфере деятельности конкретного предприятия. Для интеграции готовых решений также можно предусмотреть реализацию некоторых модулей-шин, представляющих высокоуровневые методы обработки конечных данных для каждой сферы деятельности индивидуально (рис. 2) [5].

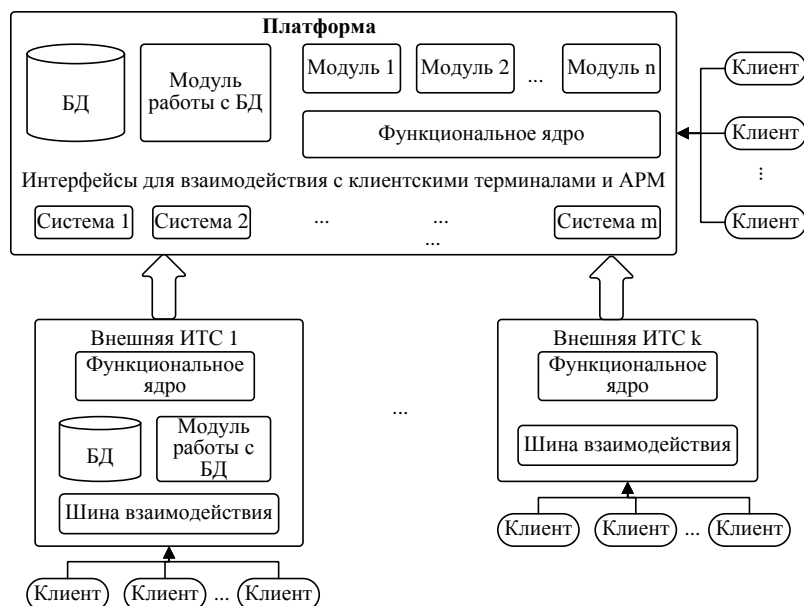


Рис. 2. Архитектура единой распределённой системы мониторинга и управления транспортом

Таким образом, каждый клиент, подключаясь к серверу, обращается к модулю, являющемуся специфичным для сферы работы предприятия и предоставляющим соответствующий функционал клиенту. После проверки прав доступа для пользователя, в соответствии с конфигурацией модуля хостинга, осуществляется запрос к необходимым модулям расчёта или предоставления данных.

Клиентское ПО и мобильные терминалы могут быть настроены как на работу непосредственно с платформой, так и на работу с собственными системами, которые посредством инструментов ядра и модуля-шины взаимодействия будут использовать функционал платформы. Сторонняя система может в равной степени использовать базу данных на своём сервере с синхронизацией отдельных данных с платформой. Если система не требует хранения сложных структур данных, то возможно подключение ИТС и без собственной базы данных, взаимодействуя с платформой [6].

Поскольку система является помодульно распределённой, платформа может предоставлять функционал модулей отдельно. Это позволяет предоставлять систему конкретному предприятию частично, взаимодействуя с единой платформой по некоторым функциям.

В данный момент по такому принципу построена распределённая система мониторинга обще-

ственного и специального транспорта города Томска (рис. 3). Центральный сервер содержит базу данных общественного транспорта и предоставляет доступ к нескольким модулям, в частности, модулю прогнозирования. Службы трамвайно-троллейбусного управления и центра организации пассажироперевозок представляют собой отдельные системы с собственными модулями отчётности и прогнозирования, для управления общественным транспортом, однако взаимодействуют с базой данных центрального сервера. Сервер станции скорой медицинской помощи имеет собственную базу данных, но использует модуль прогнозирования центрального сервера, который, обладая более полными данными о дорожной обстановке, предоставляет более точные прогнозы прибытия. Использование модуля хостинга позволяет построить распределённую систему для виртуализации работы отдельных сфер транспортной деятельности и улучшения работы транспортной системы социально и экономически, образуя облачную платформу. Облачные вычисления (англ. cloud computing) – обеспечение доступности компьютерных ресурсов из общего пула конфигурируемых ресурсов, особенно памяти и вычислительной мощности, по требованию, без непосредственного активного участия пользователя.

Национальным институтом стандартов и технологий США зафиксированы следующие обязательные характеристики облачных вычислений:

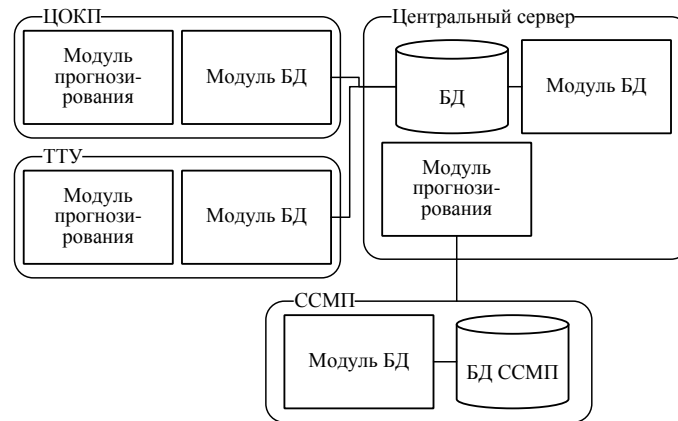


Рис. 3. Интеграция нескольких серверов в единую распределённую систему мониторинга и управления транспортом

- Самообслуживание по требованию (англ. *self service on demand*) – конфигурирование объёма выделяемых ресурсов осуществляется потребителем без непосредственного участия поставщика услуг.

- Универсальный доступ по сети – услуги доступны по сети вне зависимости от особенностей запрашивающего оборудования.

- Объединение ресурсов (англ. *resource pooling*) – несмотря на индивидуальное конфигурирование ресурсов для потребителей, ресурсы объединены в единый пул для динамического перераспределения мощностей в условиях постоянного изменения спроса.

- Эластичность – изменение спектра предоставляемых услуг может быть изменено в любой момент времени в автоматическом режиме.

- Учёт потребления – в зависимости от характера услуг поставщик в автоматическом режиме исчисляет потреблённые ресурсы на определённом уровне абстракции (объём хранимых данных, пропускная способность и др.) для каждого потребителя [7].

Объединение ресурсов позволяет поставщику экономить при масштабировании системы, используя меньше ресурсов, чем требовалось бы при выделении каждому потребителю индивидуальных аппаратных мощностей, а с автоматизацией процедур выделения ресурсов снижаются и затраты на абонентское обслуживание.

В свою очередь, для потребителя открывается возможность быстрого масштабирования системы, благодаря эластичности, без привлечения собственной аппаратной структуры, при этом получать услуги с высоким уровнем доступности и низкими рисками отказов.

Универсальный доступ по сети позволяет использовать облачные вычисления для широкого класса устройств: персональных компьютеров, мобильных телефонов, интернет-планшетов.

Модуль работы с базой данных предполагает в себе функционал репликации, следовательно, хранение данных можно распределить с учётом функционального разделения базы данных на уровни хранения и быстрого доступа к данным, образуя единое пространство данных всех систем облачной струк-

туры [8]. Модули обработки данных являются универсальными для своих задач независимо от источника обращения, следовательно, конфигурация их хостинга может распределять обращения по многим точкам доступа в рамках запросов одного и того же функционала.

Подобное распределение делает интерфейсы внешнего доступа специализированных подсистем независимыми от положения и индивидуального назначения [9]. Поскольку все модули используют хостинг для своего размещения, сам модуль хостинга предоставляет общий интерфейс для внешнего доступа конечных потребителей, который, основываясь на конфигурации и механизме внутреннего распределения нагрузки модуля хостинга, будет предоставлять доступ в соответствии с принципами облачных систем (рис. 4).

Таким образом, каждая сборка модулей может являться как самостоятельным сервером, обслуживающим систему, так и входить в общую облачную платформу. Предлагаемая облачная платформа предоставляет общий интерфейс для внешнего подключения, что делает доступ к платформе виртуализированным [10]. Распределение модулей посредством хостинга позволяет выделить функциональные уровни системы: взаимодействия, обработки и хранения, что делает систему масштабируемой на неограниченное количество серверов, предоставляя возможность обеспечить достаточными ресурсами любую организацию, реализующую мониторинг транспорта. Следовательно, возникает необходимость разработки унифицированного способа межмодульного взаимодействия, что позволит осуществлять работу с модулями одинаково в рамках одних и тех же методов. При этом важно реализовать передачу данных таким образом, чтобы она осуществлялась независимо от положения модуля в сети работы системы [11].

Для удалённого обмена данными между серверами реализован хостинг функций модуля для внешнего доступа. Хостинг реализует функционал публикации модуля – размещение модуля в сети для унификации доступа к его функциям, что позволяет использовать его в равной степени локально и извне.

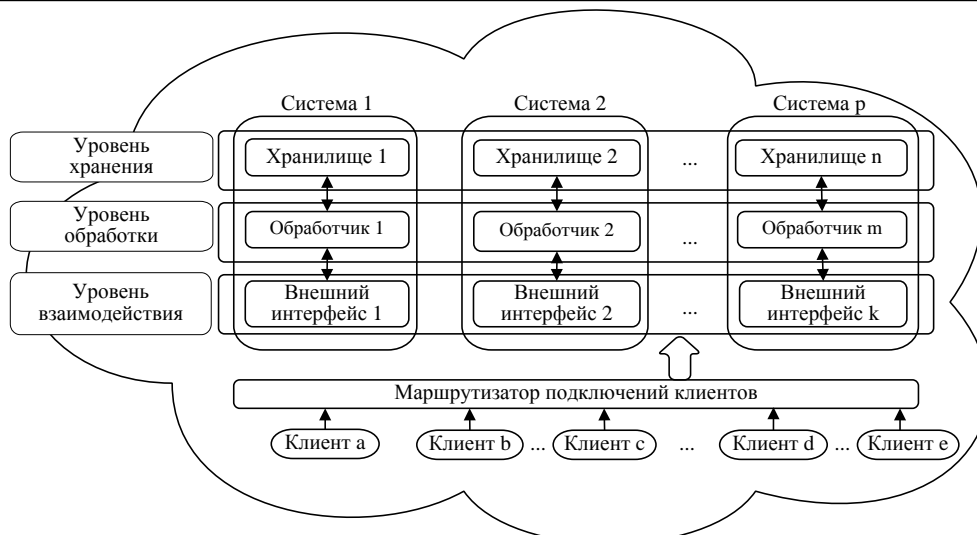


Рис. 4. Структура облачной системы мониторинга транспорта

Для поддержания масштабируемости системы все модули должны публиковаться посредством функционала хостинга ядра, отвечающего за конфигурацию доступа. Каждый модуль подключается к платформе как расположенный удаленно, а конфигурация определяет, какие модули публикуются локально, а к каким требуется удаленное подключение. Конфигурирование общего модуля публикации позволит создать полноценную распределенную масштабируемую систему (рис. 5).

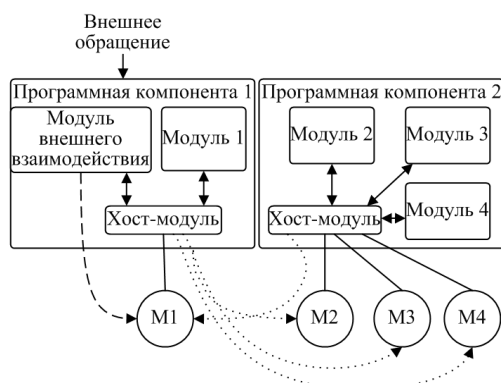


Рис. 5. Взаимодействие модулей через единый механизм соединения

При реализации модуля хостинга используется унифицированная технология межплатформенного взаимодействия. Хостинг каждого модуля осуществляется без ущерба для производительности. Обмен данными при этом реализуется в виде асинхронных сообщений от одной конечной точки службы к другой (рис. 6) [12].

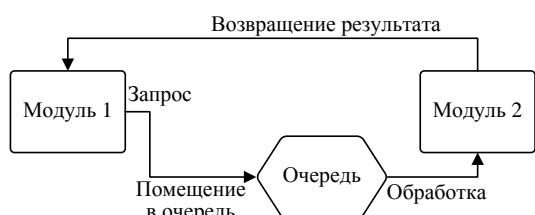


Рис. 6. Асинхронный обмен сообщениями

Представленный модуль хостинга позволяет строить распределенную систему независимо от положения серверов, поскольку модули между собой будут вести обмен посредством удаленного подключения. При локальном расположении модулей подключение будет осуществляться напрямую средствами операционной системы.

Таким образом, на основании проведенного анализа существующих систем мониторинга и управления транспортом были описаны общие функции данного класса социально-экономических систем. Результаты анализа функциональных особенностей существующих систем мониторинга позволяют предложить использование архитектуры модульного построения платформы, предназначенной для совершенствования методов получения и обработки информации, направленных на повышение эффективности работы диспетчерских служб, а следовательно, и улучшения качества предоставления транспортных услуг населению. Для предложенной архитектуры представлено функциональное ядро, необходимое для распределения модулей системы по программным компонентам. Принято решение на уровне ядра встроить модуль распределения прав доступа к функциям других модулей и модуль хостинга для обеспечения взаимодействия между модулями, но не встраивать модуль работы с базами данных. Хотя ядро не включает средств доступа к БД, отдельно упоминается необходимость функционала репликации в модуле баз данных для создания единого пространства данных платформы. Разработан модуль хостинга, обеспечивающий виртуализацию доступа к распределенной системе мониторинга и управления транспортом.

*Литература*

1. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. – СПб.: Эко-Трендз, 2003. – 146 с.
2. Cloud Application Management for Platforms. Version 1.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.oasis-open.org/committees/download.php/47278/CAMP-v1.0.pdf>, свободный (дата обращения: 20.04.2021).



3. Добровольский А. Интеграция приложений: методы взаимодействия, топология, инструменты // Открытые системы. – 2006. – № 9. – С. 30–34.
4. Реализация критериев безопасности при построении единой системы разграничения доступа к информационным ресурсам в облачных инфраструктурах / И.Б. Саенко, М.А. Бирюков, С.А. Ясинский, А.Н. Грязев // Информация и космос. – 2018. – № 1. – С. 81–85.
5. Куцевич Н.А. // Мир компьютерной автоматизации. – 2001. – № 1. – С. 37–41.
6. Мишин Д.С. Моделирование процессов интеграции автоматизированных систем управления // Наука и практика. – Орёл: Орл. юрид. ин-т МВД РФ им. В.В. Лукьянова, 2014. – С. 153–155.
7. Peter M. The NIST Definition of Cloud Computing // Computer Security Resource Center. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>, свободный (дата обращения: 20.04.2021).
8. Коннолли Т. Базы данных: проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика / Т. Коннолли, К. Бегг, А. Страчан. – М.: Вильямс, 2017. – 1440 с.
9. Гайдамакин Н.А. Разграничение доступа к информации в компьютерных системах / Н.А. Гайдамакин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003. – 328 с.
10. Junjie P. Comparison of Several Cloud Computing Platforms / P. Junjie, X. Zhang, Z. Lei // Second International Symposium on Information Science and Engineering. – Shanghai: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. – P. 23–27.
11. Tanenbaum A. Distributed Systems / A. Tanenbaum, S.M. Von. – Scotts Valley : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. – 596 с.
12. Dimosthenis K. Achieving Real-Time in Distributed Computing: From Grids to Clouds Hardcover / K. Dimosthenis, V. Theodora, K. Kleopatra. – Hershey: IGI Global, 2011. – 330 p.

