



Доклады ТУСУР. 2021 • Том 24, № 1

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442



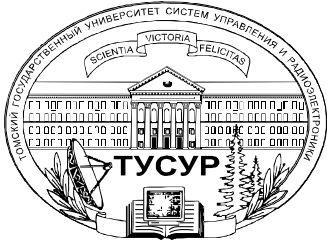
# ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники

2021 • Том 24, № 1



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ  
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
2021, том 24, № 1**

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. Маслеников**, 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. Кириенко СО РАН, заслуженный изобретатель России, Красноярск, Россия.  
**Ян Браун (Jan G. Brown)**, PhD, Национальная лаборатория им. Лоуренса, Беркли, Калифорния, США.  
**С.А. Гаврилов**, д.т.н., проф., проректор по ИР, НИУ «Московский институт электронной техники» (МИЭТ), лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2967-272X>.  
**Ю.П. Ехлаков**, д.т.н., проф. 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.  
**А.В. Кобзев**, д.т.н., проф. каф. промышленной электроники, ТУСУР, Томск, Россия, почётный работник науки и техники РФ, почётный работник высшего профессионального образования России, Томск, 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 автоматики 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. Холашинский**, 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 ИЕЕЕ/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 25.03.2021. Формат 60×84 1/8. Печ. л. 6,6. Тираж 500. Заказ 5.

---

**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.
- Anatoly V. Kobzev** Professor of the Department of Industrial Electronics, TUSUR University, 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>Порубов Г.Г., Денисов В.П.</b> Вычисление топоцентрических координат источника радиоизлучения по результатам измерений фазового пеленгатора на борту подвижного объекта .....	7
<b>Иванов А.А., Комнатнов М.Е.</b> Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой .....	16
<b>Гафаров Е.Р., Саломатов Ю.П.</b> Анализ эффективности многопортовой печатной антенны .....	24

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

<b>Глухов Н.И., Наседкин П.Н.</b> Аналитика внутренних угроз информационной безопасности предприятий .....	33
<b>Корышев Н.П., Ходашинский И.А.</b> Алгоритм формирования базы правил нечёткого классификатора на основе алгоритма кластеризации $K$ -средних и метаэвристического алгоритма «китов» .....	42
<b>Гончаров А.С., Савельев А.О., Писанкин А.С., Чепкасов А.Ю., Джаякоди Д.Н.К.</b> Подход к автоматическому прогнозированию состояния промышленных манипуляторов с применением методов машинного обучения .....	48
<b>Мехтиев Э.М.</b> Современные подходы при создании системы управления техническим обслуживанием контрольно-измерительными приборами и автоматики на нефтегазодобывающих предприятиях .....	55
<b>Катаев М.Ю., Карпов Р.К., Ламинский К.А.</b> Программная система обнаружения дефектов кирпичей на основе методов компьютерного зрения .....	62
<b>Выходцев Н.А.</b> Использование искусственного интеллекта для оценки стоимости недвижимого имущества .....	68

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

<b>Осипов А.В.</b> Синтез двухчастотного тока параллельно-последовательным резонансным $LCLC$ -преобразователем с многократной широтно-импульсной модуляцией .....	75
<b>Козлов Р.В., Букреев В.Г., Лелеков А.Т.</b> Методика оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата .....	83
<b>Крысанов В.Н., Бурковский В.Л., Хайченко И.А.</b> Аппаратные решения для энергосберегающих технологий управления объектами распределительных сетей на базе силовых полупроводниковых устройств .....	91

**ПАМЯТИ ФЕЛИКСА ИВАНОВИЧА ПЕРЕГУДОВА, К 90-ЛЕТИЮ**

<b>Кориков А.М.</b> От радиолокации метеорных следов до системной организации науки, высшего образования и производства: к 90-летию Феликса Ивановича Перегудова .....	99
<b>Требования</b> .....	106

## ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING, AND COMMUNICATIONS

<b>Porubov G.G., Denisov V.P.</b> Calculating the topocentric coordinates of the radio emission source according to the measurement results of the phase direction finder on board a mobile object .....	7
<b>Ivanov A.A., Komnatnov M.E.</b> Semi-analytical method for evaluating shielding effectiveness of an enclosure with an aperture .....	16
<b>Gafarov E.R., Salomatov Y.P.</b> Efficiency analysis of a multiport patch antenna .....	24

## CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

<b>Glukhov N.I., Nasedkin P.N.</b> Analysis of internal threats to information security of enterprises .....	33
<b>Koryshev N.P., Hodashinsky I.A.</b> Algorithm to forming a rule base for a fuzzy classifier designed on the basis of the K-means clustering algorithm and the whale optimization algorithm .....	42
<b>Goncharov A.S., Savelev A.O., Pisankin A.S., Chepkasov A.Y., Jayakody D.N.K.</b> Approach to an automatic prediction of the state of industrial manipulators using machine learning methods .....	48
<b>Mekhtiev E.M.</b> Modern approaches in creating systems to manage the maintenance of control and measuring devices and automation at oil and gas production enterprises .....	55
<b>Kataev M.Yu., Karpov R.K., Laminsky K.A.</b> Software system for detecting brick defects based on computer vision methods .....	62
<b>Vykhodtsev N.A.</b> Artificial intelligence in price estimation of real estate .....	68

## ELECTRICAL ENGINEERING

<b>Osipov A.V.</b> Synthesis of two-frequency current by a parallel-to-series resonant <i>LCLC</i> -converter with multiple pulse-width modulation .....	75
<b>Kozlov R.V., Bukreev V.G., Lelekov A.T.</b> Optimization technique for energy mass characteristics of the EPS of a geostationary spacecraft .....	83
<b>Krysanov V.N., Burkovskii V.L., Khaychenko I.A.</b> Hardware solutions for energy-efficient control technologies of distribution network objects based on power semi-conductor devices .....	91

## IN MEMORIAM TO FELIX PEREGUDOV (1931–1990)

<b>Korikov A.M.</b> From radiolocation of meteor trails to the systemic organization of science, higher education and production: dedication to the 90th anniversary of Felix Ivanovich Peregudov .....	99
<b>Manuscript requirements</b> .....	106

**ЭЛЕКТРОНИКА,  
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**



УДК 621.317.08

Г.Г. Порубов, В.П. Денисов

## Вычисление топоцентрических координат источника радиоизлучения по результатам измерений фазового пеленгатора на борту подвижного объекта

Предложен алгоритм вычисления азимута и угла места на источник радиоизлучения в топоцентрической системе координат по результатам измерений фазовым пеленгатором, расположенным на борту подвижного объекта. Положение антенной системы пеленгатора относительно земной топоцентрической системы координат может изменяться. Изменение положения антенной системы влияет на точность вычисления пеленгов. Рассмотрен способ уменьшения ошибок пеленгования методом итераций. Проведена проверка алгоритма методом математического моделирования.

**Ключевые слова:** фазовый пеленгатор, антенная решетка, вычисление пеленга, оценка ошибок пеленгования.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-7-15

В статье рассматриваются двухкоординатные фазовые радиопеленгаторы, т.е. устройства, определяющие угловые координаты источника радиоизлучения в трехмерном пространстве.

Двухкоординатные фазовые радиопеленгаторы находят применение в радиолокации [1], радионавигации [2, 3], системах посадки летательных аппаратов [4, 5], системах радиоэлектронной борьбы [6, 7], системах радиомониторинга, пространственной ориентации объектов по излучению искусственных спутников земли [8–10] и т.д.

Пеленгаторы могут располагаться как на земной поверхности, так и на борту подвижного носителя, в частности, воздушного. Двухкоординатные пеленгаторы имеют антенные системы, представляющие собой плоские или объемные (конформные) антенные решетки [11, 12]. Рассматриваются обзорные пеленгаторы с плоскими антенными решетками, состоящими из слабонаправленных элементов.

Расположение элементов антенной решетки на плоскости может быть различным. Оно описывается в некоторой системе координат, так что антенная решетка лежит в одной из координатных плоскостей. Обычно это прямоугольная Декартова система координат. Угловое положение источника излучения в результате измерений определяется относительно этой системы координат. Будем в дальнейшем называть ее связанной, имея в виду, что так называют систему, связанную со строительными осями объекта, на котором расположен пеленгатор [3]. Предположим далее, что пеленгатор расположен на борту подвижного воздушного объекта, который для решения своих задач выполняет различные эволюции. Положение антенной системы пеленгатора относительно земной топоцентрической системы координат будет при этом изменяться, причем угол поворота связанной системы относительно топоцентрической системы координат может достигать до 180 градусов. Однако потребителю пеленгационной информации, как правило, нужно знать угловые координаты источника радиоизлучения именно в топоцентрической системе. Материал статьи позволя-

ет по результатам измерений, полученных в связанной системе координат, определить угловое положение источника радиоизлучения в топоцентрической системе координат.

В работе [11] рассмотрен принцип работы двухкоординатного фазового пеленгатора с плоской антенной решеткой, базы которого располагаются на плоскости вдоль осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости земли.

На рис. 1 показаны азимут  $\alpha$  и угол места  $\beta$ , характеризующие положение объекта наблюдения  $C(x_c, y_c)$  относительно антенной системы, расположенной в плоскости  $x, O, y$ .

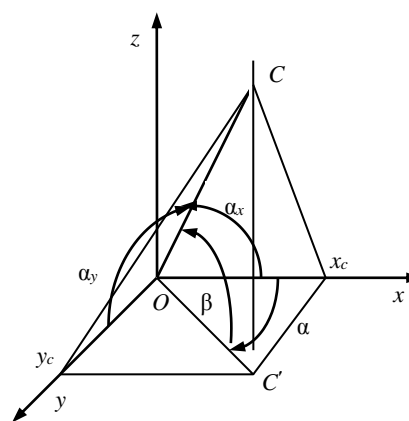


Рис. 1. Угловое положение объекта наблюдения в трёхмерном пространстве

На рис. 2 показано взаимное положение источника сигналов и антенн пеленгатора в трёхмерном пространстве, источник сигнала с координатами  $C(x_c, y_c, z_c)$  и антенны с координатами  $A_1(x_1, y_1)$  и  $A_2(x_2, y_2)$ .

Разность фаз сигналов, наведенных на антеннах  $A_1$  и  $A_2$ , определяется по формуле (1.2.5) из [11]

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} [(x_1 - x_2) \cos \alpha_x + (y_1 - y_2) \cos \alpha_y], \quad (1)$$



где  $(x_1 - x_2)$ ,  $(y_1 - y_2)$  – проекции вектора  $\overline{A_1 A_2}$  на координатные оси.