#### Игумнов Артем Олегович

Лаборант отд. информационных технологий инженерной школы информационных технологий Томского национального исследовательского университета  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5852-9423>  
Тел.: +7-913-107-34-47  
Эл. почта: artishiro@tpu.ru

Igumnov A.O.

#### Software Architecture of the Distributed System for Transport Monitoring and Control

The features of some systems for transport monitoring and control are considered. A technique to build a unified platform is proposed. The functional modules of general purpose that could be used to build the platform are given. The interface of intermodular interaction is described, which ensures the compliance with principles of building distributed systems.

**Keywords:** transport monitoring systems, socio-economic systems, cloud computing, hosting.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-64-68

#### References

1. Soloviev Yu.A. *Sputnikovaya navigatsiya I yeyo prilozheniya* [Satellite navigation and its applications] / Yu.A. Soloviev. SPb.: Eco-Trends, 2003. 146 p. (in Russ.).
2. Cloud Application Management for Platforms. Version 1.0. Available at: <https://www.oasis-open.org/committees/download.php/47278/CAMP-v1.0.pdf>, free (Accessed: April 20, 2021).
3. Dobrovolskiy A. *Integratsiya prilozheniy: metody vzaimodeystviya, topologiya, instrumenti* [Application integration: methods of interaction, topology, tools]. *Open systems*, 2006, no. 9, pp. 30–34 (in Russ.).
4. Sayenko I.B., Biryukov M.A., Yasinsky S.A., Gryazev A.N. [Implementation of security criteria in the construction of a unified system of differentiation of access to information resources in cloud infrastructures]. *Information and space*, 2018, no. 1, pp. 81–85 (in Russ.).
5. Kutsevich N.A. *Instrumentariy dlya integratsii raznorodnykh podsystem* [Toolkit for the integration of heterogeneous subsystems]. *World of Computer Automation*. ZAO RTSof, 2001, no. 1, pp. 37–41 (in Russ.).
6. Mishin D.S. *Modelirovanie processov integratsii avtomatizirovannykh sistem upravleniya* [Modeling of integration processes of automated control systems] Science and Practice. Oryol, Oryol Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after V.V. Lukyanov, 2014, pp. 153–155 (in Russ.).
7. Peter M. The NIST Definition of Cloud Computing. Computer Security Resource Center. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>, free (Accessed: April 20, 2021).
8. Connolly T., Begg K., Strachan A. *Bazy dannykh: Proektirovanie, Realizatsiya i Soprovozhdenie* [Databases: Design, Implementation and Maintenance]. Theory and practice. Moscow, Williams, 2017, 1440 p. (in Russ.).
9. Gaidamakin, N.A. *Razgranichenie dostupa k informatsii v komputernykh sistemah* [Differentiation of access to information in computer systems]. Yekaterinburg, Publishing House of the Ural University, 2003, 328 p. (in Russ.).
10. Junjie P., Zhang X., Lei Z. Comparison of Several Cloud Computing Platforms. *Second International Symposium on Information Science and Engineering*. Shanghai, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009, pp. 23–27.
11. Tanenbaum A., Von S.M. *Distributed Systems*. Scotts Valley, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017, 596 p.
12. Dimosthenis K., Theodora V., Kleopatra K. *Achieving Real-Time in Distributed Computing. From Grids to Clouds Hardcover*. Hershey, IGI Global, 2011, 330 p.

#### Artyom O. Igumnov

Laboratory Assistant, Information Technology Department,  
Engineering School of Information Technologies,  
Tomsk National Research University  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5852-9423>  
Phone: +7-913-107-34-47  
Email: artishiro@tpu.ru

УДК 004.75

М.В. Владимиров

## Сферы применения блокчейн-систем

Приведен анализ возможностей применения технологии Blockchain в рамках программ по цифровизации экономики и развития образовательного сектора. Выделены три основных направления использования блокчейн: криптовалюты, отслеживание уникальности предметов и смарт-контракты. Также предложена классификация систем, основанных на блокчейне, разделяющая существующие системы по сфере применения. Рассмотрены действующие способы использования данной технологии для реализации различных задач в рамках отдельных предприятий, государств и мира, а также предложено перспективное решение в соответствии с действующими трендами и направлениями развития. Также описаны проблемы, сопутствующие реализации блокчейн-систем.

**Ключевые слова:** блокчейн, системы, применение, классификация, распределенные реестры, применение, цифровизация, образование.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-69-74

Блокчейн как технология впервые увидела свет в 2009 г. Предназначение новой технологии было в запуске в обращение первой криптовалюты Bitcoin [1].

На сегодняшний день с ростом интереса к криптовалютам существенно возрос интерес к самой технологии, за счет чего появилось множество новых применений. Блокчейн заинтересовал специалистов самых разных профилей, начиная от экономистов и юристов, заканчивая программистами и инженерами.

Изучение данной технологии имеет большой потенциал в том числе в рамках государственных программ по развитию и цифровизации, среди которых Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 г. № 273-ФЗ, Государственная программа РФ «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная протоколом заседания Президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 04.06.2019 г., и др. Данные документы показывают потребность в цифровизации различных сфер жизни и применении самых передовых технологий, в том числе и распределенных реестров.

Для получения максимально объективной информации о возможностях применения технологии блокчейн было проведено исследование, отраженное в данной статье. Но прежде чем изучить возможные способы эксплуатации данного инструмента, необходимо классифицировать виды блокчейн-систем с целью разграничения масштабов бизнес-задач и сложности создания программных продуктов.

### Классификация блокчейн-систем

Криптовалюты (первое применение технологии) создавались как децентрализованные и общедоступные платежные системы. По этой причине основной классификацией можно считать классификацию «по открытости», т.е. делить системы на открытые и закрытые.

В данном случае открытая блокчейн-сеть позволяет любому пользователю подключиться к системе и работать с ней. Закрытая система позволяет

совершать какие-либо действия лишь пользователям, имеющим определенные в системе права.

В качестве примера открытой системы можно привести криптовалюту Bitcoin, с которой может работать любой желающий. Примером закрытой сети может служить программный продукт Corda, разработанный банковской группой J.P. Morgan для обслуживания предприятий [2].

Существует еще один способ классификации блокчейн-систем: частные и публичные. Публичные сети работают полностью прозрачно и никем не контролируются. В пример подобной сети можно привести криптовалюту Ethereum. Частные системы контролируются и управляются владельцем, как например, упомянутая выше Corda.

В качестве еще одной классификации необходимо привести разделение блокчейн-систем по масштабам использования. В данном виде классификации происходит разбиение на корпоративные системы, государственные системы и глобальные системы. Автор считает, что именно в рамках данной классификации необходимо далее рассматривать способы применения технологии, которые существуют на данный момент.

### Корпоративные блокчейн-сети

Корпоративные блокчейн-сети применяются в рамках конкретной организации. Сфер применения данной технологии достаточно много. Среди них активно выделяется *применение в банковской сфере* для обеспечения прозрачности, надежности и безопасности всех транзакций клиентов по переводам, сделкам с ценными бумагами и пр. Благодаря блокчейн, банки смогут экономить до 50% затрат на обслуживание стандартных операций по заявлениям Morgan Stanley от 2017 г. Согласно заявлению Германа Грефа в 2015 г., блокчейн уже используется в некоторых процессах в Сбербанке [3–5].

Представители МСП (малый и средний бизнес) также начали использовать легализованные государствами в разной степени криптовалюты для адаптации привычных финансовых организаций к новым реалиям [6]. Среди таких организаций обменные

пункты (обмен обычных денег на криптовалюту и криптовалюты между собой), МФО (микрофинансовые организации) для выдачи займов в криптовалюте, биржи для использования криптовалют в качестве активов. Существуют целые организации, которые занимаются заработком на поддержании алгоритмов консенсуса в разных сетях (майнинг). В 2020 г. появилось новое направление, нацеленное на сохранение и приумножение денежных средств своих клиентов по принципу банковского депозита (стейкинг).

Также блокчейн используется для *обеспечения безопасности систем*. Благодаря тому, что данные дублируются на множество узлов блокчейн-сети и периодически согласуются между собой, систему становится практически невозможно взломать. Алгоритм консенсуса позволяет добавлять в систему только проверенные данные и не дает возможность подменить уже имеющиеся.

Отдельным направлением применения технологии в сфере безопасности является *идентификация личности* [7]. За счет защищенности и безопасности блокчейн-систем возможно хранить персональные данные и однозначно идентифицировать производящего те или иные действия пользователя. При этом часть публичных блокчейн-проектов позволяет оставаться анонимными тем пользователям, кто этого желает.

Идентификация личности посредством блокчейн-системы уже реализовано в некоторых странах, среди которых Эстония и Объединенные Арабские Эмираты. В этих странах возможно получить услуги через порталы государственных услуг путем идентификации через блокчейн-системы. Подобный способ идентификации личности применяется и для некоторых корпоративных систем.

Помимо вышеописанных способов применения блокчейн-технологии существует еще направление, связанное с *документооборотом* [8]. На основе технологии разрабатываются системы, позволяющие передавать права на документы между сотрудниками и/или клиентами организации. Подобные системы применяются в риэлторских, юридических и подобных фирмах. Эффективность таких решений повышается за счет смарт-контрактов, реализованных во многих блокчейн-проектах, таких как Ethereum.

Данные смарт-контракты способны вытеснить бумажные и электронные версии обычных документов, так как обеспечивают лучшую безопасность в плане хранения и изменения условий соглашений. Первой страной, законодательно утвердившей использование смарт-контрактов, стала Беларусь [9].

Важным применением являются *системы для отслеживания уникальности единиц продукции*. В производстве медицинских препаратов используют блокчейн-сети для отслеживания пути препарата от производителя до прилавка, что позволяет избежать поддельных препаратов, способных принести вред людям.

В рамках отслеживания уникальности единиц продукции как вида применения блокчейн-техноло-

гии стоит выделить использование данного подхода в компьютерных играх и других цифровых проектах, требующих наличие уникальных предметов. Существует множество интеграций блокчейн-сетей в различные игровые проекты, чтобы подтвердить уникальность того или иного артефакта. Одним из ярких примеров подобного проекта является проект «CryptoKitties», осуществляющий продажу и генерацию уникальных виртуальных котят, которых может приобрести любой желающий. Стоимость некоторых уникальных котят на проекте достигает нескольких тысяч долларов.

Прозрачность блокчейн-систем также позволяет реализовывать инструменты для проведения честных *голосований*, что может применяться как в рамках компаний, так и в рамках государственных мероприятий, сопряженных со сбором общественного мнения.

Также не обозначен такой вид использования блокчейн-систем, как валюта. В рамках организации или программного проекта блокчейн-сеть может выполнять роль криптовалюты, которой можно расплачиваться в рамках проекта системы.

Подробнее про криптовалюты написано далее, а в данном разделе автор считает необходимым выделить такой инструмент, как *ICO* (Initial Coin Offering – первичное размещение монет) [10], который позволяет организациям привлекать инвестиции в свои проекты без сложного процесса выпуска ценных бумаг. ICO является полноценным и более простым способом привлечь множество инвесторов с любым объемом инвестиций и на любом этапе развития проекта. Таким образом, ICO является смесью IPO (Initial Public Offering – первичное размещение акций) и краудфандинга (сбор средств на развитие проекта от всех желающих), но гораздо проще, чем первый способ привлечения финансовых средств, и гораздо безопаснее, чем второй.

Исходя из вышеперечисленных способов применения блокчейн-технологий, можно сделать вывод, что данный инструмент в будущем окажет существенное влияние на развитие не только крупного бизнеса, но и представителей МСП (малое и среднее предпринимательство).

#### **Государственные блокчейн-сети**

В государственной сфере применение блокчейн может быть не менее обширным, чем в корпоративной сфере.

Первый способ применения технологии государством, который автор считает необходимым выделить, это реализация национальной виртуальной валюты. В 2014 г. Центробанк России сделал заявление о намерениях создания подобной валюты [11]. Такая валюта позволит использовать все преимущества криптовалют, но, в свою очередь, будет лишена их недостатков (с точки зрения государства), таких как анонимность и отсутствие модерации. За счет отсутствия анонимности появится возможность получать налог со всех транзакций этой валюты (на данный момент использование криптовалют невоз-

можно обложить налогом из-за анонимности систем). Подобное решение используется и в Китайской Народной Республике.

Также применение блокчейн-технологии может использоваться для искоренения коррупции посредством внедрения системы, регламентирующей и контролирующей взаимодействие различных отделов и лиц. За счет отсутствия возможности полного удаления данных из блокчейн-сети не будет возможности скрыть те или иные транзакции.

Третий кейс для использования распределенных реестров – это обеспечение информацией о гражданах и ключевых сферах государственной деятельности, связанных с обеспечением качества жизни населения. Применение подобной системы позволит в электронном виде подтверждать личность пользователя, получать всю необходимую информацию о здоровье, задолженностях и достижениях гражданина Российской Федерации. С точки зрения обеспечения качества оказания услуг населению появится возможность контролировать поставку медикаментов, качество оказания услуг конкретной организацией, траты бюджета, выделенного на содержание заведений.

Использование блокчейн-систем в государственном секторе на данный момент является предметом споров, так как технология больше ассоциирует себя с криптовалютами и «теневой частью интернета». Тем не менее эксперты считают, что применение распределенных реестров способно автоматизировать, упростить и обезопасить обработку большого объема данных, связанных с реестром земельных участков, налогообложением, демографией, занятостью населения, управлением бюджета, судебной деятельностью, проведением выборов и многими другими [12].

На данный момент большинство стран выпускают законопроекты, направленные на легализацию работы с криптовалютами. Таким образом, представители бизнеса для законного проведения операций с применением криптовалют должны получить лицензию и платить налоги. Напрямую это не является способом использования блокчейн, но является новым источником пополнения государственного бюджета за счет легализации нового направления.

#### **Глобальные блокчейн-сети**

Глобально отдельные блокчейн-проекты используются для разных целей по всему миру. Самое известное применение блокчейн на данный момент – это *криптовалюта* Bitcoin. Изначально задуманный как антикризисный инструмент, на данный момент Bitcoin не только является самой известной крупной криптовалютой (капитализация на 7.01.2021 составляет 700,5 млрд долл.) [13], но и признанной «тихой гаванью» среди многих инвестиционных компаний и отдельных представителей отрасли. В качестве примера признания Bitcoin как инвестиционного инструмента можно привести заявление, сделанное в конце 2020 г. Реем Далио, и перевод внушительной суммы из его фонда в эту криптовалюту. Также но-

вости об инвестициях в Bitcoin появляются от других фондов.

На данный момент явление криптовалют носит глобальный характер. Даже в странах, где законодательно не разрешено использовать криптовалюты, есть возможность зайти на иностранную биржу и работать с деньгами новой формации.

Также активно распространяются *смарт-контракты*, основанные на блокчейн-системе Ethereum. Все больше проектов используют эту технологию для регламентирования внутреннего взаимодействия пользователей. Например, уже существуют сервисы, обеспечивающие сбор средств на развитие частных проектов от всех желающих (краудфандинг).

На данный момент это основные способы применения данной технологии, выявленные автором.

Несмотря на большое количество вариаций использования технологии, все их возможно разделить на три основных направления.

#### **Три основных направления**

На основании изложенной выше информации можно сделать вывод о том, что есть три основных направления применения блокчейн: криптовалюты, отслеживание уникальности предметов и смарт-контракты, регламентирующие выполнение определенных обязательств между сторонами, заключившими их.