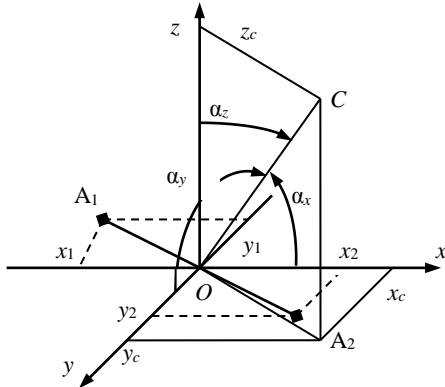


Рис. 2. Взаимное положение источника сигналов  $C$  и антенн пеленгатора в трёхмерном пространстве

Традиционно антенны двухкоординатных фазовых пеленгаторов располагают на плоскости вдоль осей прямоугольной декартовой системы координат.

Подобная антенная система имеет вид креста (рис. 3, а).

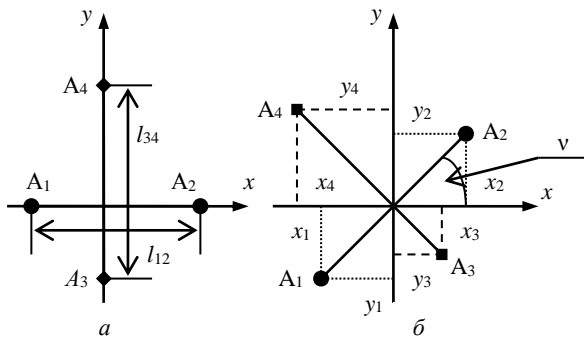


Рис. 3. Пример расположения антенн, образующих базы фазового пеленгатора, на плоскости.

При расположении баз вдоль осей координат (а) и при повороте баз относительно осей координат на угол  $\nu$  (б).

При расположении баз вдоль осей координат (см. рис. 3, а) величины проекций вектора  $\overline{A_1 A_2}$  на оси координат в формуле (1) будут равны  $(x_1 - x_2) = l_{12}$  и  $(y_1 - y_2) = 0$ , а величины проекций вектора  $\overline{A_3 A_4}$  будет равны  $(x_3 - x_4) = 0$  и  $(y_3 - y_4) = l_{34}$ .

С учётом этого формулу (1) можно представить в виде (1.2.6), (1.2.7) из [11]

$$\Phi_{12} = \frac{2\pi l_{12}}{\lambda} \cos \beta \cos \alpha, \quad (2)$$

$$\Phi_{34} = \frac{2\pi l_{34}}{\lambda} \cos \beta \sin \alpha, \quad (3)$$

где  $\Phi_{12}$  – полная разность фаз сигналов на антеннах  $A_1, A_2$ ;  $\Phi_{34}$  – полная разность фаз сигналов на антеннах  $A_3, A_4$ .

Из формул (2) и (3) получим соотношения для вычисления азимута  $\alpha$  и угла места  $\beta$  [11]

$$\alpha = \arctg \frac{\Phi_{34} l_{12}}{\Phi_{12} l_{34}}, \quad (4)$$

$$\beta = \arccos \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\Phi_{12}}{l_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Phi_{34}}{l_{34}}\right)^2}. \quad (5)$$

Формулы (4), (5) являются основой для расчёта азимута и угла места при традиционном построении двухкоординатных фазовых пеленгаторов.

При повороте АР относительно осей неподвижной системы координат на угол  $\nu$  (см. рис. 3, б) проекции вектора  $\overline{A_1 A_2}$  на оси координат в формуле (1) будут равны  $(x_1 - x_2) = l_{12} \cos \nu$  и  $(y_1 - y_2) = l_{12} \sin \nu$ . А проекции вектора  $\overline{A_3 A_4}$  на оси координат будут равны  $(x_3 - x_4) = l_{34} \cos(90^\circ + \nu)$  и  $(y_3 - y_4) = l_{34} \sin(90^\circ + \nu)$ .

С учётом этого формулу (1), определяющую разность фаз сигналов, наведенных на антеннах  $A_1, A_2$  и антеннах  $A_3, A_4$ , можно представить в виде

$$\Phi_{12} = \frac{2\pi l_{12}}{\lambda} [\cos \nu \cos \alpha_x + \sin \nu \cos \alpha_y], \quad (6)$$

$$\Phi_{34} = \frac{2\pi l_{34}}{\lambda} [\cos(90^\circ + \nu) \cos \alpha_x + \sin(90^\circ + \nu) \cos \alpha_y], \quad (7)$$

где  $\nu$  – угол поворота антенной решетки.

Выполнив в формулах (6) и (7) ряд преобразований получим выражения полных разностей фаз сигналов, наведенных на антеннах  $A_1, A_2$  и  $A_3, A_4$ , аналогичные формулам (2), (3):

$$\Phi_{12} = \frac{2\pi l_{12}}{\lambda} \cos \beta \cos(\alpha - \nu), \quad (8)$$

$$\Phi_{34} = \frac{2\pi l_{34}}{\lambda} \cos \beta \sin(\alpha - \nu). \quad (9)$$

При вычислении угла места по формуле (5) получим  $\beta_{\text{ИЗМ}} = \beta$ , а при вычислении азимута по формуле (4)  $\alpha_{\text{ИЗМ}} = \alpha - \nu$ .

Поворот АР относительно осей неподвижной топоцентрической системы координат формирует эффект изменения азимута на источник сигналов относительно осей координат этой системы при неизменном его положении.

Пеленг, предварительно вычисленный по формуле (4), будет соответствовать истинному значению в топоцентрической системе координат при дополнительном вычислении по формуле

$$\alpha = (\alpha_{\text{ИЗМ}} + \nu) - \left\langle \frac{\alpha_{\text{ИЗМ}} + \nu}{180^\circ} \right\rangle 180^\circ, \quad (10)$$

где  $\alpha_{\text{ИЗМ}}$  – результат вычисления азимута по формуле (4);  $\nu$  – угол поворота антенной решетки;  $\langle \cdot \rangle$  – операция округления до ближайшего целого.

При размещении плоской антенной решетки двухкоординатного фазового пеленгатора на некоторой высоте относительно поверхности земли по совокупности измеренных разностей фаз можно одновременно определить направления на источник сигналов как относительно осей координат, расположенных в плоскости антенной системы, так и относительно осей топоцентрической системы координат, расположенных в горизонтальной плоскости параллельно плоскости земли. Последнее определяется дополнительным алгоритмом вычисления пеленгов.

Положим, что плоскость  $x, O, y$  с антенной решеткой фазового пеленгатора (см. рис. 2) повернута вокруг оси  $Oy$  на  $90^\circ$ , поднята на высоту  $h$  и расположена в точке  $O_1$  (рис. 4), а ось  $O_1x_1$  перпендикулярна к плоскости антенной решетки.

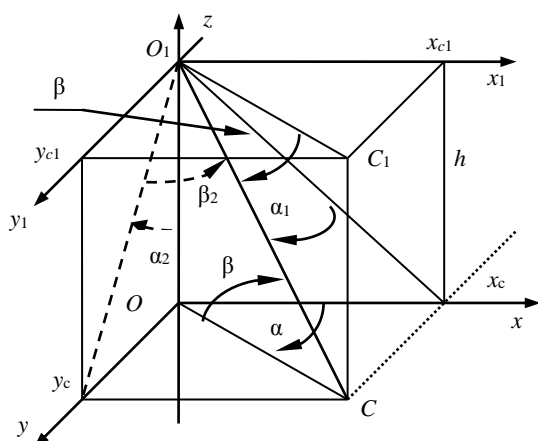


Рис. 4. Взаимное положение фазового пеленгатора и источника сигналов  $C(x_c, y_c)$  в трёхмерном пространстве

Положение пеленгуемого источника сигналов  $C(x_c, y_c)$  относительно осей координат, расположенных в горизонтальной плоскости, определяется по азимуту углом  $\alpha$ , расположенным между осью  $Ox$  и прямой  $OC$ , а по углу места углом  $\beta$ , расположенным между проекцией прямой направления на объект  $O_1C$  на плоскость  $x, O, y$  ( $x_1, O_1, y_1$ ) и прямой  $O_1C$ .

Положение пеленгуемого источника сигналов  $C(x_c, y_c)$  относительно осей координат, расположенных в плоскости антенной системы (см. рис. 1), по азимуту определяется углом  $\alpha_2$ , расположенным между осью  $Oz$  и проекцией прямой  $O_1C$  на плоскость  $y, O, z$ , а по углу места углом  $\beta_2$ , расположенным между проекцией прямой направления на объект  $O_1C$  на плоскость  $y, O, z$  и прямой  $O_1C$ .

Выразим пеленги  $\alpha, \beta, \alpha_2$ , и  $\beta_2$  через координаты источника сигналов  $C(x_c, y_c)$ .

Зададим величину подъёма антенной решетки  $h > 0$  и удалённость пеленгуемого источника сигналов  $x_c \gg h$ .

При задании пеленга в плоскости  $x, O, y$  в пределах  $\alpha = \pm\alpha_{\text{раб}}$  определяются: координата  $y_c$ , угол места  $\beta$ , угол места  $\beta_2$  и азимут  $\alpha_2$  по формулам

$$\begin{aligned} y_c &= x_c \operatorname{tg}(\alpha), \\ \beta &= \operatorname{arctg}\left(h/\sqrt{x_c^2 + y_c^2}\right), \\ \alpha_2 &= \operatorname{arctg}(y_c/h), \\ \beta_2 &= \operatorname{arctg}\left(x_c/\sqrt{h^2 + y_c^2}\right), \end{aligned}$$

где  $x_c$  и  $y_c$  – координаты источника излучения;  $h$  – высота подъёма антенной решетки пеленгатора относительно плоскости  $x, O, y$ .

По результатам вычисления по формулам (4), (5), (10) азимута  $\alpha_2$  и угла места  $\beta_2$  выполняется вычисление азимута  $\alpha$  и угла места  $\beta$  относительно осей топоцентрической системы координат, расположенных в горизонтальной плоскости, по формулам

$$\begin{aligned} y_c &= h \operatorname{tg}(\alpha_2), \\ x_c &= \sqrt{h^2 + y_c^2} \operatorname{tg}(\beta_2), \\ \alpha &= \operatorname{arctg}(y_c/x_c), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(h/\sqrt{x_c^2 + y_c^2}\right), \quad (12)$$

По формулам (11), (12) вычисляются пеленги на источники сигналов, которые могут быть расположены ниже и выше плоскости  $x_1O_1y_1$  (см. рис. 4). При определении полных разностей фаз, наведенных на антеннах пеленгатора по (2), (3), задаётся азимут  $\alpha_2 = \pm\alpha_{\text{раб}}$  для источника сигналов, расположенного ниже плоскости  $x_1O_1y_1$ , или  $\alpha_2 = 180^\circ \pm \alpha_{\text{раб}}$  для источника сигналов, расположенного выше плоскости  $x_1O_1y_1$ . Вычисленный по формуле (4) азимут в том и другом случае будет равен  $\alpha_2 = \pm\alpha_{\text{раб}}$ . Вычисленный по формуле (11) азимут будет правильным.