На данный момент отсутствует законодательная база для полноценного использования двух из этих направлений, а именно для реализации криптовалют и применения смарт-контрактов в России. Таким образом, на данный момент весь потенциал применения блокчейн-технологий сводится к использованию этого инструмента в качестве системы для отслеживания и использования уникальных предметов.

#### **Возможное применение блокчейн в России**

В качестве применения блокчейн с использованием возможности отслеживания уникальных вещей автор статьи предлагает создание программного обеспечения для верификации документов государственного образца на основе этой технологии.

Суть предлагаемого решения заключается в создании базы данных документов об образовании и прочих достижениях пользователя на федеральном или глобальном уровне. Такой инструмент позволит оперативно проверить предоставляемый человеком документ на подлинность или вовсе избавит от необходимости предоставлять документы в ту или иную организацию.

Кейсы для применения такого решения могут быть следующие:

**Кейс 1.** Работодатель не будет требовать документы о наличии высшего или среднего специального образования, а просто зайдет в данную систему и увидит верифицированные электронные версии документов, проверенные и добавленные организацией, выдавшей данный документ.

**Кейс 2.** Студенту не потребуется собирать портфолио для начала или продолжения обучения в

учебных заведениях, так как все дипломы о низших ступенях образования будут уже доступны выбранному высшему учебному заведению.

Также данная система позволит бороться с поддельными дипломами о высшем образовании и прочими нелегальными документами.

В случае признания юридической силы документов, используемых в системе, появляется потенциал расширения системы на другие сферы взаимодействия между пользователями.

**Кейс 3.** На основе смарт-контрактов существует возможность оцифровать документооборот в микрофинансовых организациях, что позволит выдавать займы без залога и также осуществлять добор по договорам в рамках системы без посещения офиса организации или вызова курьера. Данное решение способно существенно удешевить процесс взаимодействия с клиентом.

**Кейс 4.** На основе смарт-контрактов также возможно автоматизировать процесс взаимодействия между поставщиками и их клиентами. За счет такого решения появится возможность отслеживать местоположение и даже качество товара в пути, а также проводить оплату и использовать закрывающие документы. Таким образом, есть возможность полностью автоматизировать документооборот между предприятиями, а безопасность технологии и возможность администрирования уникальных экземпляров документов делают эту систему простой в использовании и надежной для реализации данных бизнес-задач.

Кейсы 1 и 2 данной системы имеют большой потенциал коммерческого применения на сервисах поиска работы, таких как hh.ru. Потенциал коммерческого использования снимает необходимость платного внедрения для учебных и прочих муниципальных заведений, выдающих документы.

Помимо описанных потенциальных пользователей системы, также необходимы для полноценного функционирования системы администрации проекта и представители высших учебных заведений, которые обеспечат своевременное добавление информации о документах (рис. 1).

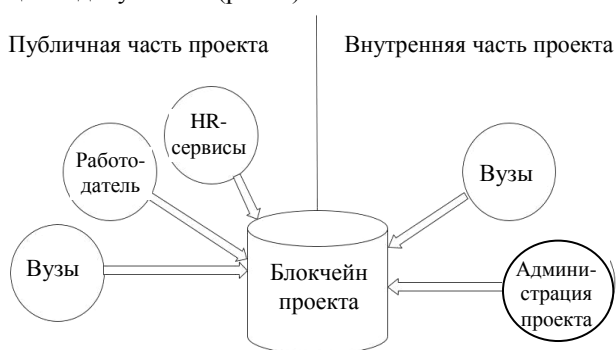


Рис. 1. Потенциальные пользователи предлагаемого программного продукта

Процесс проверки блоков, присущий блокчейн-системам, возможно реализовать за счет мощностей пользователей, обеспечивающих администрирова-

ние документов, что позволит существенно сократить нагрузки на сервера. Исходя из данного предложения, предлагается трехуровневая архитектура приложения (рис. 2), где в качестве клиентских приложений могут быть веб-сервис или мобильное приложение, в качестве бэкенда – любое доступное решение, позволяющее обрабатывать запросы с клиентских приложений, а в качестве базы данных – блокчейн-реализация хранилища.

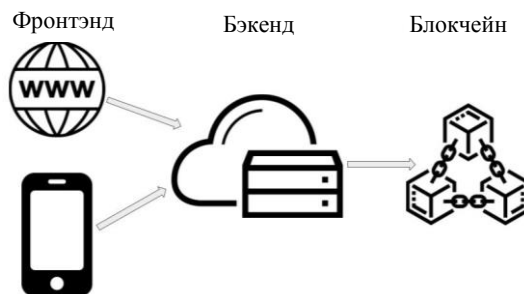


Рис. 2. Архитектура предлагаемого программного продукта

Для данной системы предлагается использовать блокчейн на основе открытого кода проекта Ethereum, т.к. этот программный продукт является передовым в использовании смарт-контрактов, а также имеет одну из самых больших баз знаний.

Для реализации бэкенда и взаимодействия с блокчейн-сетью предлагается использовать фреймворк Symfony на основе языка PHP, так как это современный и быстрый фреймворк, способный обеспечить удобную работу с базой данных такого типа.

На фронтэнд-части проекта предлагается использовать технологию ReactJS, способную обеспечить реализацию веб-версии проекта, а также мобильные приложения на операционных системах Android и iOS. Данное решение существенно снизит затраты и сроки, выделяемые на разработку.

Таким образом, предлагаемое решение позволит упростить процесс принятия людей на работу или обучение, обеспечить принимающей стороне оперативный и надежный доступ к оригиналам документов. Но использование блокчейн-технологий наряду с перспективами имеет и ряд ограничений для использования.

#### Ограничения применения блокчейн-технологий

Первое и самое существенное ограничение, не позволяющее развивать основное направление применения блокчейн-технологий, – это *отсутствие законодательной базы* для работы с криптовалютами или вовсе их *запрет*. На данный момент, помимо стран, полностью разрешивших и регламентирующих работу с деньгами новой формации (США, Япония, Сингапур, Канада и др.), существуют страны, не имеющие законодательных основ для обеспечения законной деятельности в этой сфере. Среди таких стран Германия, Италия, Хорватия, Казахстан, Бельгия, Бразилия, Колумбия и др.

Также существуют страны, которые полностью запретили использование криптовалют. Среди про-

тивников данного применения блокчейн-технологий находятся Бангладеш, Боливия, Китай, Эквадор, Исландия, Индонезия, Кыргызстан, Ливан, Венесуэла, Тайланд, Вьетнам и пр.

Вторым существенным ограничением является *отсутствие законодательной базы* для использования смарт-контрактов. На текущий момент законно использовать это направление блокчейн можно лишь в Беларуси. Информацию по регулированию смарт-контрактов в других странах автору найти не удалось.

Необходимость признания юридической силы смарт-контрактов позволит реализовать предложенную систему с целью упрощения взаимодействия учебных заведений, студентов, выпускников и работодателей.

Наряду с отсутствием юридической силы смарт-контрактов существует еще одно ограничение, не связанное напрямую с блокчейн-технологиями. В крупных и государственных организациях зачастую требуется предоставить оригинал документа об образовании при процессе трудоустройства.

Третьим ограничением, влияющим на развитие технологии, является *высокий «порог входа»*. Блокчейн является смесью из нескольких инструментов, объединенных в одно целое. Таким образом, для начала разработки с применением распределенных реестров на основе блокчейн необходимо провести большую исследовательскую работу. Это сразу отсеивает часть специалистов, желающих использовать данный инструмент.

Четвертым ограничением, выявленным в процессе исследования, является *сложность внедрения*. Это ограничение выявляется в частных способах применения технологии: когда речь идет об отслеживании истории товара, требующего сертификацию и подтверждение качества. Например, для внедрения подобной системы для отслеживания пути медикаментов от производителя до прилавка необходимо внедрить систему и обучить работать с ней персонал производителя, персонал логистической компании (в том числе пунктов пересылки), персонал аптечных сетей. Только в таком случае система будет выполнять свою функцию.

#### **Заключение**

Исходя из всего вышесказанного, автор считает, что данная технология позволит существенно упростить процессы принятия людей на работу или обучение. Помимо этого, предлагаемое решение способно снизить риск подделки документов.

На основании обзорной части статьи можно сделать выводы и о перспективах технологии блокчейн в целом.

Несмотря на существенные ограничения в применении блокчейн, технология имеет большой потенциал для развития и массу направлений, в которых ее можно использовать.

Как показало исследование, потенциал применения блокчейн в корпоративном секторе практически не имеет границ. Об этом свидетельствует то, что использование блокчейн способно существенно

увеличить надежность системы. Также блокчейн предоставляет инструменты для развития в самых разных функциональных направлениях для IT-проектов.

Криптовалюты характеризуются не только как антикризисный инструмент, но и как более прозрачный, безопасный и надежный способ проведения финансовых операций. Наличие инвестиций в Bitcoin, Ethereum и другие крипто-проекты не только со стороны частных инвесторов, но и со стороны крупных инвестиционных и венчурных фондов это подтверждают.

Технология развивается очень быстро, а ограничения, которые привел автор в данной статье, оказывают лишь временное влияние. Например, в России и Китае официально использовать криптовалюту как платежный инструмент нельзя. Но данный запрет имеет место быть лишь по той причине, что и Россия, и Китай находятся в процессе создания государственной валюты того же формата. Такое поведение по сути является проявлением конкуренции.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод о больших перспективах развития систем блокчейн-технологий и о широком спектре возможностей для реализации потенциала данного инструмента.

#### *Литература*

1. Что такое блокчейн? Расскажем простыми словами // Coinspot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://coinspot.io/> свободный (дата обращения: 13.08.2020).
2. R3 Corda [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.corda.net/>, свободный (дата обращения: 20.08.2020).
3. Герман Греф призвал к легализации биткоина и других криптовалют в России // RUSBASE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rb.ru/> (дата обращения: 02.09.2020).
4. Подгорный А.А. Практика реализации задач банковской системы с использованием технологии блокчейн // Банкаўскі вестник: інф.-аналіт. і наўч.-практ. журнал Нацыянальнага банка Рэспублікі Беларусь. – 2017. – № 11. – С. 56–58.
5. Bank-based blockchain projects are going to transform the financial services industry // TechCrunch [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://techcrunch.com/2018/01/28/bankbased-blockchain-projects-are-going-to-transform-the-financial-services-industry>, свободный (дата обращения: 09.05.2020).
6. Блокчейн ICO – угроза третьей мировой? // Forbes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.forbes.ru/>, свободный (дата обращения: 16.08.2020).
7. BlockStack // BlockStack [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blockstack.org/>, свободный (дата обращения: 20.08.2020).
8. BlockSign // BlockSign [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blocksign.com/>, свободный (дата обращения: 20.10.2020).
9. Беларусь первой в мире законодательно закрепила smart-контракт // Новостной портал «Белта+» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/belarus-pervoj-v-mire-zakonodatelno-zakrepila-smart-kontrakt-281784-2017/>, свободный (дата обращения: 25.10.2020).

10. Шарова В.А., Данеева С.О. ICO – инновационный способ финансирования деятельности компаний // Теоретическая и прикладная экономика. – 2018. – № 3. – С. 141–150. – Режим доступа: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=26784](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=26784), свободный (дата обращения: 25.10.2020).

11. Селиверстова Н. Виртуальное будущее: ЦБ начал разработку национальной криптовалюты // РИА «Новости» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ria.ru/>, свободный (дата обращения: 23.08.2020).

12. Центр компетенций по взаимодействию с международными организациями // РИА «Новости» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://globalcentre.hse.ru/news/221934793.html>, свободный (дата обращения: 23.10.2020).

13. CoinMarketCap // CoinMarketCap [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://coinmarketcap.com/ru/currencies/bitcoin/>, свободный (дата обращения: 20.10.2020).

3. German Gref called for the legalization of Bitcoin and other foreign currencies in Russia [Electronic resource] // RUSBASE. URL: <https://rb.ru/> (Accessed: September 02, 2020) (in Russ.).

4. Podgorny A.A. Practice of implementing the tasks of the banking system using blockchain technology. Podgorny [Electronic resource] // Bankaŭski Vesnik: information-analytical and scientific-practical journal of the National Bank of the Republic of Belarus / founder of the National Bank of the Republic of Belarus, 2017, no. 11, pp. 56–58.

5. Bank-based blockchain projects are going to transform the financial services industry [Electronic resource] // Available at: <https://techcrunch.com/2018/01/28/bankbased-blockchain-projects-are-going-to-transform-the-financial-services-industry/> (Accessed: May 13, 2020) (in Russ.).

6. Blockchain ICO – a third world threat? [Electronic resource] // Forbes. Available at: <https://www.forbes.ru/> (Accessed: August 16, 2020) (in Russ.).

7. BlockStack [Electronic resource]. Available at: <https://blockstack.org/>, free (Accessed: August 19, 2020) (in Russ.).

8. BlockSign [Electronic resource]. Available at: <https://blocksign.com/>, free (Accessed: October 20, 2020) (in Russ.).

9. Belarus was the first in the world to legislate a smart contract [Electronic resource] // News portal «Belta +». Available at: <https://www.belta.by/economics/view/belarus-pervov-mire-zakonodatelno-zakrepila-smart-kontrakt-281784-2017/>, free (Accessed: October 25, 2020) (in Russ.).

10. Sharova V.A., Daneeva S.O. ICO – an innovative way of financing companies' activities [Electronic resource] // Theoretical and Applied Economics. 2018, no. 3, pp. 141–150. Available at: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=26784](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=26784), free (Accessed: October 25, 2020).

11. Seliverstova N. Virtual future: the Central Bank began to develop a national cryptocurrency [Electronic resource] // RIA Novosti. Available at: <https://ria.ru/> (Accessed: August 23, 2020) (in Russ.).

12. Competence Center for Interaction with International Organizations [Electronic resource] // RIA Novosti. Available at: <https://globalcentre.hse.ru/news/221934793.html> (Accessed: October 23, 2020) (in Russ.).

13. CoinMarketCap [Electronic resource] // Available at: <https://coinmarketcap.com/ru/currencies/bitcoin/>, free (Accessed: October 20, 2020) (in Russ.).

### Владимиров Михаил Владимирович

Аспирант каф. автоматизации обработки информации (АОИ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-952-891-14-33  
Эл. почта: [mikhail.v.vladimirov@tusur.ru](mailto:mikhail.v.vladimirov@tusur.ru)

Vladimirov M.V.

### Application Areas for Blockchain Systems

This article presents an analysis of the possibilities of using Blockchain technology within the framework of programs for the digitalization of the economy and the development of the educational sector. Three main areas of blockchain use are highlighted: cryptocurrencies, tracking the uniqueness of items, and smart contracts. A classification of blockchain-based systems is also proposed, dividing systems by volume. The modern methods of using this technology for the implementation of various tasks at the level of particular companies, countries and the world are considered, and a promising solution is proposed in accordance with modern trends and directions of development. The problems related to the implementation of blockchain systems are also suggested.

**Keywords:** blockchain, systems, application, classification, distributed ledgers, use.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-69-74

### References

1. What is blockchain? Let's tell in simple words [Electronic resource] // Coinspot Available at: <https://coinspot.io/>, free (Accessed: August 13, 2020) (in Russ.).