Вычисленный по формуле (5) угол места всегда положительный. При этом вычисленный по формуле (12) угол места не позволяет определить положение источника сигналов относительно плоскости  $x_1O_1y_1$ . Вычисленный по (12) угол места соответствует действительности только при известном положении пеленгуемых источников сигналов относительно плоскости  $x_1O_1y_1$ .

Таким образом, двухкоординатный фазовый пеленгатор, с плоской антенной решеткой, при вычислении пеленгов относительно осей топоцентрической системы координат по формулам (11), (12), используя результаты вычисленных пеленгов по (4), (5), преобразуется в фазовый пеленгатор, подобный пеленгатору с линейной антенной решеткой с луч-

шими характеристиками. У данного пеленгатора нет ошибок пеленгования, зависящих от угла места, и ошибок, определяемых поворотом антенной решетки относительно осей неподвижной системы координат, которые имеются у пеленгатора с линейной антенной решеткой.

Рассмотрим другой алгоритм обработки измеренных разностей фаз источника радиоизлучения при вычислении азимута и угла места в топоцентрической системе координат.

Разности фаз сигналов, наведенных на антеннах пеленгатора, выразим формулой, в которой азимут и угол места представлены относительно осей координат, расположенных в горизонтальной плоскости.

Расположение антенн фазового пеленгатора на плоскости приведено на рис. 3, а. Обозначим базу, образованную антеннами  $A_1, A_2$ , как  $e_1$ , а базу, образованную антеннами  $A_3, A_4$ , как  $e_2$ .

Взаимное положение источника сигналов  $C(x_c, y_c)$  и антенн пеленгатора в трёхмерном пространстве показано на рис. 4. Положение пеленгуемого источника сигналов  $C(x_c, y_c)$  относительно осей координат, расположенных в горизонтальной плоскости, описано выше.

Значение азимута, измеряемое фазовым пеленгатором с антенной решеткой, расположенной вдоль оси  $O_1y_1$ , определяется углом  $\alpha_1$ , расположенным между проекцией прямой  $O_1C$  на плоскость  $x, O, z$  и прямой  $O_1C$  (см. рис. 4).

Полная разность фаз на базе, расположенной вдоль оси  $x$  (см. рис. 3, а), при измерении разности фаз в рад/2 $\pi$  определяется по формуле

$$\Phi_1 = e_1 \sin \alpha \cos \beta + \delta_1, \quad (13)$$

где  $e_1$  – величина базы в целых числах;  $\alpha$  – азимут;  $\beta$  – угол места;  $\delta_1$  – ошибки измерений разности фаз.

Полная разность фаз на базе, расположенной вдоль оси  $y$ , при измерении разности фаз в рад/2 $\pi$  определяется по формуле

$$\Phi_2 = e_2 \sin \beta + \delta_2, \quad (14)$$

где  $e_2$  – величина базы в целых числах;  $\beta$  – угол места;  $\delta_2$  – ошибки измерений разности фаз.

При повороте антенной решетки относительно осей координат на угол  $\nu$  (см. рис. 3, б) база  $e_1$  будет расположена относительно положительного направления оси  $Ox$  под углом  $\theta_1 = \nu$ , а база  $e_2$  под углом  $\theta_2 = 90^\circ + \nu$ .

Тогда при повороте АР на угол  $\nu$  (см. рис. 3, б) полные разности фаз (13), (14) на базах  $e_1$  и  $e_2$  представим в виде

$$\Phi_1 = e_{1x} \sin \alpha \cos \beta + e_{1y} \sin \beta + \delta_1, \quad (15)$$

$$\Phi_2 = e_{2x} \sin \alpha \cos \beta + e_{2y} \sin \beta + \delta_2, \quad (16)$$

где  $\alpha$  – азимут;  $\beta$  – угол места;  $\delta_1, \delta_2$  – ошибки измерений разности фаз;  $e_{1x}, e_{2x}, e_{1y}, e_{2y}$  – проекции векторов баз  $e_1$  и  $e_2$  на координатные оси

$$\left. \begin{aligned} e_{1x} &= e_1 \cos \theta_1, \\ e_{1y} &= e_1 \sin \theta_1, \\ e_{2x} &= e_2 \cos \theta_2, \\ e_{2y} &= e_2 \sin \theta_2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Работа двухкоординатного фазового пеленгатора при повороте антенной решетки относительно осей координат  $xOy$  на угол  $\nu$  (см. рис. 3, б), реализуется при наличии алгоритма вычисления пеленга, который обеспечивает выполнение двух задач.

Первая задача состоит в устранении неоднозначности измерения разностей фаз на базах по одному из алгоритмов. В работе [11] рассмотрен максимально правдоподобный алгоритм устранения неоднозначности фазовых измерений. Алгоритм устранения неоднозначности фазовых измерений для линейных антенных решеток приведен в работе [13].

Вторая задача состоит в вычислении азимута и угла места в соответствии с выбранным алгоритмом.

Далее предположим, что ошибки измерений разностей фаз отсутствуют. Величины полных разностей фаз (15), (16) определяются суммой составляющих, одна из которых зависит от азимута, а другая от угла места.

Задача разделения информации о полной разности фаз (15), (16) на составляющие в общем виде выполняется по формулам

$$\Phi_\alpha = \Phi_1 \mp \Phi_2 = (e_{1x} \mp e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta + (e_{1y} \mp e_{2y}) \sin \beta, \quad (18)$$

$$\Phi_\beta = \Phi_1 \pm \Phi_2 = (e_{1x} \pm e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta + (e_{1y} \pm e_{2y}) \sin \beta. \quad (19)$$

Знаки  $\pm$  в формулах (18), (19) определяются знаками проекций векторов баз  $e_1$  и  $e_2$  на оси координат (17).

Представим угол поворота антенной решетки формулой

$$\nu = (45^\circ m) \pm \gamma, \quad (20)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  $\gamma = 0^\circ, \dots, 22,5^\circ$ .

Разделение информации о полной разности фаз (18), (19) на составляющие, зависящие от азимута и от угла места, выполняется при равенстве по абсолютной величине проекций векторов баз на оси координат (17).

В табл. 1 приведены величины проекций векторов баз  $e_1$  и  $e_2$  на оси координат при повороте АР на угол  $\nu$  (20) и  $\gamma = 0^\circ$ .

При повороте АР на угол  $\nu = \pm 45^\circ$  (см. табл. 1) формулы (18), (19) представим в виде

$$\Phi_\alpha = \Phi_1 \mp \Phi_2 = (e_{x1} \mp e_{x2}) \sin \alpha \cos \beta, \quad (21)$$

$$\Phi_\beta = \Phi_1 \pm \Phi_2 = (e_{y1} \pm e_{y2}) \sin \beta. \quad (22)$$

При расположении баз АР вдоль осей координат величины проекций баз  $e_1$  и  $e_2$  (см. табл. 1) определяют вид формулы (15), (16):

при равенстве угла поворота  $\nu = 0^\circ$  и  $\nu = 180^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\alpha &= e_{1x} \sin \alpha \cos \beta, \\ \Phi_\beta &= e_{2y} \sin \beta; \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

при равенстве угла поворота  $\nu = 90^\circ$  и  $\nu = 270^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\alpha &= e_{2x} \sin \alpha \cos \beta, \\ \Phi_\beta &= e_{1y} \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Т а б л и ц а 1

Таблица проекций векторов баз  $e_1$  и  $e_2$  на оси координат при повороте АР на угол  $\nu$

Угол поворота АР $\nu$	Величины проекций векторов баз на оси координат при равенстве $e_1 = e_2 = 1$			
	$e_{1x}$	$e_{1y}$	$e_{2x}$	$e_{2y}$
$0^\circ$	1	0	0	1
$45^\circ$	0,707	0,707	-0,707	0,707
$90^\circ$	0	1	-1	0
$135^\circ$	-0,707	0,707	-0,707	-0,707
$180^\circ$	-1	0	0	-1
$225^\circ$	-0,707	-0,707	0,707	-0,707
$270^\circ$	0	-1	1	0
$315^\circ$	0,707	-0,707	0,707	0,707
$360^\circ$	1	0	0	1

При расположении баз АР относительно осей координат под углом  $\pm 45^\circ$  величины проекций векторов баз  $e_1$  и  $e_2$  (см. табл. 1) определяют вид формул (21), (22):

при равенстве угла поворота  $\nu = 45^\circ$  и  $\nu = 225^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\alpha &= \Phi_1 - \Phi_2 = (e_{1x} - e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta, \\ \Phi_\beta &= \Phi_1 + \Phi_2 = (e_{1y} + e_{2y}) \sin \beta; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

при равенстве угла поворота  $\nu = 135^\circ$  и  $\nu = 315^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\alpha &= \Phi_1 + \Phi_2 = (e_{1x} + e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta, \\ \Phi_\beta &= \Phi_1 - \Phi_2 = (e_{1y} - e_{2y}) \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Полные разности фаз (23), (24), (25), (26) представим в виде

$$\Phi_\alpha = q_3 \Phi_1 - q_1 q_2 \Phi_2 = (q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta, \quad (27)$$

$$\Phi_\beta = q_2 \Phi_1 + q_1 q_3 \Phi_2 = (q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}) \sin \beta, \quad (28)$$

где  $q_1 = \pm 1$ ,  $q_2 = 0, 1$ ,  $q_3 = 0, 1$  – коэффициенты, соответствующие углу поворота АР  $\nu$  (20), преобразующие формулы (27), (28) к одному из видов (23)–(26).

Значение коэффициентов  $q_1, q_2, q_3$  определяется по величине чисел, найденных по формуле

$$q_i = \langle \nu / 45^\circ \rangle,$$

где  $\nu$  – угол поворота АР (20);  $\langle \cdot \rangle$  – операция округления до ближайшего целого.