2. R3. Corda [Electronic resource]. – Available at: <https://www.corda.net/>, free (Accessed: August 20, 2020) (in Russ.).

### Mikhail V. Vladimirov

Postgraduate student, Department Data Processing Automation (AOI), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-891-14-33  
Email: [mikhail.v.vladimirov@tusur.ru](mailto:mikhail.v.vladimirov@tusur.ru)

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**





УДК 621.314

А.В. Осипов, В.М. Рулевский

## Резонансный LCL-преобразователь с частотно-широотно-импульсным регулированием

Рассмотрены особенности частотно-широотно-импульсного регулирования (ЧШИР) в резонансном LCL-преобразователе с активным выпрямителем в режиме параметрической стабилизации выходного тока. Проведен анализ свойств LCL-преобразователя при регулировании выпрямителем, получены фазочастотная характеристика (ФЧХ) и частотная характеристика коэффициента передачи при параметрической стабилизации. Показано, что при регулировании выпрямителем в импеданс резонансного контура вносится дополнительная реактивная составляющая, что при определенных нагрузках приводит к потере контуром резонансной частоты. Получены регулировочная характеристика и функция частотной подстройки в преобразователе при ЧШИР. Показаны энергетические преимущества ЧШИР, заключающиеся в близкой к нулевой фазе тока инвертора и минимизации интервала рекуперации.

**Ключевые слова:** резонансный LCL-преобразователь, частотно-широотно-импульсное регулирование, импедансное преобразование, энергетические характеристики.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-77-83

Резонансные преобразователи на основе контуров последовательно-параллельных топологий [1–13] обладают свойством импедансного преобразования нагрузки, которое позволяет решить задачу формирования требуемого режима ее питания за счет свойств резонансного контура. Прототипом таких преобразователей можно считать параллельный резонансный преобразователь (схема Бушера), однако более широкое распространение получил являющийся ее дальнейшим развитием резонансный преобразователь LCL-топологии, позволяющий обеспечить параметрическое преобразование источника напряжения в источник тока. В отечественной литературе LCL-преобразователь относят к классу индуктивно-емкостных [1], его основной областью применения являются стабилизаторы тока [2], в том числе для систем беспроводной зарядки аккумуляторов [14, 15], где резонансный преобразователь является безальтернативным решением из-за необходимости компенсации существенной реактивной энергии трансформатора с плохой магнитной связью. Свойство параметрической стабилизации позволяет существенно повысить энергоэффективность, так как устранение возмущений нагрузки осуществляется за счет импедансных свойств самого резонансного контура, хотя изменение значения параметрически стабилизируемого параметра (зарядного тока) и требует введения импульсного регулирования.

Способы регулирования LCL-преобразователем рассмотрены в работах [11, 12], где показано, что широко-импульсное регулирование (ШИР) выпрямителем на фиксированной частоте позволяет сохранить свойство параметрической стабилизации на всех углах регулирования [12], однако приводит к сдвигу основных гармоник тока и напряжения инвертора, образованию интервалов рекуперации и ухудшению его энергетических характеристик. В настоящей работе ставится задача анализа свойств LCL-преобразователя с широко-импульсным регулированием выпрямителя в условиях частотной под-

стройки, т.е. при реализации концепции частотно-широотно-импульсного регулирования (ЧШИР) [16], позволяющей устранить интервал рекуперации тока в инверторе.

### Характеристики резонансного LCL-контура при активной нагрузке

Изолированный резонансный LCL-преобразователь (рис. 1) построен на основе инвертора и активного выпрямителя, которые связаны резонансным LCL-контуром, осуществляющим импедансное преобразование нагрузки.

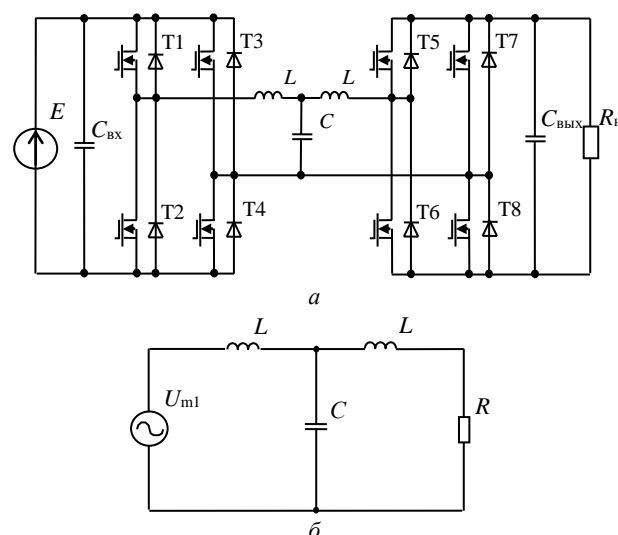


Рис. 1. Резонансный LCL-преобразователь: а – топология с активным выпрямителем; б – резонансный LCL-контур

Частотные свойства LCL-контура можно проанализировать на основе эквивалентной схемы (рис. 1, б) при воздействии первой гармоники напряжения  $U_{m1}$ , тогда импедансно-частотные характеристики

$$\operatorname{Re} Z(\Omega) = R \cdot \frac{Q^2}{\Omega^2} \cdot \frac{1}{1 + \xi^2(\Omega, Q)},$$

$$\operatorname{Im} Z(\Omega) = R \cdot \frac{Q}{\Omega} \left( \Omega^2 - \frac{1 + Q\Omega \cdot \xi(\Omega, Q)}{1 + \xi^2(\Omega, Q)} \right),$$

где  $\Omega$  – относительная частота;  $\xi(\Omega, Q) = Q \frac{\Omega^2 - 1}{\Omega}$  – обобщенная расстройка резонансного контура. Данные характеристики определяют ФЧХ резонансного контура согласно выражению

$$\varphi(\Omega) = \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{Im} Z(\Omega)}{\operatorname{Re} Z(\Omega)} \right),$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Omega}{Q} \left( Q^2 (\Omega^2 - 1)^2 - (\Omega^2 - 1)(Q^2 - 1) \right),$$

показанную на рис. 2, а при разных добротностях. Особенностью *LCL*-контура является изменение квадрантов расположения ФЧХ при изменении нагрузки, причем при  $Q > 1$  появляется вторая высокая резонансная частота  $\Omega_{вч}$ . Коэффициент передачи *LCL*-контура по току  $K_I$  зависит от частоты и для топологий такого типа получен при участии автора в работе [13]

$$K_I(\Omega) = \frac{I_R}{I_{m1}} = \frac{Q}{\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2(\Omega, Q)}}. \quad (1)$$

Коэффициент передачи *LCL*-контура по напряжению

$$K_U(\Omega) = \frac{U_R}{U_{m1}}$$

можно определить с учетом ФЧХ

$$K_U(\Omega) \times K_I(\Omega) = \cos \varphi \rightarrow K_U(\Omega) = \frac{\cos \varphi}{K_I(\Omega)}.$$

Для исследования режима параметрической стабилизации тока удобно ввести безразмерный коэффициент передачи «напряжение–ток», если соотносить его с волновым сопротивлением контура

$$K_{U \rightarrow I}(\Omega) = \frac{I_R}{U_{m1}} \cdot \rho = \frac{U_R}{U_{m1} \cdot R} \cdot \rho = Q \cdot K_U(\Omega).$$

С учетом приведенных выражений для  $K_{U \rightarrow I}$  можно получить аналитическое соотношение

$$K_{U \rightarrow I} = \frac{\sqrt{\Omega^2 + Q^2 (\Omega^2 - 1)^2}}{\sqrt{\frac{\Omega^2}{Q^2} \left( Q^2 (\Omega^2 - 1)^2 - (Q^2 - 1)(\Omega^2 - 1) \right)^2 + 1}}.$$

На резонансной частоте, т.е. при  $\Omega = 1$ , импедансные характеристики сводятся к выражениям

$$\operatorname{Re} Z(\Omega) = R \cdot Q^2 = \frac{\rho^2}{R}, \quad \operatorname{Im} Z(\Omega) = 0,$$

а коэффициенты передачи резонансного *LCL*-контура к значениям

$$K_I = Q, \quad K_U = 1/Q, \quad K_{U \rightarrow I} = 1.$$

Приведенные характеристики показывают пропорциональность коэффициента передачи по напряжению сопротивлению нагрузки (рис. 2, б), что приводит к параметрической стабилизации выходного

тока при ее изменении (рис. 2, в). Таким образом, на резонансной частоте происходит импедансное преобразование источника напряжения в источник тока, что является основным свойством *LCL*-топологии. Следует отметить, что на другой резонансной частоте  $\Omega_{вч} = \sqrt{2}$  резонансный контур не обладает свойствами импедансного преобразования, так как  $K_U = 1$ .

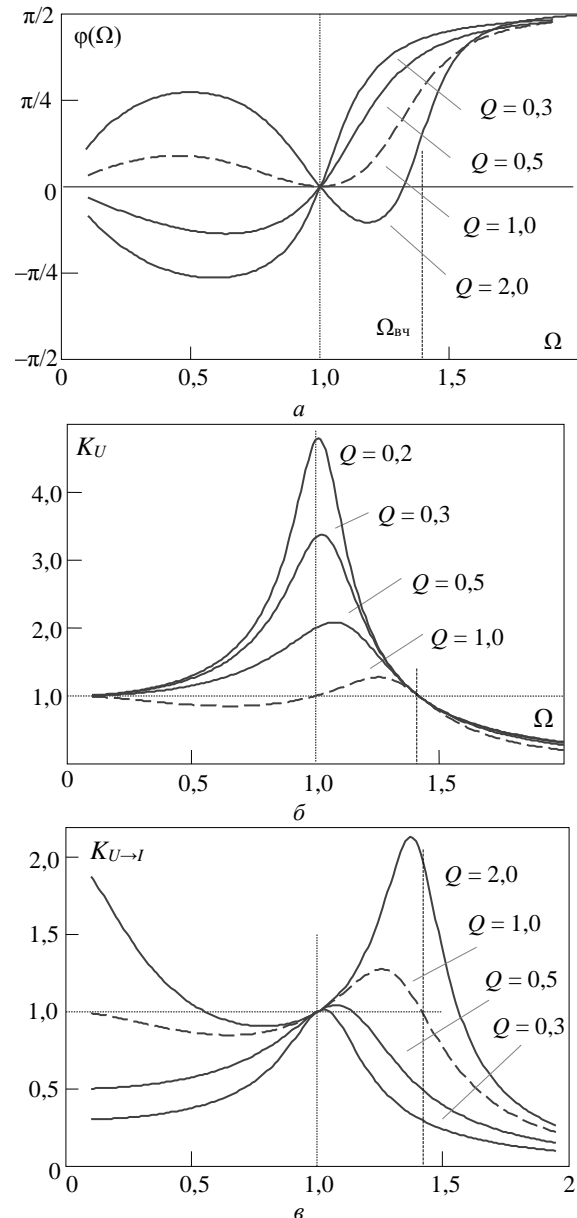


Рис. 2. Частотные характеристики резонансного *LCL*-контура: а – ФЧХ; б –  $K_U$ ; в –  $K_{U \rightarrow I}$

Неизменность коэффициента передачи  $K_{U \rightarrow I}$  на резонансной частоте при изменении нагрузки объясняет тот факт, что импедансные преобразователи обычно работают на фиксированной частоте.

#### ЧШИР напряжения выпрямителя в *LCL*-преобразователе

Способы регулирования параметрически стабилизируемого параметра в *LCL*-преобразователе исследовались в вариантах фазового [11] и широтно-импульсного регулирования [12]. В последнем слу-

чае в такт работы выпрямителя вводится интервал закороченного состояния выпрямителя, определяемый углом регулирования  $\beta$ , что позволяет избежать рекуперации энергии нагрузки (выходного фильтра) в резонансный контур и обеспечивает большую энергетическую эффективность. В работе [12] показано, что при введении регулирования на постоянной резонансной частоте  $\Omega = 1$  коэффициент передачи описывается выражением

$$K_{U \rightarrow I} = \cos^2 \beta,$$

при этом в процессе регулирования  $K_{U \rightarrow I}$  стабилен при изменении нагрузки, т.е. условие параметрической стабилизации соблюдается во всем диапазоне регулирования. Физически при регулировании коэффициент передачи  $K_{U \rightarrow I}$  можно трактовать как выходной ток по отношению к своему максимальному значению, соответствующему углу  $\beta = 0$ .

Свойством ШИР на частоте  $\Omega = 1$  является формирование в инверторе фазы тока  $\varphi_{инв} = \beta$ , которая превышает его ток из-за появления интервалов рекуперации. Решением проблемы минимизации интервалов рекуперации может быть применение концепции ЧШИР, высказанной в [16] и заключающейся в том, что в преобразователе с ШИР за счет частотной подстройки фаза тока инвертора может быть сведена к нулю  $\varphi_{инв} \rightarrow 0$ , что позволяет избежать завышения тока инвертора. Таким образом, при ЧШИР фазы тока в инверторе  $\varphi_{инв}$  и выпрямителе  $\varphi_{выпр}$  преобразователя можно свести к условиям

$$\varphi_{инв} = 0, \quad \varphi_{выпр} = -\beta. \quad (2)$$

Для определения закона подстройки частоты необходимо определить ФЧХ тока резонансного LCL-контра, сложность вычисления которой в данном случае заключается в том, что выпрямитель вносит в LCL-контур реактивный импеданс, что обусловлено односторонним характером ШИР и ненулевой фазой тока выпрямителя (рис. 3). Описать зависимость импеданса выпрямителя от угла регулирования  $\beta$  можно, связав амплитуду первой гармоники на входе выпрямителя с выходными параметрами преобразователя [16]:

$$U_{m1 \text{ выпр}} = \frac{4}{\pi} U_{\text{вых}} \cdot \cos \beta,$$

$$I_{\text{выпр}} = \frac{\pi}{2} I_{\text{вых}} \cdot \frac{1}{\cos^2 \beta},$$

это позволяет получить комплексное сопротивление выпрямителя

$$\dot{Z}_{\text{выпр}} = \frac{8}{\pi^2} R_n \cos^3 \beta \cdot \cos \varphi_{\text{выпр}} + j \frac{8}{\pi^2} R_n \cos^3 \beta \cdot \sin \varphi_{\text{выпр}},$$

$$Z_{\text{выпр}} = |\dot{Z}_{\text{выпр}}| = \frac{8}{\pi^2} R_n \cdot \cos^3 \beta,$$

используя условие равенства фазы тока углу регулирования (2) можно получить входное сопротивление выпрямителя по переменному току

$$\text{Re } Z_{\text{выпр}}(\beta) = R_{\text{ac}} = \cos^4 \beta \cdot \frac{8}{\pi^2} R_n,$$

$$\text{Im } Z_{\text{выпр}}(\beta) = R_{\text{ac}} \cdot \text{tg } \beta.$$

С учетом комплексного импеданса выпрямителя частотные характеристики резонансного LCL-контра примут вид

$$\text{Re } Z(\Omega, \beta) = \rho \cdot \frac{Q(\beta)}{\Omega^2} \cdot \frac{1}{1 + (\xi(\Omega, \beta) - \text{tg } \beta)^2}, \quad (3)$$

$$\text{Im } Z(\Omega, \beta) = \frac{\rho}{\Omega} \left( \Omega^2 - \frac{1 + (Q(\beta)\Omega - \text{tg } \beta)(\xi(\Omega, \beta) - \text{tg } \beta)}{1 + (\xi(\Omega, \beta) - \text{tg } \beta)^2} \right).$$

В данных выражениях добротность является функцией угла регулирования, что обусловлено наличием на такте управления выпрямителем изменяемого интервала закороченного состояния резонансного контра, что показано также в [16].

$$Q(\beta) = \frac{\rho}{R_{\text{ac}}(\beta)} = \frac{\rho}{\frac{8}{\pi^2} R_n \cos^4 \beta} = \frac{1}{R_n^* \cos^4 \beta},$$

где  $R_n^* = 1/Q$ , сопротивление нагрузки по отношению к своему нормализованному значению.