Обозначим далее искомые значения азимута и угла места, как  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ . Из формул (27) и (28) получим соотношения для вычисления синуса азимута и синуса угла места:

$$\sin \alpha_1 = \frac{q_3 \Phi_1 - q_1 q_2 \Phi_2}{(q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}) \cos \beta}, \quad (29)$$

$$\sin \beta_1 = \frac{q_2 \Phi_1 + q_1 q_3 \Phi_2}{q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}}. \quad (30)$$

Подставим в (29) и (30) значения полных разностей фаз  $\Phi_1$  (15) и  $\Phi_2$  (16). Выполнив ряд преобразований, получим выражения, определяющие значения синуса азимута и синуса угла места при повороте АР относительно осей координат на угол  $\nu$

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha + \sin \beta \frac{q_3 e_{1y} - q_1 q_2 e_{2y}}{(q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}) \cos \beta}, \quad (31)$$

$$\sin \beta_1 = \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \frac{q_2 e_{1x} + q_1 q_3 e_{2x}}{q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}}, \quad (32)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – истинные значения азимута и угла места.

Из формул (31), (32) видно, что при вычислении синуса азимута и синуса угла места по (29), (30) в результатах вычисления кроме информации об истинном значении азимута и угла места содержатся величины, определяющие ошибки вычисления пеленгов при изменении положения антенной решетки. Ошибки вычисления синуса азимута (31) зависят от угла места, а ошибки вычисления синуса угла места (32) зависят от азимута. Степень влияния азимута и угла места на величины ошибок пеленгования определяется величиной дроби в правой части выражений.

Представим дроби в (31), (32) в виде формул

$$h_\alpha = \frac{q_3 e_{1y} - q_1 q_2 e_{2y}}{q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}}, \quad (33)$$

$$h_\beta = \frac{q_2 e_{1x} + q_1 q_3 e_{2x}}{q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}}. \quad (34)$$

Из формул (29), (30) получим выражения для вычисления азимута и угла места

$$\alpha_1 = \arcsin \left( \frac{q_3 \Phi_1 - q_1 q_2 \Phi_2}{(q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}) \cos \beta_1} \right), \quad (35)$$

$$\beta_1 = \arcsin \left( \frac{q_2 \Phi_1 + q_1 q_3 \Phi_2}{q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}} \right). \quad (36)$$

Ошибки при вычислении пеленгов по (35), (36) в отличие от случайных ошибок пеленгования, зависящих от ошибок измерения разностей фаз, являются систематическими ошибками и могут быть исключены или существенно уменьшены при известных значениях азимута и угла места при вычислении по формулам

$$\alpha_2 = \alpha_1 - h_\alpha \beta, \quad (37)$$

$$\beta_2 = \beta_1 - h_\beta \alpha, \quad (38)$$

где  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  – результаты вычисления азимута и угла места по (35), (36);  $h_\alpha$  и  $h_\beta$ , – по (33), (34);  $\alpha$  и  $\beta$  – истинные значения азимута и угла места.

### Математическое моделирование

Методом математического моделирования выполнена сравнительная оценка ошибок пеленгования при вычислении азимута и угла места по формулам (35), (36) и при уточнении по формулам (37), (38).

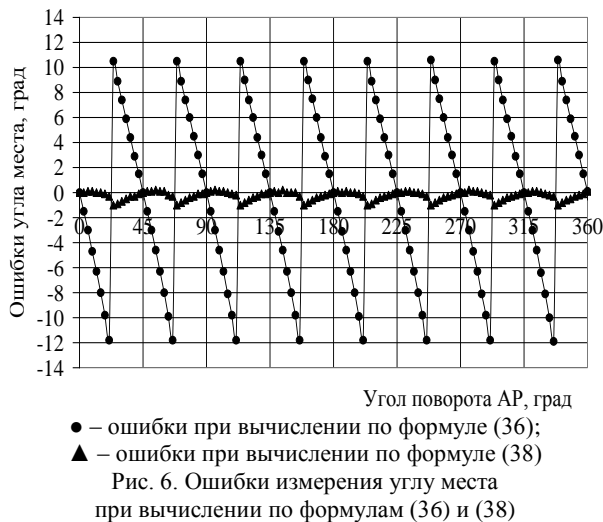
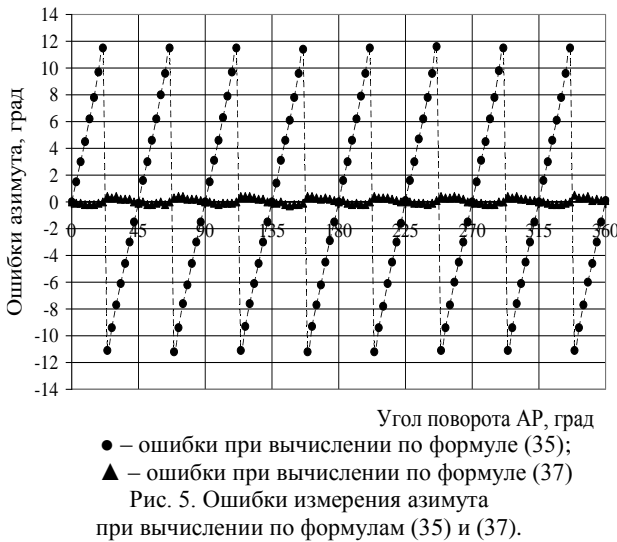
При моделировании задавались следующие условия: азимут  $\alpha = \pm 30^\circ$ ; угол места  $\beta = \pm 30^\circ$ ; величины СКО измерения разностей фаз  $\sigma_\phi = 0^\circ$ ; вектор относительных баз каждой из линейных антенных решеток  $\vec{e} = (9, 6, 4)$ , вариант 6 таблицы [14, с. 30]; угол поворота антенной решетки плавный в пределах  $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$ .

При величине угла поворота АР  $\nu = \pm 45^\circ$  полные разности фаз (21), (22) определяются суммой проекций векторов баз на оси координат, величина которой больше максимальной базы в  $\sqrt{2}$  раз. Для обеспечения работы пеленгатора в секторах  $\alpha = \pm 30^\circ$  и  $\beta = \pm 30^\circ$  величины баз в минимальной длине волны определены по формуле

$$l_i / \lambda_{\text{мин}} \leq e_i / \sqrt{2},$$

где  $l_i$  – расстояние между антеннами, образующими базу;  $\lambda_{\text{мин}}$  – минимальная длина волны пеленгуемого источника сигнала;  $e_i$  – величина базы в целых числах.

Ошибки пеленгования при вычислении пеленгов по формулам (35)–(38) приведены на графиках рис. 5, 6.



Из графиков рис. 5, 6 видно, что при расположении баз вдоль осей прямоугольной системы координат и при повороте антенной решетки на углы, кратные  $45^\circ$  при  $\gamma = 0^\circ$  (20), при вычислении пеленгов по (35), (36) ошибок пеленгования нет. При отклонении антенной решетки от положений, оговоренных выше, ошибки пеленгования отличны от нуля и достигают максимума при  $\gamma = 22,5^\circ$ .

При вычислении пеленгов по формулам (37), (38) ошибки пеленгования уменьшаются в разы относительно ошибок пеленгования полученных при вычислении пеленгов по формулам (35), (36).

Реально при работе фазовых пеленгаторов нет информации об истинном значении азимута и угла места.

Исходной и единственной информацией о величинах азимута и угла места являются результаты, вычисленные по (35) и (36), с ошибками вычисления пеленгов в пределах  $\pm 12^\circ$  (см. рис. 5, 6).

Рассмотрим способ уменьшения ошибок пеленгования на основании формул (37), (38) методом итераций. Представим формулы (37), (38) в виде

$$\alpha_i = \alpha_1 - h_\alpha \beta_{i-1}, \quad (39)$$

$$\beta_i = \beta_1 - h_\beta \alpha_{i-1}, \quad (40)$$

где  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  – результаты вычисления азимута и угла места по (35), (36);  $h_\alpha$  и  $h_\beta$ , – по (33), (34);  $i = 2, 3, \dots$  – номер последовательного вычисления.

Методом математического моделирования выполнена оценка ошибок пеленгования при вычислении азимута и угла места по формулам (35), (36) и при их уточнении по формулам (39), (40).

Моделирование выполнено при условиях, оговоренных выше. Угол поворота антенной решетки задавался по формуле

$$\nu = g \cdot 360^\circ,$$

где  $g$  – случайные числа в диапазоне от 0 до 1.

На графике рис. 7 показан пример положения АР относительно осей координат (см. рис. 3, б) при задании полных разностей фаз по (15), (16) при вычислении пеленгов по формулам (35)–(40).

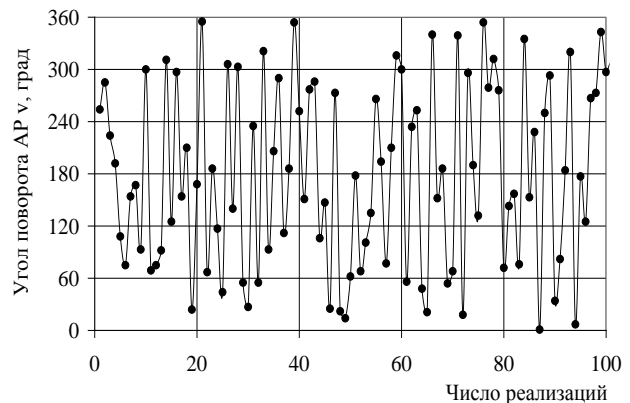


Рис. 7. Угол поворота АР относительно осей координат

Результаты ожидаемых ошибок пеленгования при вычислении пеленгов по формулам (35), (36) и

при трёхкратном уточнении по формулам (39), (40) приведены на графиках рис. 8, 9.