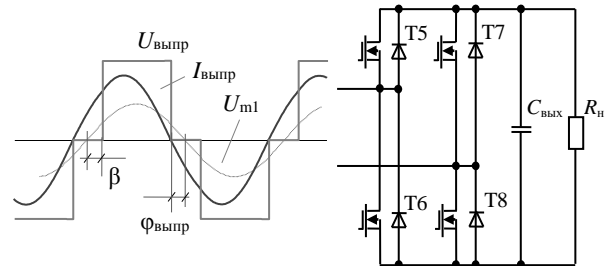


Рис. 3. ЧШИР напряжения выпрямителя

На основе импедансных характеристик (3) получена ФЧХ входного тока резонансного контра, показанная при разных углах регулирования выпрямителем на рис. 4. Видно, что введение угла регулирования  $\beta$  при некоторых нагрузках может привести к отсутствию точек пересечения ФЧХ с осью абсцисс, что физически означает потерю LCL-контуром резонансных частот, значения которых могут быть определены приравниванием мнимой составляющей импеданса контра к нулю и решением полученного уравнения

$$\text{Im } Z(\Omega, \beta) = 0 \rightarrow \rightarrow \Omega^2 - \frac{1 + (Q(\beta) \cdot \Omega - \text{tg } \beta) \cdot (\xi(\Omega, \beta) - \text{tg } \beta)}{1 + (\xi(\Omega, \beta) - \text{tg } \beta)^2} = 0. \quad (4)$$

При нормализованной нагрузке  $R_n^* = 1$  (рис. 4, а) потеря резонансной частоты наступает в области  $\beta < \pi/5$ , однако при  $\beta > \pi/5$  уравнение (4) имеет два корня  $-\Omega_1, \Omega_2$ , в рассматриваемом данном режиме интересен корень  $\Omega_1$ , так как он находится в окрестности частоты  $\Omega_1 \rightarrow 1$ .

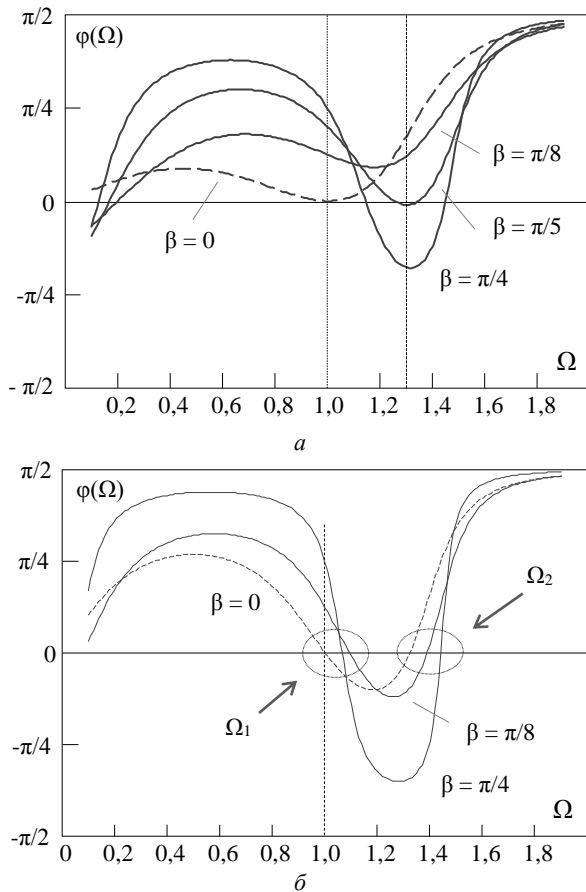


Рис. 4. Фазочастотная характеристика входного тока резонансного  $LCLC$ -преобразователя с ЧШИР при разных углах регулирования:  $a - R_n^* = 1$ ;  $b - R_n^* = 0,5$

При нагрузке  $R_n^* = 0,5$  увеличение добротности приводит к тому, что уравнение (4) имеет два вещественных корня во всем диапазоне изменения  $\beta$  (рис. 4, б). Количественно зависимость резонансной частоты от угла регулирования  $\Omega_1(\beta)$ , т.е. функцию частотной подстройки при ЧШИР, можно получить решением уравнения (4) на интервале  $\Omega \rightarrow 1$ . Ввиду сложности уравнение решено численными методами MathCad, результаты показаны на рис. 5, а. Анализ функции  $\Omega_1(\beta)$  показывает, что увеличение сопротивления нагрузки  $R_n^*$  увеличивает значение частотной подстройки, что объясняется уменьшением добротности. При некотором значении  $R_n^*$  происходит «потеря» вещественных корней в уравнении (4), что и вызывает локальные разрывы функции подстройки частоты  $\Omega_1(\beta)$  (см. рис. 5, а).

Путем моделирования определена критическая точка появления разрыва ФЧХ, равная  $R_n^* = 0,7$ , являющаяся максимальным значением сопротивления нагрузки, при котором осуществим режим ЧШИР выпрямителем в полном диапазоне изменения  $\beta$ .

Регулировочная характеристика резонансного преобразователя по напряжению может быть получена на основе баланса мощности

$$U_{\text{ВЫХ}}^*(\beta, \Omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВЫХ}}},$$

тогда для последовательно-параллельных топологий при регулировании выпрямителем справедливо выражение

$$U_{\text{ВЫХ}}^*(\beta, \Omega) = \frac{I_{\text{м1}}^*(\beta)}{K_I(\Omega)}, \quad (5)$$

где  $I_{\text{м1}}^*(\beta)$  – относительная функция, связывающая ток выпрямителя с выходным током преобразователя, при ЧШИР справедливо  $I_{\text{м1}}^*(\beta) = 1/\cos^2 \beta$ . Таким образом, выражение (5) показывает, что при регулировании преобразователя сложной топологии присутствуют два основных фактора: изменение амплитуды тока за счет импульсного преобразования (в данном случае выпрямителем) и изменение, обусловленное импедансным преобразованием контура. Поэтому в общем случае определение регулировочной характеристики требует функции коэффициента передачи тока  $K_I(\Omega)$ , которая определяется топологией резонансного контура. Интересно, что эти факторы ранее рассматривались автором отдельно при исследовании ЧШИР в  $LC$ -преобразователе [16] и при импедансном преобразовании  $LCLC$ -контуром в системах индукционного нагрева [13]. Таким образом, при ЧШИР выпрямителя регулировочная характеристика примет вид

$$U_{\text{ВЫХ}}^* = \frac{1}{\cos^2 \beta} \times \frac{1}{K_I(\Omega_1(\beta), \beta)},$$

в котором учтено, что при ЧШИР частота является подстраиваемым параметром, функцией угла регулирования

$$K_I(\Omega_1(\beta), \beta) = \frac{Q(\beta)}{\Omega_1(\beta)} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left( Q(\beta) \cdot \frac{\Omega_1(\beta)^2 - 1}{\Omega_1(\beta)} - \text{tg } \beta \right)^2}},$$

где  $Q(\beta) = \frac{1}{R_n^* \cos^4 \beta}$  – функция, учитывающая за-

висимость добротности от угла регулирования. С учетом функции подстройки частоты  $\Omega_1(\beta)$  в граничных условиях ЧШИР регулировочная характеристика может быть записана в виде

$$U_{\text{ВЫХ}}^*(\beta, R_n^*) = \cos^2 \beta \cdot R_n^* \cdot \Omega_1(\beta) \cdot \sqrt{1 + \left( \xi_1(\beta, R_n^*) - \text{tg } \beta \right)^2},$$

где

$$\xi_1(\beta, R_n^*) = Q(\beta) \cdot \frac{\Omega_1(\beta)^2 - 1}{\Omega_1(\beta)} = \frac{1}{R_n^* \cos^4 \beta} \cdot \frac{\Omega_1(\beta)^2 - 1}{\Omega_1(\beta)},$$

функция обобщенной расстройки контура соответствующая требуемой резонансной частоте  $\Omega_1(\beta)$ .

В режиме параметрической стабилизации тока удобно соотнести регулировочную характеристику к нагрузке, в данном случае к  $Q = 1/R_n^*$ , и выразить, таким образом, коэффициент передачи «напряжение–ток»

$$K_{U \rightarrow I}(\beta, R_n^*) = Q(\beta, R_n^*) \cdot U_{\text{ВЫХ}}^*(\beta, R_n^*).$$

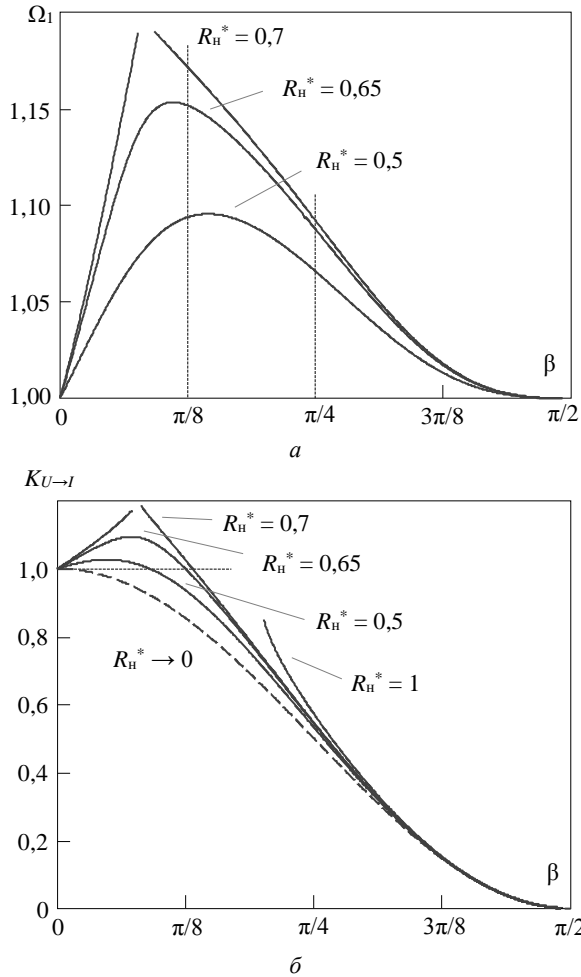


Рис. 5. Характеристики LCL-преобразователя при разных нагрузках: а – подстройка частоты; б – регулировочная характеристика

Совместно с ФЧХ данное выражение позволяет получить математическую связь тока с углом регулирования  $\beta$  при разных нагрузках. Регулирование коэффициента передачи при импедансном преобразовании можно описать выражением

$$K_{U \rightarrow I}(\beta, R_n^*) = \cos^2 \beta \times \Omega_1(\beta) \sqrt{1 + (\xi_1(\beta, R_n^*) - \operatorname{tg} \beta)^2}$$

графически показанным на рис. 5, б. В такой интерпретации выражение  $K_{U \rightarrow I}(\beta, R_n^*)$  показывает значение параметрически стабилизируемого тока в процессе ЧШИР выпрямителем. Характеристика демонстрирует, как и характеристика подстройки частоты (см. рис. 5, а), участок разрыва функции, что ограничивает диапазон допустимых углов регулирования. Участок  $K_{U \rightarrow I}(\beta, R_n^*) > 1$  (см. рис. 5, б) объясняется одновременным присутствием двух факторов: собственно, изменения угла регулирования и смещения частоты. В отличие от случая ШИР при  $\Omega = 1$  при ЧШИР нарушаются свойства параметрической стабилизации, что можно оценить зависимостью  $K_{U \rightarrow I}(\beta, R_n^*)$  от нагрузки.

Проведено моделирование резонансного LCL-преобразователя при регулировании выпрямителя в OrCad 9.2 с параметрами  $L = 15,6$  мкГн,  $C = 0,5$  мкФ,

$R_n = 6$  Ом, что обеспечивает относительную нагрузку  $R_n^* = 0,5$ . Результаты моделирования при ШИР на фиксированной резонансной частоте  $f = 100$  кГц при угле регулирования  $\beta = \pi/5,4$  приведены на рис. 6, а, можно отметить существенную фазу тока инвертора  $\Phi_{инв}$  и большой выключаемый ток.

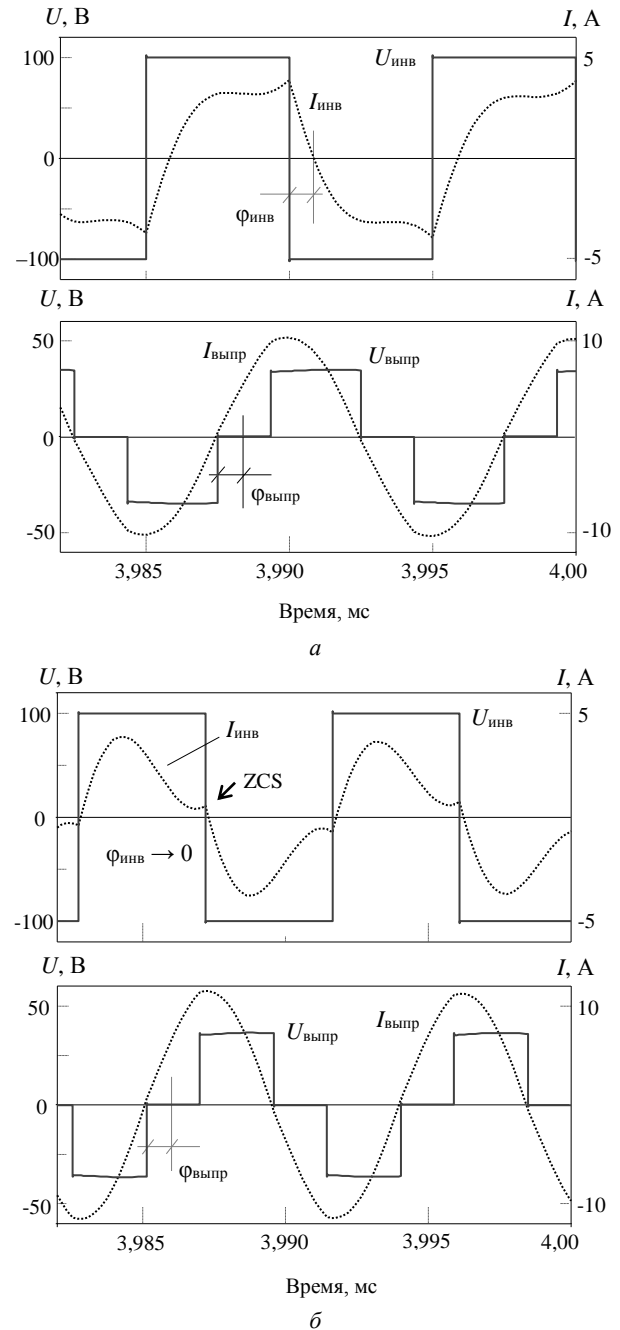


Рис. 6. Результаты моделирования резонансного LCL-преобразователя при  $R_n^* = 0,5$ : а – при ШИР; б – при ЧШИР

Результаты моделирования с частотной подстройкой при ЧШИР регулировании представлены при частоте  $f = 112$  кГц (рис. 6, б), для стабилизации такого же тока соответствующего  $K_I = 0,7$ , требуется другой угол регулирования  $\beta = \pi/4,8$ . Частотная подстройка позволила минимизировать фазу тока в инверторе  $\Phi_{инв} \rightarrow 0$  и получить выключение транзисторов при токе, близком к нулевому, т.е. ZCS.