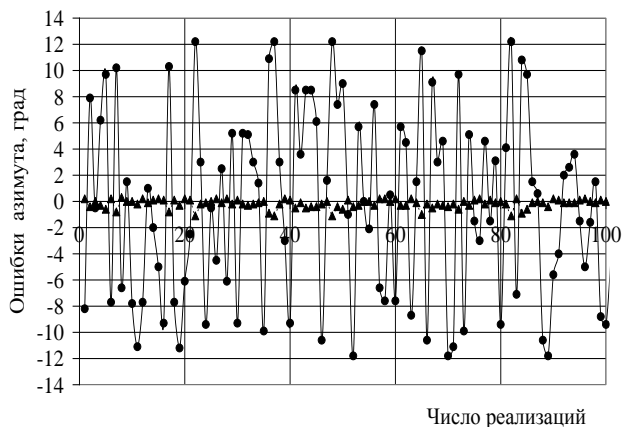


Рис. 8. Ошибки измерения азимута при вычислении пеленгов по формулам (35) и (39)

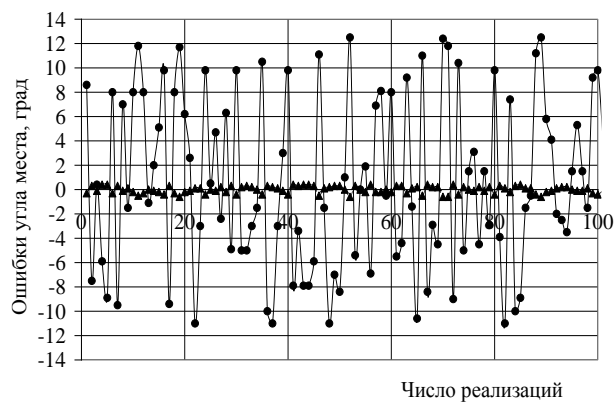


Рис. 9. Ошибки измерения углу места при вычислении пеленгов по формулам (36) и (40)

Из графиков рис. 8, 9 видно, что ошибки вычисления пеленгов уменьшаются в разы при итерационном вычислении по формулам (39), (40) относительно ошибок, полученных при вычислении по формулам (35), (36).

На графиках рис. 10 приведена зависимость СКО измерения угла места от изменения азимута, заданного в пределах  $\pm 30^\circ$ , при вычислении пеленгов по формулам (36) и (40).

Угол поворота антенной решетки в пределах  $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$ . Угол места  $\beta = 0^\circ$ .

На графиках рис. 11 приведена зависимость СКО измерения азимута от изменения угла места, заданного в пределах  $\pm 30^\circ$ , при вычислении пеленгов по формулам (35) и (39).

Угол поворота антенной решетки в пределах  $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$ . Азимут  $\alpha = 0^\circ$ .

В табл. 2 приведены усреднённые оценки СКО пеленгования при повороте антенной решетки относительно осей координат в пределах  $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$  и при задании азимута и угла места в пределах  $\pm 30^\circ$ . Ошибки измерения разности фаз приняты равными нулю.

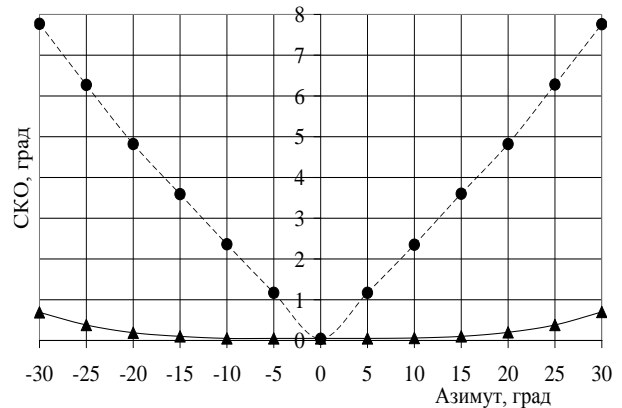


Рис. 10. Зависимость СКО измерения угла места от азимута

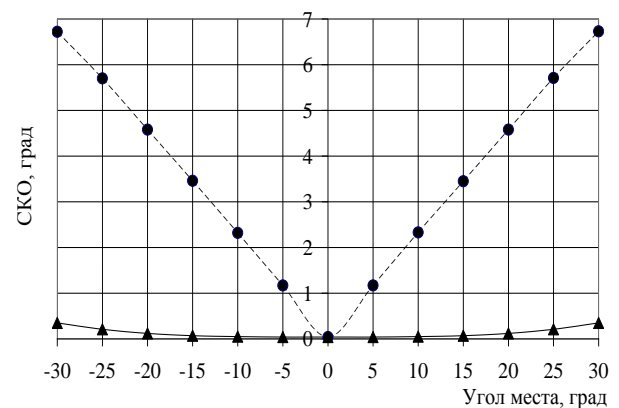


Рис. 11. Зависимость СКО измерения азимута от угла места

В первой строке (см. табл. 2) приведены результаты, полученные при вычислении пеленгов по формулам (35), (36). Во второй, третьей, четвертой и пятой строках приведены результаты при последовательном уточнении пеленгов по формулам (39), (40). В шестой строке приведен результат, полученный при задании истинных значений азимута и угла места при вычислении пеленгов по формулам (37), (38).

Таблица 2

Результаты оценки СКО пеленгования		
Номер вычисления	СКО пеленгования при $\alpha = \pm 30^\circ$ и $\beta = \pm 30^\circ$	
	$\sigma_{\alpha i}$ , град	$\sigma_{\beta i}$ , град
1	6,8	6,74
2	1,54	1,7
3	1,01	1,02
4	0,33	0,28
5	0,21	0,26
6	0,22	0,34

Из табл. 2 видно, что трёхкратное уточнение искомым пеленгов (строка 4) по формулам (39), (40) уменьшает ошибки вычисления на порядок.

Реально ошибки пеленгования зависят от ошибок измерения разностей фаз, которые случайны, и от ошибок, возникающих вследствие поворота антенной решетки относительно осей топоцентриче-

ской системы координат. Вычислены оценки СКО пеленгования при учете всех названных факторов, при задании полных разностей фаз по формулам (15), (16).

В табл. 3 (первая строка) приведены усреднённые оценки СКО пеленгования, ожидаемые при задании ошибок измерения разностей фаз  $\sigma_\phi = 30^\circ$  и при повороте АР в пределах  $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$ . Оценки выполнены при трёхкратном уточнении пеленгов по формулам (39), (40).

Во второй строке приведены оценки СКО пеленгования при  $\sigma_\phi = 30^\circ$ , нулевых значениях азимута и угла места, исключающих влияние поворота АР относительно осей координат на точность вычисления пеленгов.

Таблица 3

## Результаты оценки СКО пеленгования

Заданные условия при оценке ошибок пеленгования	СКО пеленгования	
	$\sigma_\alpha$ , град	$\sigma_\beta$ , град
$\alpha = \pm 30^\circ$ , $\beta = \pm 30^\circ$	1,28	1,06
$\alpha = 0^\circ$ , $\beta = 0^\circ$	0,94	0,92

Как видно из таблицы, при наличии случайных погрешностей измерения разностей фаз имеют место методические погрешности измерения азимута и угла места. Однако они могут быть уменьшены дальнейшим применением итерационного алгоритма.

**Выводы**

Предложенные алгоритмы вычисления пеленгов позволяют по результатам измерений, полученных в связанной системе координат, вычислять угловое положение источника радиоизлучения в топосцентрической системе координат.

Работа выполнена в рамках проекта по госзадачу Минобрнауки РФ № FTWM-2020-0039.

*Литература*

1. Золотарев И.Д. Фазометрическая аппаратура для метеорных исследований // Изв. ТПИ. – 1960. – Т. 105. – С. 72–78.
2. Дудко Б.П. Радионавигация. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2003. – 160 с.
3. Белавин О.В. Основы радионавигации. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.
4. Южаков В.В. Фазовые интерферометры в микроволновых системах посадки: обзор // Зарубежная радиоэлектроника. – 1977. – № 6. – С. 50–66.
5. Сосновский А.А. Радиотехнические средства ближней навигации и посадки летательных аппаратов / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович. – М.: Машиностроение, 1975. – 200 с.
6. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Вузовская книга, 2013. – 360 с.
7. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Военное изд-во, 1989. – 342 с.
8. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.: Военное изд-во, 2001. – 456 с.
9. Способ угловой ориентации объекта. Патент RU 2580827 С1 / Ратушняк В.Н., Дмитриев Д.Д., Фатеев Ю.Л., Тяпкин В.Н., Кремез Н.С., Гарин Е.Н. // Опубликовано: 10.04.2016. – Бюл. № 10.

10. Васин В.А. Информационные технологии в радиотехнических системах / В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров и др., под ред. И.Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. – 762 с.

11. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. – 251 с.

12. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск: гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 147 с.

13. Порубов Г.Г. Алгоритм устранения неоднозначности и вычисления пеленга в многобазовых фазовых пеленгаторах // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 22–27.

14. Порубов Г.Г. Методика расчёта антенных структур многобазовых фазовых пеленгаторов / Г.Г. Порубов, В.П. Денисов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – С. 25–32.

**Порубов Геннадий Гаврилович**

Инженер ОАО «НИИАП», г. Новосибирск  
Дзержинского пр-т, 87, г. Новосибирск, Россия, 630051  
Тел.: + 7 (383-2) 79-52-28  
Эл. почта: porub27@mail.ru

**Денисов Вадим Прокопьевич**

Д-р тех. наук, профессор каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-36-70  
Эл. почта: dvp15@sibmail.com

Porubov G.G., Denisov V.P.

**Calculating the topocentric coordinates of the radio emission source according to the measurement results of the phase direction finder on board a mobile object**

The algorithm to calculate the azimuth and the elevation angle on the source of radio emission in the topocentric system of coordinates is suggested according to the measurements done by the phase direction finder located on board a mobile object. The position of an aerial system direction finder to the earth topocentric system of coordinates can be changed. The change in the position of the aerial system influences the accuracy of calculating the bearings. The method to reduce the errors of bearing by iteration method is considered. The checking procedure of the algorithm by mathematical modelling is carried out.

**Keywords:** phase direction finder; antenna array; calculation of the bearing; estimation of the bearing errors.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-7-15

*References*

1. Zolotarev I.D. *Fazometricheskaya apparatura dlya meteornyuh issledovaniy* [Phase-meter devices for meteor investigations]. *Izvestiya TPI*, 1960, vol. 105, pp. 72–78 (in Russ.).
2. Dudko B.P. *Radionavigatsia* [Radionavigation]. Tomsk: Publishing office of TUSUR University, 2003. 160 p. (in Russ.).

3. Belavin O.V. *Osnovi radionavigatsii* [Fundamentals of radionavigation]. Moscow, Sovetskoye radio, 1977, 320 p. (in Russ.).

4. Yuzhakov V.V. *Fazovye interferometri v microvolnovih sistemah posadki* [Phase interferometers in microwave systems of landing]. *Review. Foreign radioelectronics*. 1977, no. 6. pp. 50–66 (in Russ.).

5. Sosnovskii A.A., Khaimovich I.A. *Radiotekhnicheskie sredstva blizhney navigatsii i posadki letatel'nykh apparatov* [Radiotechnical means of short-range navigation and aircraft landing]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 200 p. (in Russ.).

6. Kuprianov A.I. *Radioelektronnaya borjba* [Electronic warfare]. Moscow, Vuzovskaya kniga, 2013. 360 p. (In Russ.).

7. Palij A.I. *Radioelektronnaya borjba* [Radioelectronic warfare]. Moscow, Military Publishing House, 1989. 342 p. (in Russ.).

8. Smirnov Ju.A. *Radiotekhnicheskaya razvedka* [Radio reconnaissance]. Moscow, Military Publishing House, 2001. 456 p. (in Russ.).

9. Ratushnyak V.N., Dmitriev D.D., Fateev Ju.L., Tyapkin V.N., Kremez N.S., Garin E.N.. *Sposob uglovoj orientatsii objekta* [Method of the object angular orientation]. Patent RF no. 2580827, 2016.

10. Vasin V.A., Vlasov I.B., Egorov Ju. M. and others published under Fedorov I.B. *Informatsionnie tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemah* [Information technologies in radiotechnical systems]. Moscow, Publishing House of MSTU after Bauman, 2003. 762 p. (in Russ.).

11. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatori* [Phase radio direction finders]. Tomsk. Publishing office of TUSUR University, 2002, 251 p. (in Russ.).

12. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritel'nykh sistem* [Theory of phase measurement systems]. Tomsk, Publishing office of TUSUR University, 2007. 147 p. (in Russ.).

13. Porubov G.G. *Algoritm ustraneniya neodnaznachnosti i vichisleniya pelenga v mnogobazovykh fazovykh pelengatorah* [Algorithm of eliminating ambiguity and calculating bearing in multi-base phase direction finders]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 22–27 (in Russ.).

14. Porubov G.G., Denisov V.P. *Metodika rascheta anten'nykh struktur mnogobazovykh fazovykh pelengatorov* [Methods of calculating the structures of antenna arrays for multi-base phase direction finders]. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, vol. 37, no. 3, pp. 25–32 (in Russ.).

---

**Gennadiy G. Porubov**

Engineer, OJSC «NIIAP», Novosibirsk  
87, Dzerzhinsky pr., Novosibirsk, Russia, 630051  
Phone: + 7 (383-2) 79-52-28  
Email: porub27@mail.ru

**Vadim P. Denisov**

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of  
Radio Engineering Systems, Tomsk State University  
of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-36-70  
Email: dvp15@simmail.com



УДК 621.396.677.83

А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов

## Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой

Предложен полуаналитический метод для расчета эффективности экранирования (ЭЭ) корпуса с апертурой, заполненной диэлектрическим или магнитным материалом. Метод основан на сочетании квазистатического анализа копланарных полосковых линий передачи (КПЛ) и аналитической модели эквивалентной схемы корпуса. Моделирование КПЛ сводится к решению простой электростатической задачи и может быть выполнено любым доступным численным методом. При этом вычисление ЭЭ может быть выполнено на основе любой из существующих моделей эквивалентной схемы корпуса. В диапазоне частот до 1 ГГц выполнено обширное тестирование предложенного метода на примере стандартизированного корпуса  $300 \times 120 \times 300$  мм<sup>3</sup>. Чтобы показать возможности метода, представлены результаты анализа ЭЭ тестовых корпусов с вентиляционной решеткой из ПВХ и со стеклом в апертуре. Используя этот метод совместно с ранее опубликованной аналитической моделью, выполнены вычисления ЭЭ корпуса с проводящей пластиной внутри. Показано, что предложенный метод обладает приемлемой точностью, а среднее значение абсолютной погрешности не превышает 6,4 дБ.

**Ключевые слова:** эффективность экранирования, метод эквивалентной схемы корпуса, квазистатическое моделирование.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23

Экранирующие корпуса широко применяются для защиты радиоэлектронных средств (РЭС) от воздействия излучаемых электромагнитных помех. Способность корпуса обеспечивать защиту РЭС определяется значением его эффективности экранирования (ЭЭ), которая, прежде всего, зависит от конструкции корпуса [1]. Значительное влияние на ЭЭ также оказывает внутреннее содержимое корпуса, такое как печатные платы [2], металлические пластины [3], кабельные сборки [4] и др. Помимо этого, величина ЭЭ во многом зависит от заполнения апертуры корпуса [5, 6]. Таким образом, создание экранирующего корпуса является сложной задачей, требующей учета всех особенностей конструкции проектируемого РЭС.

Для оценки ЭЭ корпусов широко используются численные методы [7–10], которые позволяют определять ЭЭ сложных и детализированных экранирующих конструкций с высокой точностью, однако требуют значительных вычислительных затрат. При этом большинство коммерческих программных продуктов, основанных на численных методах, являются дорогостоящими и по этой причине недоступными для широкого круга разработчиков [11]. По сравнению с численными методами, аналитические модели вычисления ЭЭ [12–15] обладают значительно меньшей вычислительной сложностью. Однако они пригодны только для анализа простых экранирующих структур, поэтому их применение целесообразно лишь на ранних этапах проектирования РЭС. Исходя из описанных недостатков, актуальной задачей для совершенствования теории экранирования является разработка универсальных и быстрых гибридных или полуаналитических методов оценки ЭЭ [16–18]. Примером может послужить метод [19] для анализа ЭЭ корпуса с апертурой произвольной формы, основанный на сочетании численного анализа и аналитического метода эквивалентной схемы [13].

В этой статье предлагается полуаналитический метод для оценки ЭЭ корпуса с апертурой, заполненной диэлектрическим или магнитным материалом. Этот метод основан на сочетании аналитического метода из [13] и квазистатического моделирования, которое используется для определения импеданса стенки корпуса с апертурой  $Z_{ар}$ . Расчет  $Z_{ар}$  сводится к решению простых электростатических задач, занимающих существенно меньшее время по сравнению с полноволновым моделированием, используемым в [19]. Вычисления могут быть выполнены с помощью любого доступного численного метода (например, FEM или MoM), в том числе при использовании свободно распространяемого программного обеспечения. Поскольку предложенный метод основан на эквивалентной схеме корпуса, то он может быть объединен со многими существующими аналитическими моделями, разработанными для оценки ЭЭ заполненных корпусов [2–4], корпусов с апертурами на нескольких стенках [20] и т.д.

### Расчет импеданса стенки с апертурой

В соответствии с [13], экранирующий корпус с апертурой при воздействии на него плоской электромагнитной волны может быть представлен в виде эквивалентной схемы (рис. 1), в которой плоская волна заменяется источником напряжения с внутренним сопротивлением  $Z_0 = 120\pi$  Ом, корпус представлен в виде короткозамкнутого отрезка прямоугольного волновода, а фронтальная стенка корпуса заменяется импедансом  $Z_{ар}$ . При этом  $Z_{ар}$  вычисляется на основе погонных параметров копланарной полосковой линии передачи (КПЛ), эквивалентной стенке с апертурой, как [13]

$$Z_{ар} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} jZ_c \operatorname{tg} \left( k \frac{l}{2} \right), \quad (1)$$

где  $l$  – ширина апертуры,  $a$  – ширина фронтальной стенки корпуса ( $l/a$  представляет собой корректиру-

ющий коэффициент, определяющий связь между корпусом и его стенкой),  $Z_c$  и  $k$  – характеристический импеданс и постоянная распространения КПЛ.

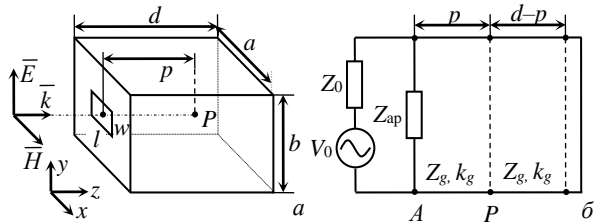


Рис. 1. Экранирующий корпус с апертурой (а) и его эквивалентная схема (б)

Для КПЛ с заполнением постоянная распространения может быть вычислена как [21]

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{re} \mu_{re}}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны источника излучения,  $\epsilon_{re}$  и  $\mu_{re}$  – эффективные значения относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей заполнения.

Поскольку КПЛ имеет конечную ширину проводников, то значения  $\epsilon_{re}$  и  $\mu_{re}$  могут быть получены с помощью квазистатического моделирования. Рассмотрим подвешенную в воздухе КПЛ с характеристическим импедансом  $Z_{c1}$  и толщиной  $t$ , в которой пространство  $w$  между торцами проводников заполнено материалом с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  (рис. 2). Для данной структуры значение  $\epsilon_{re}$  может быть получено как [22]

$$\epsilon_{re} = C/C_0, \quad (3)$$

где  $C_0$  – погонная ёмкость КПЛ без заполнения,  $C$  – погонная ёмкость КПЛ с диэлектрическим заполнением пространства между проводниками.

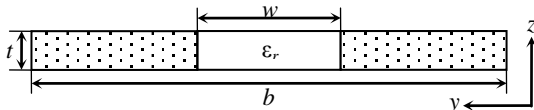


Рис. 2. Поперечное сечение двухпроводной КПЛ, эквивалентной стенке корпуса с заполненной апертурой

Для аналогичной КПЛ, заполненной материалом с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r$ , значение  $\mu_{re}$  может быть вычислено как

$$\mu_{re} = L/L_0, \quad (4)$$

где  $L_0$  и  $L$  – погонные индуктивности КПЛ в отсутствие и в присутствии заполнения магнитным материалом между проводниками соответственно.

Для вычисления погонной индуктивности в (4) целесообразно использовать электростатическую аналогию [23]. Следуя ей, для КПЛ с магнитным заполнением между проводниками погонная индуктивность может быть вычислена как

$$L = \mu_0 \epsilon_0 / C', \quad (5)$$

где  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  – магнитная и электрическая постоянные,  $C'$  – дополнительная погонная ёмкость КПЛ, в которой пространство между проводниками заполнено материалом с  $\epsilon'_r = 1/\mu_r$ .

Подстановка (5) в (4) дает

$$\mu_{re} = \frac{L}{L_0} = \frac{\mu_0 \epsilon_0 C_0}{\mu_0 \epsilon_0 C'} = \frac{C_0}{C'}. \quad (6)$$

Таким образом, выражения (3) и (6) могут быть применены при вычислении  $k$  для КПЛ с неоднородным диэлектрическим или магнитным заполнением соответственно. При этом, объединяя (2)–(6) и учитывая, что  $Z_c = (L/C)^{1/2}$ , импеданс  $Z_{ap}$  может быть рассчитан для трех разных случаев. Так, если апертура заполнена материалом с  $\mu_r = 1$  и  $\epsilon_r > 1$ , то

$$Z_{ap} = j \frac{1}{2} \frac{l}{a} \frac{1}{c \sqrt{CC_0}} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{C}{C_0}} \right), \quad (7)$$

где  $c$  – скорость света в свободном пространстве.