### Заключение

Обобщая, можно сказать, что в целом в резонансном *LCL*-преобразователе при ЧШИР выпрямителем в области частот  $\Omega \rightarrow 1$  удастся существенно уменьшить интервал рекуперации тока инвертора и получить режим коммутации *ZVS+ZCS*. При этом формируется режим, близкий к режиму параметрической стабилизации тока, так как зависимость  $K_{U \rightarrow I}$  от нагрузки незначительна (см. рис. 5, б). Регулирование в полном диапазоне может быть реализовано в области нагрузок, ограниченной значением  $R_n^* > 0,7$  (см. рис. 5, б), ограничение вызвано разрывами в регулировочных и частотных характеристиках, обусловленными зависимостью ФЧХ от угла регулирования  $\beta$  (см. рис. 4).

Таким образом, из-за затруднений реализации ЧШИР выпрямителя на нагрузках с большим сопротивлением эффективной областью применения этой концепции в резонансном *LCL*-преобразователе являются изолированные зарядные устройства, например преобразователи для беспроводного заряда аккумуляторов от напряжения промышленной сети.

### Литература

1. Милых А.Н. Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока / А.Н. Милых, И.В. Волков, Б.Е. Кубышин. – Киев: Наук. думка, 1964. – 306 с.
2. Дозоров С.А. Исследование и разработка индуктивно-емкостных источников питания: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2013. – 179 с.
3. Фролов Н.А. О параметрической стабилизации автономного резонансного инвертора с помощью нагрузочного контура третьего порядка / Н.А. Фролов, А.Ф. Ягудин // *Электричество*. – 2009. – № 7. – С. 68–69.
4. Bhat A.K.S. Analysis and Design of LCL-Type Series Resonant Converter // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 1994. – Vol. 41, No. 1. – P. 118–124.
5. Zeng J. LCL-resonant single-switch isolated DC-DC-converter / J. Zeng, W. Qiao, L. Qu // *IET Power Electronics*. – 2015. – Vol. 8, No. 7. – P. 1209–1216.
6. Zeng J. A single-switch LCL-resonant isolated DC-DC-converter / J. Zeng, W. Qiao, L. Qu // *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. – 2013. – P. 5496–5502.
7. Chandrasekhar P. Design of LCL-Resonant Converter for Electrolyser / P. Chandrasekhar, S. Rama Reddy // *The Annals of «Dunarea de Jos» University of Galati Fascicle*. – 2010. – Vol. 33, No. 1. – P. 5–11.
8. Borage M. Analysis and Design of an LCL-T-Resonant Converter as a Constant-Current Power Supply / M. Borage, S. Tiwari, S. Kotaiah // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2005. – Vol. 52, No. 6. – P. 1547–1554.
9. Dieckerhoff S. Design of an IGBT-based LCL-resonant inverter for high-frequency induction heating / S. Dieckerhoff, M.J. Ruan, R.W. De Doncker // *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting*. – 1999. – Vol. 3. – P. 2039–2045.
10. Zgraja J. Susceptibility of the LLC Resonance Generator for Induction Heating on Changes in Load Parameters Caused by Heating the Charge // *Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS)*. – 2018. – P. 1–5.
11. Osipov A.V. LCL-T-resonant converter based on dual active bridge topology in solar energy applications / A.V. Osipov, Y.A. Shinyakov, V.N. Shcolnyi, M.S. Sakharov // *Journal of aerospace technology and management*. – 2017. – Vol. 9, No. 2. – P. 248–254.
12. Осипов А.В. Вольтодобавочный резонансный LCL-T-преобразователь для автономных систем электропитания на возобновляемых источниках энергии / А.В. Осипов, С.А. Запольский // *Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329, № 3. – С. 77–78.
13. Земан С.К. Согласование параметров индуктора и преобразователя частоты с помощью последовательно-параллельного резонансного контура / С.К. Земан, Ю.М. Казанцев, А.В. Осипов // *Индукционный нагрев*. – 2013. – № 2. – С. 25–32.
14. Luh M. Bidirectional soft-switching DC/DC-converter for highly efficient EV chargers: Comprehensive analysis of a 20 kW CLLLC converter prototype for / M. Luh, T. Blank, M. Weber // *PCIM Europe digital days 2020 International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. – 2020. – P. 1–8.
15. Yu S. A High Frequency CLLLC-Bi-directional Series Resonant Converter DAB Using an Integrated PCB Winding Transformer / S. Yu, C. Hsiao, J. Weng // *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. – 2020. – P. 1074–1080.
16. Осипов А.В. Определение характеристик фазовой подстройки частоты в последовательном резонансном преобразователе при широтно-импульсном регулировании // *Доклады ТУСУР*. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 111–116.

### Осипов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-44-75  
Эл. почта: ossan@mail.ru

### Рулеский Виктор Михайлович

Д-р техн. наук, доцент, ректор ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: rector@tusur.ru

Osipov A.V., Rulevskiy V.M.

### Resonant LCL Converter with Frequency-Pulse-Width Control

The paper considers the features of frequency-pulse-width control in a resonant LCL converter with an active rectifier in the mode of parametric stabilization of the output current. The analysis of the properties of the LCL converter during regulation by the rectifier is carried out, the phase-frequency characteristic and the coefficient of parametric stabilization are obtained. It is shown that the rectifier introduces a reactive component into the impedance of the resonant circuit. It is illustrated that the introduction of the control angle leads to the loss of roots by the equation on a part of the load range.

The estimation of the frequency adjustment in the converter is carried out, the control characteristic is obtained, the energy advantages of frequency-pulse-width control are demonstrated, which consists in the zero phase of the inverter current and minimization of the recuperation interval.

**Keywords:** resonant LCL-converter, frequency-pulse-width control, impedance conversion, energy performance.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-77-83

#### References

1. Milach A.N., Volkov I.V., Kubyshkin B.E. [Inductive-capacitive voltage converters in current sources]. Kiev, Science, 1978. 306 p. (in Russ.).
2. Dozorov S.A. *Issledovanie i razrabotka induktivno-emkostnykh istochnikov pitaniya* [Research and development of inductive-capacitive power source]. Diss. ... Candidate of Science in Engineering, SPb., 2013. – 179 p. (in Russ.).
3. Frolov N.A. Yagudun A.F. [On parametric stabilization of an autonomous resonant inverter using a third-order load circuit]. *Electricity*, 2009, no. 7, pp. 68–69 (in Russ.).
4. Bhat A.K.S. Analysis and Design of LCL-Type Series Resonant Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1994, vol. 41, no. 1, pp. 118–124.
5. Zeng J., Qiao W., Qu L. LCL-resonant single-switch isolated DC–DC converter. *IET Power Electronics*, 2015, vol. 8, no. 7, pp. 1209–1216.
6. Zeng J., Qiao W., Qu L. A single-switch LCL-resonant isolated DC-DC converter. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 5496–5502.
7. Chandrasekhar P., Rama Reddy S. Design of LCL-Resonant Converter for Electrolyser. *The Annals of «Dunarea de Jos» University of Galati Fascicle*, 2010, vol. 33, no. 1, pp. 5–11.
8. Borage M., Tiwari S., Kotaiah S. Analysis and Design of an LCL-T-Resonant Converter as a Constant-Current Power Supply. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, vol. 52, no. 6, pp. 1547–1554.
9. Dieckerhoff S., Ruan M.J., De Doncker R.W. Design of an IGBT-based LCL-resonant inverter for high-frequency induction heating. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting*, 1999, vol. 3, pp. 2039–2045.
10. Zgraja J. Susceptibility of the LLC Resonance Generator for Induction Heating on Changes in Load Parameters Caused by Heating the Charge. *Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EP-MCCS)*, 2018, pp. 1–5.

11. Osipov A.V., Shinyakov Y.A., Shcolnyi V.N., Sakharov M.S. LCL-T resonant converter based on dual active bridge topology in solar energy applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 248–254.

12. Osipov A.V., Zapolskiy S.A. [Boost type resonant LCLJT converter for autonomous power supply system from renewable sources]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 77–78 (in Russ.).

13. Zeman S.K., Kazantzev Yu.M., Osipov A.V. [Heating inductor and frequency converter parameter conditioning by using of series-parallel resonance circuit]. *Induction Heating*, 2013, no. 2, pp. 25–32 (in Russ.).

14. Luh M., Blank T., Weber M. Bidirectional soft-switching DC/DC-converter for highly efficient EV chargers: Comprehensive analysis of a 20 kW CLLLC-converter prototype for. *PCIM Europe digital days 2020 International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2020, pp. 1–8.

15. Yu S., Hsiao C., Weng J. A High Frequency CLLLC Bi-directional Series Resonant Converter DAB Using an Integrated PCB Winding Transformer. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2020, pp. 1074–1080.

16. Osipov A.V. [Characterization of phase adjustment of frequency in a series resonant converter with pulse-width regulation]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 111–116 (in Russ.).

---

#### Alexander V. Osipov

Candidate of Science in Engineering, 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

#### Victor M. Rulevskiy

Doctor of Science in Engineering, Associate Professor, Rector TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 51-05-30  
Email: rector@tusur.ru



УДК 621.314

А.С. Асочаков, А.А. Дружинин, И.М. Журавлев, А.А. Лопатин

## Алгоритмы управления многоканальным шунтовым стабилизатором напряжения с цифровой системой автоматического управления

Исследована работа многоканального шунтового преобразователя энергии солнечной батареи с дискретным многозонным регулированием в режиме стабилизации выходного напряжения. Рассмотрены алгоритмы смены зоны регулирования «реле» и «кольцо» для шунтового стабилизатора напряжения. Разработан макетный образец многоканального преобразователя, проведено экспериментальное исследование и анализ переходных процессов при работе шунтового стабилизатора при постоянной нагрузке, а также ее ступенчатом изменении для алгоритмов «реле» и «кольцо».

**Ключевые слова:** шунтовой импульсный стабилизатор, цифровая система управления, S3R, солнечная батарея.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-84-90

Основным источником первичного электропитания для энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) космического аппарата (КА) являются панели солнечной батареи (СБ). Поэтому, вне зависимости от выбранной структуры системы электропитания (СЭП) КА, регулятор мощности СБ является важнейшим узлом ЭПА. Несмотря на большое количество вариантов схемотехнических реализаций ЭПА, наибольшее распространение в СЭП КА на геостационарных орбитах для преобразования энергии СБ получили шунтовые импульсные стабилизаторы напряжения (ШС), что обусловлено минимальным количеством компонентов силовой части [1–12].

Совокупность высоких требований, предъявляемых к ШС СБ в части обеспечения надежности, точности стабилизации и быстродействию системы автоматического регулирования (САР), а также требований к минимизации тепловыделения силовой части привела к использованию многоканальной модуляции потока энергии [3–7, 13–15]. Реализация указанной модуляции происходит за счет разбиения регулятора мощности СБ на большое количество маломощных каналов ШС, коммутируемых на высокой частоте.

В современных работах, посвященных разработке ШС СБ для ЭПА КА, наибольшее распространение получил дискретный многозонный метод регулирования, в зарубежной литературе *sequence switching shunt regulator (S3R)*, подробно описанный как в отечественных, так и в зарубежных источниках [1–10].

Основными преимуществами S3R являются отсутствие сложных алгоритмов коммутации, простота масштабирования управления под произвольное количество каналов ШС, низкие требования к необходимому количеству датчиков и обратной связи по напряжению [5–9].

В настоящее время в ЭПА КА применяются аналоговые системы управления, внедрение цифровой системы регулирования имеет ряд преимуществ перед существующей системой на системном уровне построения СЭП КА. Так, цифровые системы регу-

лирования позволяют достичь стабильных характеристик регуляторов независимо от внешних воздействующих факторов в течение всего срока активного существования, создавать оптимальные с точки зрения переходных процессов законы регулирования, адаптировать законы управления под изменения характеристик первичных источников энергии и перестраивать регулятор при смене работающего преобразователя в составе СЭП при переходе КА с солнечного на теневой участок орбиты и обратно.

ШС, являясь неотъемлемой частью современной СЭП КА, также требует внедрения цифровой системы регулирования. Несмотря на то, что данному направлению посвящен ряд работ [1–10, 16, 17], практической реализации и особенностям работы многоканального ШС с цифровым управлением уделяется недостаточно внимания. В данной работе поставлена цель исследования алгоритмов реализации многозонного регулирования в многоканальном ШС по критерию качества переходных процессов при ступенчатом изменении тока нагрузки.

### Многоканальный шунтовой импульсный преобразователь энергии солнечной батареи

Многоканальный шунтовой преобразователь энергии солнечной батареи (рис. 1) работает в режиме стабилизация выходного напряжения. В данном преобразователе применен принцип управления по отклонению, реализованный с помощью дискретного многозонного способа регулирования напряжения, которое заключается в разбиении всего диапазона регулирования на зоны. Переход из одной зоны в другую реализуется изменением количества каналов секций СБ, подключенных к нагрузке, согласно сигналу регулятора контура напряжения (РКН), выполненного в виде ПИД-регулятора. Сигнал ошибки стабилизации обрабатывается РКН, выходной сигнал которого поступает на блок УПК, формирующий в виде кода набор сигналов управления для каналов ШС.

Схема канала ШС приведена на рис. 2, панель СБ представлена эквивалентной схемой в виде источника постоянного тока  $J$  величиной, равной току

короткого замыкания, и конденсатором  $C_{bs}$ , имитирующим паразитную выходную емкость солнечной панели. Транзистор VT работает в ключевом режиме, обеспечивая импульсное шунтирование СБ. Учитывая, что на входе источник тока дроссель  $L$  выполняет роль не накопительного, а токоограничивающего элемента схемы, снижая амплитуду тока разряда емкости СБ в момент коммутации транзистора VT.