Для материала с  $\mu_r > 1$  и  $\epsilon_r = 1$

$$Z_{ap} = j \frac{1}{2} \frac{l}{a} \frac{1}{c \sqrt{C'C_0}} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{C_0}{C'}} \right). \quad (8)$$

Наконец, если апертура заполнена материалом с  $\mu_r > 1$  и  $\epsilon_r > 1$ , то

$$Z_{ap} = j \frac{1}{2} \frac{l}{a} \frac{1}{c \sqrt{C'C}} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{C}{C'}} \right). \quad (9)$$

Полученные выражения (7)–(9) могут быть применены для расчета импеданса фронтальной стенки произвольной формы с неоднородным заполнением апертуры. При этом численный анализ используется только для получения погонных емкостей, что значительно уменьшает вычислительные затраты по сравнению с [19]. При решении электростатической задачи могут быть учтены неоднородности стенки корпуса, такие как элементы крепежа, загибы кромки металлического листа и т.п.

При последующих вычислениях ЭЭ используется эквивалентная схема из [13], представленная на рис. 1. На первом шаге импеданс  $Z_{ap}$  фронтальной стенки с апертурой вычисляется по (7)–(9) как параллельное соединение двух входных сопротивлений короткозамкнутых отрезков эквивалентной КПЛ. Для этого, на основе погонных параметров, полученных по результатам моделирования КПЛ, определяются характеристический импеданс  $Z_c$  и постоянная распространения  $k$  вдоль оси  $x$  (см. рис. 1, а). После чего расчет характеристического импеданса  $Z_g$  и постоянной распространения  $k_g$  выполняется для корпуса (вдоль оси  $z$  на рис. 1, а). Затем, используя теорему Тевенина и выражения для вычисления входного сопротивления линии передачи, выполняются преобразования эквивалентной схемы корпуса в точку наблюдения  $P$ , а из токов и напряжений в преобразованной схеме вычисляется ЭЭ. Более подробно методика расчета ЭЭ по методу эквивалентной схемы корпуса изложена в обзорной работе [24].

#### Тестирование метода

В данном разделе представлены результаты тестирования предложенного метода. Во всех рассмотренных случаях для вычисления параметров КПЛ применялся метод моментов с поверхностной

дискретизацией структуры. Для достижения хорошей сходимости для каждой КПЛ выполнялось уточнение сетки. Значения погонных ёмкостей рассчитывались на основе модели из [25].

В первую очередь, для проверки (5) выполнен расчет погонной индуктивности трех двухпроводных структур с магнитным заполнением, представленных на рис. 3. Сравнивались результаты, полученные с помощью (5), аналитических выражений из [26] (для структур на рис. 3, *a* и *б*) и программы FEMM [27] (для структуры на рис. 3, *в*). Полученные результаты приведены в табл. 1. Видно, что значения погонной индуктивности, рассчитанные с помощью (5) и [26, 27], хорошо согласуются, т.е. (5) может быть применено для расчета индуктивности с приемлемой точностью.

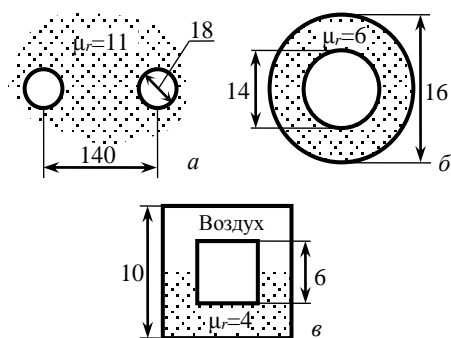


Рис. 3. Тестовые двухпроводные структуры (размеры указаны в мм)

Далее для проверки (7) в диапазоне 1–1000 МГц выполнены вычисления ЭЭ в центре корпуса  $a = 300$  мм,  $b = 120$  мм и  $d = 300$  мм (см. рис. 1) с апертурой, расположенной на фронтальной стенке толщиной  $t = 1$  мм. При вычислениях применялась структура КПЛ из рис. 2. Рассмотрено 2 случая. В случае 1 корпус содержал апертуру  $w = l = 80$  мм, заполненную материалом с  $\epsilon_r = 80$ . В случае 2 использовалась апертура с  $l = 160$  мм,  $w = 6$  мм и  $\epsilon_r = 10$ .

При вычислениях предложенным методом ЭЭ определялась, следуя [13]. Сравнивались результаты, полученные предложенным методом и методом конечных элементов (МКЭ). При расчетах по МКЭ ЭЭ определялась из напряженности электрического поля, а в качестве материала корпуса применялся идеальный проводник. При дискретизации структуры использовалось адаптивное уточнение сетки. Начальное число ячеек на длину волны составляло 40, а уточнение сетки не превышало 30% от общего числа элементов на каждом шаге. Во всех случаях  $\epsilon_r$  оставалось постоянным во всем частотном диапазоне. Результаты вычисления ЭЭ представлены на рис. 4, где также приведены частотные зависимости ЭЭ корпусов с пустыми апертурами (по МКЭ).

Из рис. 4 видно, что результаты, полученные по МКЭ и предложенным методом, согласуются. Средние значения абсолютной погрешности ( $\Delta$ ) составляют 6,4 дБ (см. рис. 4, *a*) и 2,9 дБ (см. рис. 4, *б*).

Таблица 1

Результаты расчета погонной индуктивности

Структура	(5) мГн/м	[26] или [27], мГн/м
Рис. 3, <i>a</i>	12,058	12,069
Рис. 3, <i>б</i>	0,1602	0,1601
Рис. 3, <i>в</i>	0,1413	0,1427

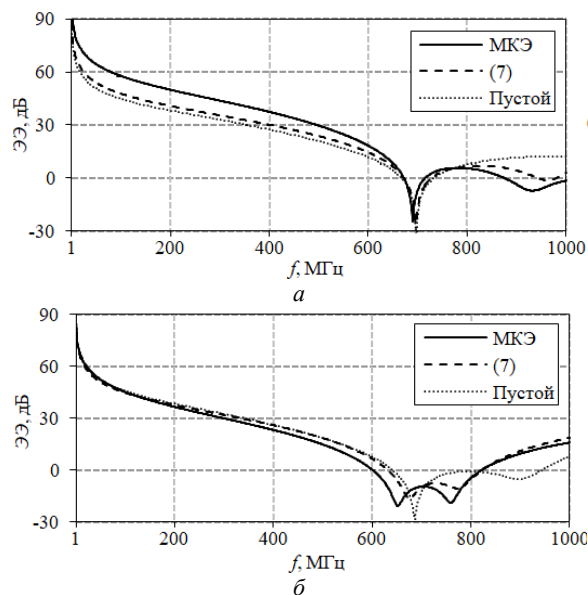


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ корпуса с апертурой: *a* –  $w = l = 80$  мм; *б* –  $l = 160$  мм,  $w = 6$  мм

При этом предложенный метод требует существенно меньших вычислительных затрат. Так, для случая 2 время вычисления частотных зависимостей из 1000 точек при помощи МКЭ и предложенного метода составило 1238 и 5,16 с соответственно (ПК с Intel Core i5 3,4 ГГц и 8 Гб ОЗУ). При заполнении апертур диэлектриком их резонансные частоты сдвигаются в низкочастотную область, а ЭЭ вблизи этих частот снижается вплоть до отрицательных значений. Из рис. 4, *б* видно, что для случая 2 резонансная частота апертуры смещается на 155 МГц, что приводит к наложению резонансов корпуса и апертуры, а ЭЭ становится отрицательной в диапазоне частот 600–820 МГц. В случае 1 резонанс апертуры смещается на 944 МГц (на частоту 931 МГц при расчетной резонансной частоте для пустой апертуры  $80 \times 80$  мм<sup>2</sup>  $f_r = c/2l = 1875$  МГц). При этом в области частот до 650 МГц ЭЭ корпуса с заполненной апертурой оказывается более высокой, чем при пустой апертуре.

Используя (8) и методику из [13], в диапазоне 1–1000 МГц выполнены вычисления ЭЭ в центре корпуса ( $a = d = 300$  мм,  $b = 120$  мм) с апертурой  $w = l = 80$  мм, заполненной магнитным материалом с  $\mu_r = 10, 80, 160$  (КПЛ из рис. 2). Для подтверждения корректности (8) вычисления ЭЭ данной структуры также выполнены при помощи МКЭ. Для вычисленных частотных зависимостей значение  $\Delta$  составило 2,9 дБ (при  $\mu_r = 10$ ), 1,6 дБ (при  $\mu_r = 80$ ) и 4,5 дБ (при  $\mu_r = 160$ ). Результаты вычисления ЭЭ для случая наибольшей погрешности (при  $\mu_r = 160$ ) приведены на рис. 5, где также представлена частотная зависи-

мость ЭЭ для корпуса с пустой апертурой. В табл. 2 представлены значения ЭЭ, рассчитанные для трех исследуемых случаев на частотах 300, 600 и 900 МГц.

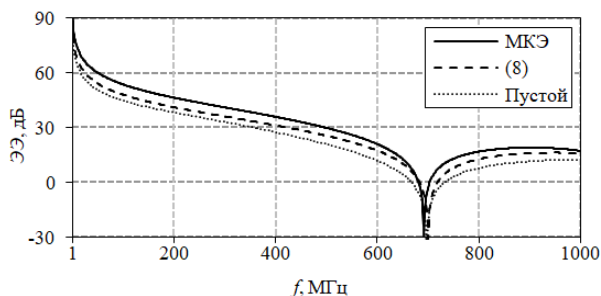


Рис. 5. Частотные зависимости ЭЭ корпуса с апертурой, заполненной материалом с  $\mu_r = 160$

Таблица 2

Значения ЭЭ корпуса с заполненной апертурой (дБ)						
$\mu_r$	300 МГц		600 МГц		900 МГц	
	МКЭ	(8)	МКЭ	(8)	МКЭ	(8)
10	33,1	35,9	13,9	17,3	12,4	15,8
80	37,6	36,0	17,8	17,4	15,9	16,1
160	40,8	36,1	20,9	17,4	18,9	16,2

Из полученных результатов видно, что при увеличении магнитной проницаемости материала, заполняющего апертуру, ЭЭ корпуса увеличивается. В результате при  $\mu_r = 160$  ЭЭ корпуса с заполненной апертурой оказывается в среднем на 8,5 дБ выше, чем ЭЭ пустого корпуса (см. рис. 5). При этом резонансные частоты не претерпевают значительных изменений в выбранном диапазоне даже при высоких значениях  $\mu_r$ .