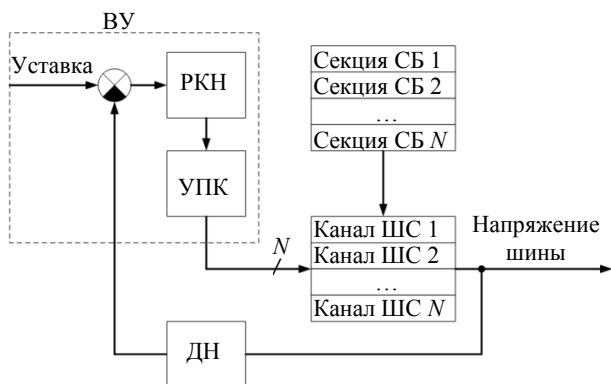


Рис. 1. Функциональная схема системы стабилизации выходного напряжения: ВУ – вычислительное устройство; РКН – регулятор контура напряжения; УПК – устройство подключения каналов; ДН – датчик напряжения

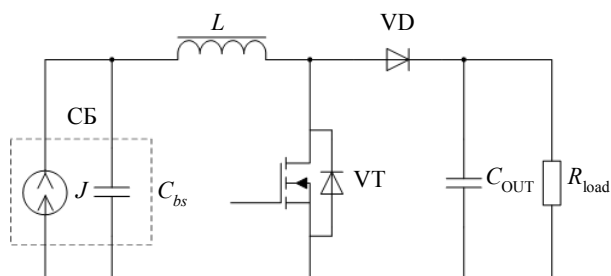


Рис. 2. Схема канала импульсного шунтового преобразователя энергии солнечной батареи

При разомкнутом транзисторе VT происходит передача энергии СБ в нагрузку и одновременный заряд её паразитной емкости, при этом ток через дроссель равен току секции СБ. Замыкание транзистора приводит к разряду паразитной емкости СБ, поэтому формируется импульс тока транзистора, равный сумме тока СБ и тока разряда паразитной емкости СБ:

$$I_{VT} = I_{СБ} + I_{СБ,C}$$

где  $I_{VT}$  – ток через транзистор,  $I_{СБ}$  – ток секции солнечной батареи  $J$ ,  $I_{СБ,C}$  – ток разряда паразитной емкости солнечной батареи  $C_{bs}$ .

Индуктивность дросселя  $L$  выбирается из условия ограничения амплитуды импульса тока при замыкании транзистора VT, при этом индуктивность дросселя может быть значительной, что приводит к росту его статических потерь.

Наличие процесса разряда емкости СБ при замыкании транзистора ужесточает требования не только к силовой части преобразователя, но и к системе регулирования, поскольку ограничивает минимальную длительность открытого состояния

транзистора. В случае размыкания транзисторного ключа до момента, когда разряд емкости СБ не закончился, происходит передача тока в выходной фильтр, в виде высокоамплитудного импульса, что создаст неприемлемую пульсацию напряжения на выходной стабилизируемой шине и увеличит коммутационные потери транзистора.

### Цифровая система стабилизации выходного напряжения. Алгоритмы реализации многозонного регулирования ШС

В сравнении с аналоговой реализацией системы управления цифровая реализация дискретных многозонных методов регулирования имеет ряд преимуществ:

- простота реализации ограничения минимальной длительности замкнутого состояния транзистора;
- возможность изменения количества каналов ШС без изменения значения  $dF$ , что позволяет сохранять динамические характеристики системы.

Алгоритм многозонного регулирования позволяет однозначно сопоставить любому выходному сигналу регулятора контура напряжения единственной зоны регулирования, формируемой комбинацией замкнутых и разомкнутых каналов ШС. Основными переменными для алгоритма подключения каналов являются период обновления сигнала регулятора  $T_{упр}$  и безразмерный коэффициент  $dF$ , численно равный диапазону работы одного канала ШС (единичная зона), при достижении верхней границы которого происходит замыкание шунтирующего транзистора и переход в следующую зону регулирования (рис. 3). При достижении нижней границы диапазона  $dF$  происходит размыкание шунтирующего транзистора и переход в предыдущую зону регулирования. Указанные переменные позволяют однозначно связать выходное значение регулятора системы автоматического регулирования с числом подключенных каналов ШС (и номером зоны управления) и реализовать систему стабилизации напряжения (см. рис. 1).

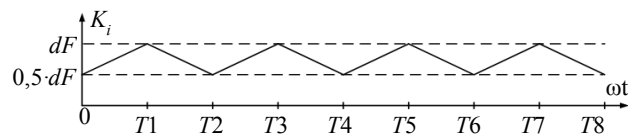


Рис. 3. Диаграмма работы преобразователя при коммутации одного канала

Существует физическое ограничение минимального времени обновления  $T_{упр}$ , связанное с превышением допустимого уровня тепловыделения канала ШС, а также качеством стабилизации выходного напряжения.

Недостатком рассматриваемого шунтового стабилизатора является принципиальное ограничение, накладываемое силовой частью преобразователя на максимальную частоту работы преобразователя  $F_{упр}$ , что приводит к снижению скорости реакции системы управления на изменение выходного напряжения из-за увеличения задержки регулирования на время длительностью как минимум в один

период обновления сигнала управления и, вследствие этого, к ухудшению качества переходных процессов.

Наиболее простым алгоритмом, повторяющим логику функционирования «аналоговой реализации» алгоритма S3R, является алгоритм «реле» (рис. 4, а). Диапазон работы регулятора контура напряжения составляет  $0 \dots N \cdot dF$  дискретных значений и разбит на  $N$  зон регулирования по числу задействованных каналов ШС. На каждый канал ШС приходится  $dF$  значений регулятора контура напряжения. С ростом тока нагрузки значение регулятора  $K_i$  уменьшается и происходит последовательный переход из зоны, в которой все каналы ШС замкнуты (выходное значение регулятора контура напряжения равно  $N \cdot dF$ ), в зону, в которой все каналы ШС разомкнуты (выходное значение регулятора контура напряжения равно 0). Каждое значение  $dF$  однозначно задает количество замкнутых  $M_i$  и разомкнутых каналов ШС. Порядок коммутации каналов ШС не меняется.

Пример реализации алгоритма «реле» для четырех каналов ШС приведен в табл. 1. Как видно из табл. 1, минимальная длительность между коммутациями канала ШС № 1 составляет не менее одного периода обновления сигнала регулятора.

Таблица 1  
Переключение каналов для алгоритма «реле»  
при коммутации одного канала ШС

Момент времени	Канал ШС № 1	Канал ШС № 2	Канал ШС № 3	Канал ШС № 4
0	р	з	з	з
$T_1$	з	з	з	з
$T_2$	р	з	з	з
$T_3$	з	з	з	з
$T_4$	р	з	з	з
$T_5$	з	з	з	з
$T_6$	р	з	з	з
$T_7$	з	з	з	з
$T_8$	р	з	з	з

Примечание: р – разомкнутый канал ШС;  
з – замкнутый канал ШС.

Для увеличения скорости реакции системы управления на изменение выходного напряжения, при увеличении  $F_{упр}$ , был разработан алгоритм подключения каналов ШС типа «кольцо» (рис. 4, б). Отличием алгоритма «кольцо» является то, что для каждого значения регулятора алгоритм подключения каналов определяет фиксированную комбинацию, количество замкнутых и разомкнутых каналов ШС. Комбинация же замкнутых/разомкнутых каналов определяется в момент изменения их количества.

Как видно из рис. 4, б, до момента первоначального изменения номера головного канала алгоритм «реле» и алгоритм «кольцо» идентичны, т.е. первый канал ШС коммутирует при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = dF$  (первая зона регулирования), второй канал ШС коммутирует при выходном значении регулято-

ра контура напряжения, равном  $K_i = 2 \cdot dF$  (вторая зона регулирования), и т.д.

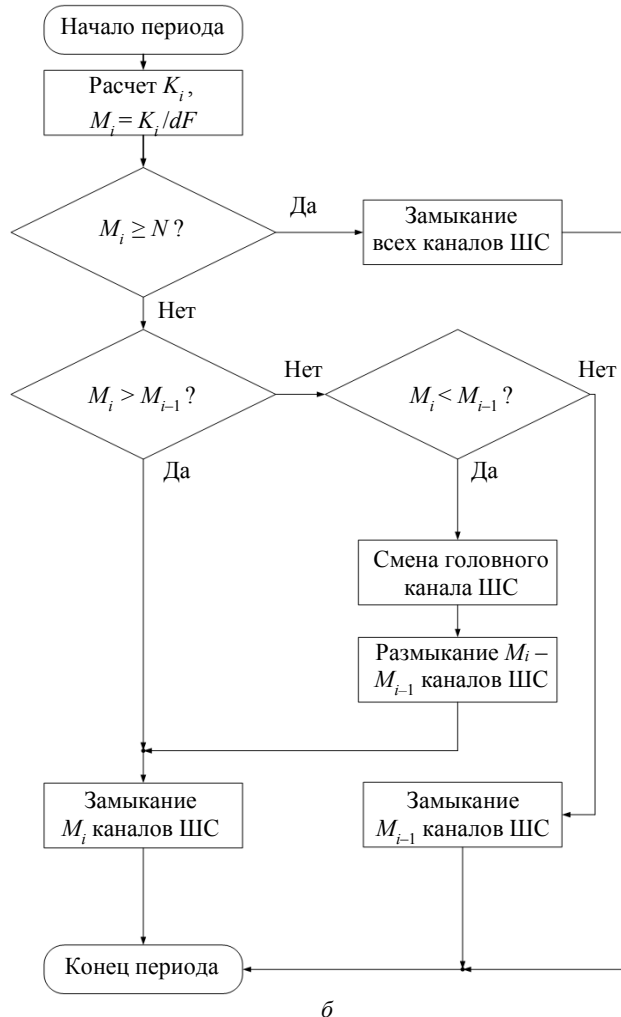
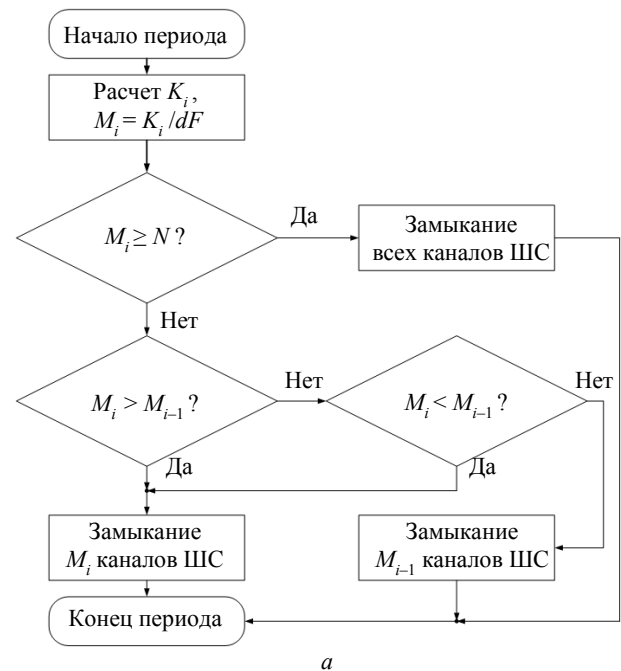


Рис. 4. Алгоритм смены зоны регулирования «реле» – а;  
б – алгоритм смены зоны регулирования «кольцо»;  
 $i$  – текущий период работы

После изменения номера головного канала (канал, который переходит в замкнутое состояние в первой зоне регулирования) с первого на второй, происходит изменение порядка коммутации каналов ШС. Теперь первым замыкается второй канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = dF$  (первая зона регулирования), вторым коммутирует третий канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = 2 \cdot dF$  (вторая зона регулирования), третьим коммутирует четвертый канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = 3 \cdot dF$  (третья зона регулирования), и т.д.

При повторном изменении порядкового номера, головным каналом становится третий канал. Соответственно, первым замыкается третий канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = dF$  (первая зона регулирования), вторым коммутирует четвертый канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = 2 \cdot dF$  (вторая зона регулирования), третьим коммутирует пятый канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = 3 \cdot dF$  (третья зона регулирования), и т.д.

Пример реализации алгоритма «кольцо» для четырех каналов ШС при коммутации одного канала ШС приведен в табл. 2.

Таблица 2  
Переключение каналов для алгоритма «кольцо» при коммутации одного канала ШС

Момент времени	Канал ШС № 1	Канал ШС № 2	Канал ШС № 3	Канал ШС № 4
0	р	з	з	з
T1	з	з	з	з
T2	з	р	з	з
T3	з	з	з	з
T4	з	з	р	з
T5	з	з	з	з
T6	з	з	з	р
T7	з	з	з	з
T8	р	з	з	з

Примечание: р – разомкнутый канал ШС;  
з – замкнутый канал ШС.

Как видно из табл. 2, коммутация одного и того же канала ШС происходит как минимум через  $2^{N-1}$  периода частоты работы силовой части. Преимуществом данного алгоритма является возможность повышения частоты работы преобразователя в  $2^{N-1}$  раза при сохранении тепловыделения элементов канала ШС на уровне алгоритма «реле» и амплитуды высокочастотных пульсаций на выходной шине на уровне ШС, работающего на основе алгоритма «реле».

**Результаты эксперимента**

В ходе исследования был разработан макетный образец многоканального преобразователя энергии СБ. Макетный образец включает в себя четыре канала ШС, работающих от четырех отдельных каналов имитатора СБ. В качестве силовых транзисторов применены IRFP4868, выходной диод MBR20100,

резистор SQP 27 Ом мощностью 10 Вт, дроссель индуктивностью 47 мкГн, выполненный на двойном магнитопроводе МП60 КП19х11х4,8. Схема рабочего места испытания макета приведена на рис. 5.

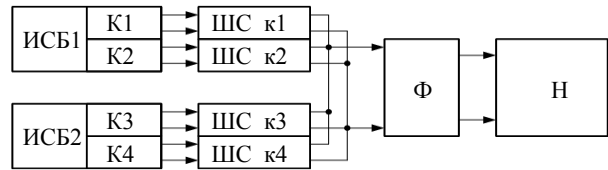
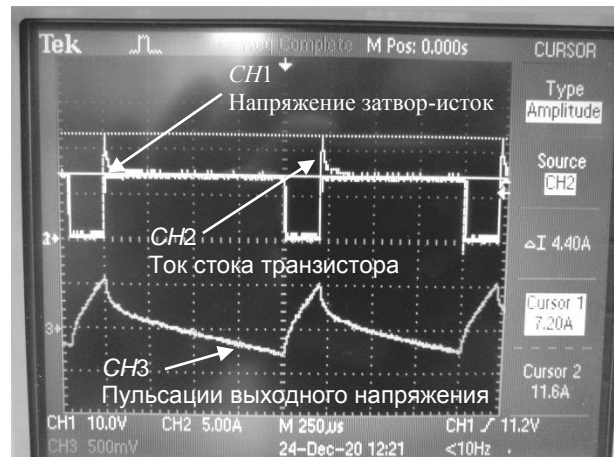


Рис. 5. Рабочее место испытаний многоканального преобразователя энергии СБ: ИСБ – имитатор солнечной батареи; Agilent E4360A с двумя модулями E4362A (120 В, 5 А); ШС\_к1, ... ШС\_к4 – каналы шунтового стабилизатора; Ф – выходной емкостной фильтр, 2100 мкФ; Н – электронная нагрузка N3300А

ИСБ были включены в режиме имитации экспоненциальной формы ВАХ. Задание ВАХ проводилось по четырем точкам со следующими значениями:

- напряжение холостого хода (ХХ) 110 В;
- напряжение в точке максимальной мощности (ММ) 104 В;
- ток КЗ, 5 А;
- ток в точке ММ 4,5 А.

Осциллограммы, демонстрирующие амплитуду импульса тока при коммутации транзистора VT с паразитной емкостью БС, приведены на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Амплитуда импульса тока транзистора с паразитной емкостью БС, равной 400 нФ

Как видно на осциллограммах, приведенных на рис. 6, длительность импульса тока ограничена, после чего ток через транзистор становится равным величине тока короткого замыкания (КЗ) СБ. При размыкании транзисторного ключа до момента, когда разряд емкости СБ не закончился, происходит передача тока в выходной фильтр в виде высокоамплитудного импульса, что создаст неприемлемую пульсацию напряжения на выходной стабилизируемой шине. Экспериментально установлено (рис. 6, б), что для секции СБ с параметрами

- напряжение холостого хода (ХХ), 110 В;
- напряжение в точке максимальной мощности (ММ) 104 В;
- ток КЗ 7,4 А;
- ток в точке ММ 6,6 А.

и выходной паразитной емкостью равной 400 нФ, при индуктивности дросселя  $L$ , равной 44 мкГн, длительность импульса тока составляет не более 80 мкс. Из этого следует, что для исключения коммутации транзистора во время импульса тока, снижения коммутационных потерь и уменьшения амплитуды высокочастотных импульсов на выходной шине максимальная частота работы силовой части должна быть не более 6,25 кГц.

Таким образом, формируется ограничение на минимальную длительность открытого состояния транзистора для обеспечения требуемого качества стабилизации выходного напряжения и низкого тепловыделения.

Осциллограммы работы преобразователя в режиме стабилизации 100 В выходного напряжения при постоянном токе нагрузки 2 А, ступенчатом изменении тока нагрузки до 12 А и различных алгоритмах смены зон регулирования приведены на рис. 7, 8. Измерения были проведены с помощью встроенной функции «Cursors» осциллографа TPS2024В. Из осциллограмм, приведенных на рис. 7, видно, что длительность переходного процесса при ступенчатом изменении мощности тока нагрузки составляет 5 мс, а размах пульсации выходного напряжения – 2,64 В.

Согласно табл. 2, применение алгоритма «кольцо» позволяет повысить частоту работы преобразователя в  $2^{N-1}$  раза, при сохранении тепловыделения элементов канала ШС на уровне алгоритма «реле». С учетом особенностей алгоритма работы «кольцо», а также количества каналов  $N = 4$  частота работы преобразователя была выбрана 20 кГц (эквивалент работы канала ШС с алгоритмом смены зон «реле» на частоте 5 кГц).

Из осциллограмм, приведенных на рис. 8, видно, что длительность переходного процесса при ступенчатом изменении мощности тока нагрузки составила 1,2 мс, а размах пульсации выходного напряжения – до 1,16 В. Таким образом, применяя алгоритм «кольцо» при эквивалентной частоте работы преобразователя ШС, по сравнению с алгоритмом «реле», удалось улучшить характеристики переходного процесса более чем в два раза.

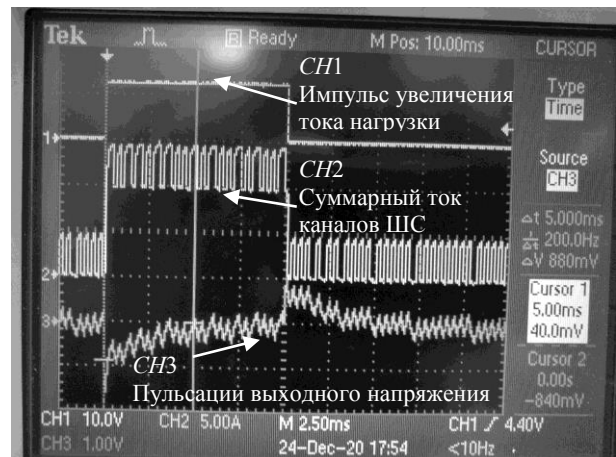


Рис. 7. Длительность переходного процесса при ступенчатом изменении мощности нагрузки на 1 кВт и алгоритме смены зоны регулирования «реле» с частотой 5 кГц

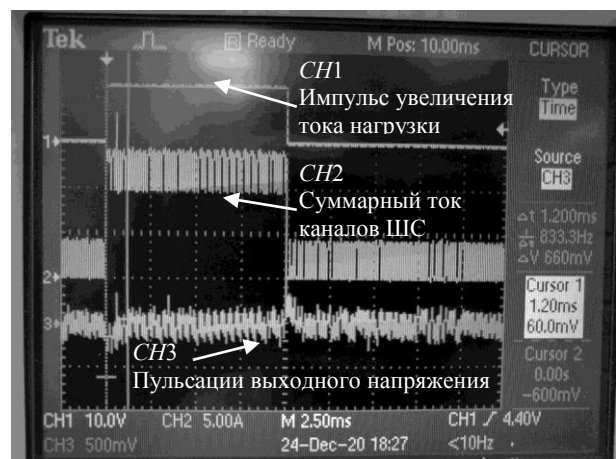


Рис. 8. Длительность переходного процесса при ступенчатом изменении мощности нагрузки на 1 кВт и алгоритме смены зоны регулирования «кольцо» с частотой 20 кГц

Характер переходных процессов при ступенчатом изменении мощности нагрузки независимо от алгоритма управления и частоты работы преобразователя сохраняет аperiодический вид.

#### Заключение

В ходе исследования была рассмотрена работа многоканального шунтового преобразователя энергии солнечной батареи, функционирующего в режиме стабилизации выходного напряжения. Был проанализирован алгоритм смены зоны регулирования S3R (алгоритм «реле»), выделены его преимущества и недостатки и предложен его модернизированный вариант – алгоритмы смены зоны регулирования «кольцо».

Как показали результаты экспериментального исследования, результатом внедрения алгоритма «кольцо» стало снижение амплитуды и времени перерегулирования переходного процесса более чем в 4 раза при уменьшении тепловыделения преобразователя ШС за счет снижения эквивалентной частоты работы.

Таким образом, применение алгоритма смены зоны регулирования «кольцо» позволяет снизить массу энергопреобразующей аппаратуры за счет

минимизации выходного фильтра и теплоотводящей конструкции.

#### Литература

1. O'Sullivan D. The sequential switching shunt regulator (S3R) / D. O'Sullivan, A.H. Weinberg // ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar. – 1977. – P. 123–131.
2. Sequential Switching Shunt Regulator for Satellite Power Control System / A.M. Kamel, Amged S. El-Wakeel, Usama R. Abou Zayed // IOSR-JEEE. – 2017. – Vol. 12. – P. 78–83.
3. Intelligent Sequential Switching Shunt Regulation for Satellite Solar Arrays / Ahmed M. Kamel, Usama R. Abou-Zayed, Amged S. El-Wakeel, Walid A. Wahballah // IEEE Aerospace Conference. – 2018. – P. 1–10.
4. Comparison of Shunt Regulators Based on DC–DC Boost Topologies / Denis A. Kurochkin, Tatiana E. Shults, Andrey V. Geist, Dmitri A. Shtein // 20th International Conference On Micro/Nanotechnologies And Electron Devices. – 2019. – P. 586–590.
5. A new Sequential Switching Shunt Regulator – Digital Shunt Regulator (S3R–DSR) for Solar Array Regulators / A. Garrigos, J.A. Carrasco, J. M. Blanes, E. Sanchis-Kilders // IEEE ISIE. – 2006. – P. 1064–1069.
6. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.
7. Кобзев А.В. Модуляционные источники питания РЭА / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, Н.М. Музыченко. – Томск: Радио и связь, 1990. – 336 с.
8. Carlos L. Salinas. A hybrid sequential switching shunt regulator (HS3R) for satellites // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2013. – Vol. 3, No. 5 – P. 453–456.
9. Gianninoto G. A new, single diode, sequential switching shunt regulator. Scorzafava, D. Carlan // 11th European Space Power Conference. – 2017. – P. 1–8.
10. Modeling of the Section Capacitance to Interface with a S3R / A. Fernández, J.R. González // 11th European Space Power Conference. – 2017. – P. 10–18.
11. Garrigos A. Influence of the parasitic solar array capacitance in the sequential switching shunt series regulator // 13-th IEEE mediterranean electrotechnical conference. – 2006. – P. 1198–1201.
12. Comparative Study of SiC Transistors for Active Current Limitation in S3R / David Marroqui, Jorge Borrell, Roberto Gutierrez, Jose Manuel Blanes, Ausias Garrigos, Enrique Maset // Elektronika Ir Elektrotehnika. – 2017. – Vol. 23, No. 5. – P. 54–60.
13. Mourra O. Buck Boost Regulator (B2R) for spacecraft / O. Mourra, A. Fernandez, F. Tonicello // Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2010. – P. 1313–1319.
14. DC/DC Boost Converter with Additional Inductance for the Space Power Supply System / A.V. Geist, A.V. Sidorov, D.V. Korobkov, A.G. Volkov // 19th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. – 2018. – P. 6403–6408.
15. Delepaut C. S3R stability margins and design guidelines // ESPC. – 2008. – P. 54–60.
16. Sanchis-Kilders E. A power conditioning unit for high power GEO satellites based on the sequential switching shunt series regulator / Esteban Sanchis-Kilders, José A. Carrasco, José M. Blanes // IEEE Mediterranean MELECON. – 2006. – P. 1186–1189.

17. Tepsa T. Adjustable Shunt Regulator Based Control Systems / Tauno Tepsa, Teuvo Suntio // IEEE Power Electronics Letters. – 2003. – Vol. 1, No. 4. – P. 93–96.

#### Асочаков Арсений Степанович

Инженер-конструктор 3-й кат. АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва  
Ленина ул., 52, г. Железногорск, Красноярский край, Россия, 662972  
Тел.: +7-960-969-96-48  
Эл. почта: arseniy.asochakov@yandex.ru

#### Дружинин Александр Александрович

Инженер-конструктор 3-й кат. АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва  
Ленина ул., 52, г. Железногорск, Красноярский край, Россия, 662972  
Тел.: +7-913-832-81-95  
Эл. почта: Alex-Druzh@mail.ru

#### Журавлев Иван Михайлович

Инженер-конструктор 2-й кат. АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва  
Ленина ул., 52, г. Железногорск, Красноярский край, Россия, 662972  
Тел.: +7-908-021-37-24  
Эл. почта: iv\_zhuravlev@mail.ru

#### Лопатин Александр Александрович

Канд. техн. наук, нач. сектора разработки силовой бортовой аппаратуры АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва  
Ленина ул., 52, г. Железногорск, Красноярский край, Россия, 662972  
Тел.: +7 (391-9) 73-67-03  
Эл. почта: lopatin@iss-reshetnev.ru

Asochakov A.S., Druzhinin A.A.,  
Zhuravlyov I.M., Lopatin A.A.

#### Control Algorithms for Multichannel Shunt Voltage Converter with Digital Control System

The operation of multichannel shunt solar array converter with discrete zone voltage regulation was investigated. The «relay» and «ring» switch algorithms for shunt voltage converter of solar array energy are considered. The prototype of multichannel shunt voltage converter has been developed, and the analytical waveforms by dynamic work mode of shunt voltage converter have been obtained.

**Keywords:** shunt voltage converter, digital control system, S3R, solar array.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-84-90

#### References

1. O'Sullivan D., Weinberg A. H. The sequential switching shunt regulator (S3R). *ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar*, 1977, pp. 123–131.
2. Kamel A.M., El-Wakeel Amged S., AbouZayed Usama R. Sequential Switching Shunt Regulator for Satellite Power Control System. *IOSR-JEEE*, 2017, vol. 12, pp. 78–83.
3. Kamel Ahmed M., AbouZayed Usama R., El-Wakeel Amged S., Wahballah Walid A. Intelligent Sequential Switch-

ing Shunt Regulation for Satellite Solar Arrays. *IEEE Aerospace Conference*, 2018, pp. 1–10.

4. Kurochkin Denis A., Shults Tatiana E., Geist Andrey V., Shtein Dmitri A. Comparison of Shunt Regulators Based on DC–DC Boost Topologies. *20th International Conference On Micro/Nanotechnologies And Electron Devices*, 2019, pp. 586–590.

5. Garrigos A., Carrascal J. A., Blanes J. M., Sanchis-Kilders E. A new Sequential Switching Shunt Regulator – Digital Shunt Regulator (S3R–DSR) for Solar Array Regulators. *IEEE ISIE*, 2006, pp. 1064–1069.

6. Kobzev A.V. *Mnogozonnaya impulsnaya modulyaciya. Teoriya i primeneniye v sistemah preobrazovaniya parametrov elektricheskoy energii*. [Multi-zone pulse modulation. Theory and practice application in system of parameters converter]. Novosibirsk, Science, 1979. 304 p. (In Russ.).

7. Kobzev A.V., G.Y. Mihalchenko, N.M. Muzychenko *Modulyacionnye istochniki pitaniya REA* [Modulation power supplies for REE]. Tomsk, Radio and communications, 1990. 336 p. (in Russ.)

8. Carlos L. Salinas. A hybrid sequential switching shunt regulator (HS3R) for satellites. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2013, vol. 3, no. 5, pp. 453–456.

9. Gianninoto G., Scorzafava E., Cariani D. A new, single diode, sequential switching shunt regulator. *11th European Space Power Conference*, 2017, pp. 1–8.

10. Fernández A., González J.R. Modeling of the Section Capacitance to Interface with a S3R. *11th European Space Power Conference*, 2017, pp. 10–18.

11. Garrigos A. Influence of the parasitic solar array capacitance in the sequential switching shunt series regulator. *13th IEEE mediterranean electrotechnical conference*, 2006, pp. 1198–1201.

12. Marroqui David, Borrell Jorge, Gutierrez Roberto, Blanes Jose Manuel, Garrigos Ausias, Maset Enrique. Comparative Study of SiC Transistors for Active Current Limitation in S3R. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 2017, vol. 23, no. 5, pp. 54–60.

13. Buck Boost Regulator (B2R) for spacecraft / O. Mourra, A. Fernandez, F. Tonicello // Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, pp. 1313–1319.

14. Geist A.V., Sidorov A.V., Korobkov D.V., Volkov A.G. DC/DC Boost Converter with Additional Inductance for the Space Power Supply System. *19th International*

*Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, 2018, pp. 6403–6408.

15. Delepaut C. S3R stability margins and design guidelines. *ESPC*, 2008, pp. 54–60

16. A power conditioning unit for high power GEO satellites based on the sequential switching shunt series regulator. *IEEE Mediterranean MELECON*, 2006, pp. 1186–1189.

17. Tepsa T., Suntio T. Adjustable Shunt Regulator Based Control Systems. *IEEE Power Electronics Letters*, 2003, vol. 1, no. 4, p. 93–96.

---

#### **Arseny S. Asochakov**

Design Engineer, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System  
52, Lenin st., 662972, Zheleznogorsk,  
Krasnoyarsk region, Russia  
Phone: +7-960-969-96-48  
Email: arseniy.asochakov@yandex.ru

#### **Aleksandr A. Druzhinin**

Design Engineer, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System  
52, Lenin st., 662972, Zheleznogorsk,  
Krasnoyarsk region, Russia  
Phone: +7-913-832-81-95  
Email: Alex-Druzh@mail.ru

#### **Ivan M. Zhuravlyov**

Design Engineer, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System  
52, Lenin st., 662972, Zheleznogorsk,  
Krasnoyarsk region, Russia  
Phone: +7-908-021-37-24  
Email: iv\_zhuravlev@mail.ru

#### **Aleksandr A. Lopatin**

Doctor of Science in Engineering, Head of Design Section Power Supply and Conversion Equipment  
JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System  
52, Lenin st., 662972, Zheleznogorsk,  
Krasnoyarsk region, Russia  
Phone: +7 (391-9) 73-67-03  
Email: lopatin@iss-reshetnev.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](http://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;  $\sin x(t_1)$ ;  $U_{in}$ ;  $I_{вх}$ ;  $T_z$ ;  $\beta_2$ ;  $H_2O$ , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) –  $A_1$ ,  $M(f)$ ,  $\beta_x$ . 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 неперiodических 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](mailto:vnmas@tusur.ru). Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