Далее для проверки (9) в диапазоне частот 1–1000 МГц выполнены вычисления ЭЭ того же корпуса с апертурой, заполненной магнитоэлектрическим материалом с  $\mu_r = 10$  и  $\epsilon_r = 80$ . При вычислении погонных параметров применялась структура КПЛ из рис. 2. Полученные частотные зависимости, вычисленные по МКЭ и предложенным методом, представлены на рис. 6, где также приведены результаты вычисления ЭЭ для корпуса с пустой апертурой.

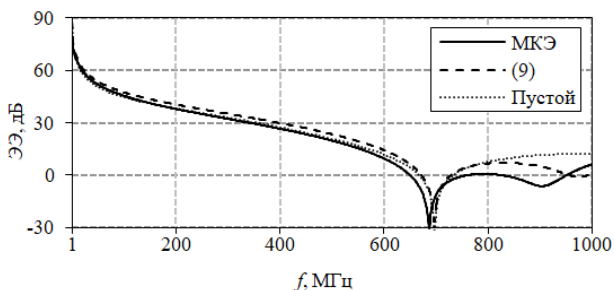


Рис. 6. Частотные зависимости ЭЭ корпуса с апертурой, заполненной материалом с  $\mu_r = 10$  и  $\epsilon_r = 80$

Из рис. 6 видно, что зависимости, полученные по МКЭ и предложенным методом, согласуются, однако наблюдается различие между резонансными частотами апертуры (на 63 МГц). При этом значение погрешности  $\Delta$  составляет всего 4,3 дБ. В диапазоне до 700 МГц частотные зависимости ЭЭ для пустого

и заполненного корпусов отличаются незначительно, поскольку  $\mu_r$  имеет небольшое значение. При этом из-за высокого  $\epsilon_r$  резонансная частота апертуры уменьшается, что приводит к снижению ЭЭ.

### Примеры сложных конструкций

В данном разделе представлены результаты вычисления ЭЭ корпусов со сложной конструкцией стенки с апертурой, демонстрирующие возможности предложенного метода. Для подтверждения полученных результатов приводятся частотные зависимости ЭЭ, полученные с помощью численных методов. Для вычисления погонных параметров КПЛ, как и ранее, применялся метод моментов [25].

Используя предложенный полуаналитический метод и МКЭ, выполнены вычисления ЭЭ в центре типового прямоугольного корпуса со стеклом ( $\epsilon_r = 10$ ), закрепленным во фронтальной стенке сложной формы (внутри пазов, образованных двухугловым изгибом металла). Геометрические размеры исследуемого корпуса и линии передачи, эквивалентной его фронтальной стенке с апертурой, представлены на рис. 7. Полученные зависимости ЭЭ в диапазоне частот 1–1000 МГц приведены на рис. 8. Видно, что частотные зависимости ЭЭ, полученные по МКЭ и предложенным методом, хорошо согласуются ( $\Delta = 3,1$  дБ). На частоте 970 МГц виден резонанс апертуры, из-за которого в верхней части исследуемого частотного диапазона (от 0,8 до 1 ГГц) ЭЭ принимает отрицательные значения.

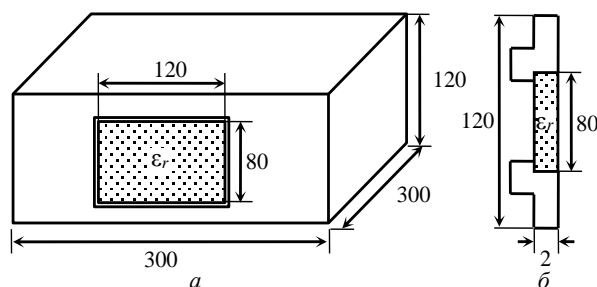


Рис. 7. Корпус со стеклом в апертуре (а) и КПЛ, эквивалентная его стенке (б) (размеры указаны в мм)

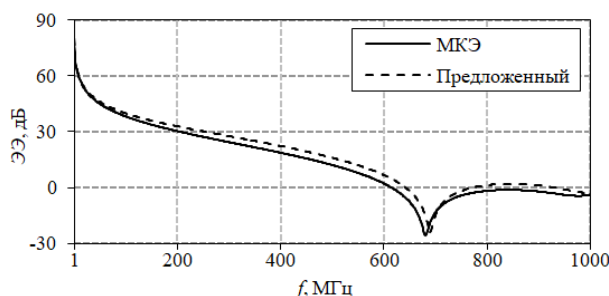


Рис. 8. Частотные зависимости ЭЭ корпуса со стеклом в апертуре

Далее вычислена ЭЭ корпуса с вентиляционной решеткой из ПВХ ( $\epsilon_r = 4$ ) в апертуре. Геометрические размеры исследуемого корпуса и вентиляционной решетки приведены на рис. 9. Поскольку длина волны на верхней границе выбранного частотного диапазона меньше, чем ширина и длина исследуемого корпуса, то для преобразования эквивалентной

схемы в процессе вычисления ЭЭ использовалась методика из [28], позволяющая учитывать распространение внутри корпуса волн высших типов. Для проверки результатов ЭЭ определялась при помощи двух численных методов: метода матрицы линий передачи (ММЛП) и МКЭ. Вычисления по ММЛП выполнялись, следуя [29]. Полученные частотные зависимости представлены на рис. 10. Видно, что частотные зависимости ЭЭ, полученные полуаналитическим методом и по МКЭ, согласуются. При этом на зависимости, полученной по МКЭ, второй резонанс корпуса (828 МГц) отсутствует. Напротив, на зависимости, полученной по ММЛП, данный резонанс присутствует, однако на частоте 1 МГц отличие между результатами достигает 44 дБ.

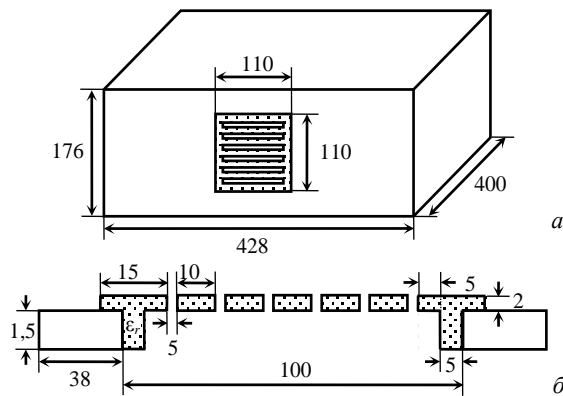


Рис. 9. Корпус с вентиляционной решеткой в апертуре (а) и линия передачи, эквивалентная стенке с апертурой (б) (размеры указаны в мм)

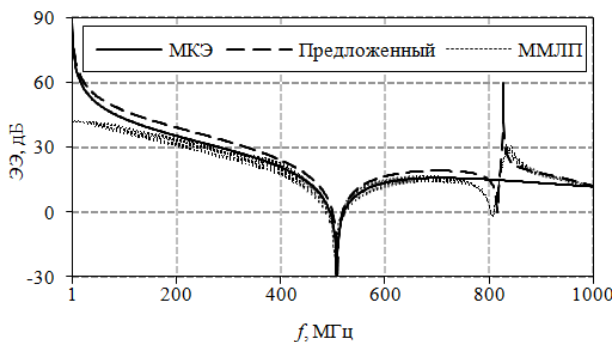


Рис. 10. Частотные зависимости ЭЭ корпуса с вентиляционной решеткой в апертуре

В диапазоне 1–1000 МГц выполнены вычисления ЭЭ корпуса  $a = d = 300$  мм и  $b = 120$  мм со смотровым окном в апертуре ( $w = 30$  мм,  $l = 150$  мм) и печатной платой внутри (рис. 11, а). Окно (рис. 11, б) выполнено из органического стекла с  $\epsilon_{r1} = 3,5$  и закреплено на стенке корпуса при помощи уплотнителя из ABS пластика с  $\epsilon_{r2} = 5$ . В качестве печатной платы рассматривалась бесконечно тонкая идеально проводящая металлическая пластина высотой 70 мм, перекрывающая всю ширину корпуса. Вычисления ЭЭ выполнялись в точке наблюдения  $P$ , расположенной на расстоянии 200 мм от стенки со смотровым окном. Преобразования эквивалентной схемы корпуса выполнялись на основе методики из [30], предназначенной для анализа ЭЭ корпусов с печатными платами или проводящими пластинами внут-

ри. Частотные зависимости ЭЭ, полученные предложенным методом и по МКЭ, представлены на рис. 12.

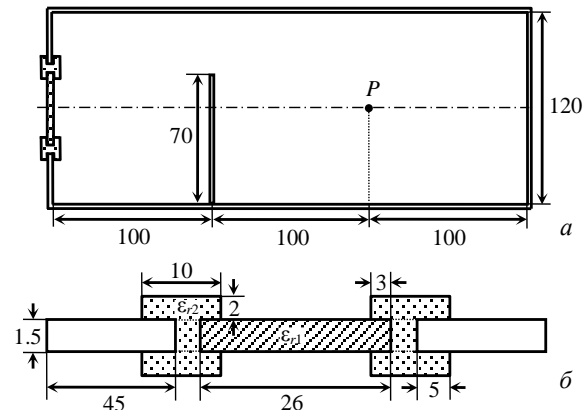


Рис. 11. Вид сбоку корпуса со смотровым окном и проводящей пластиной (а); КПЛ, эквивалентная его фронтальной стенке (б) (размеры указаны в мм)

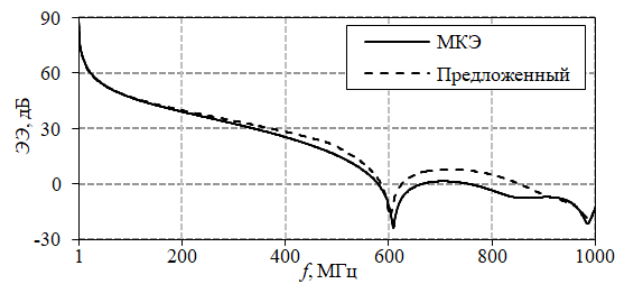


Рис. 12. Частотные зависимости ЭЭ корпуса со смотровым окном и проводящей пластиной внутри

Из рис. 12 видно, что частотные зависимости схожи, а  $\Delta = 3,3$  дБ. Присутствие печатной платы и диэлектрика приводит к наложению резонансов корпуса и апертуры. Вследствие этого в довольно широком диапазоне частот (около 750–1000 МГц) значения ЭЭ корпуса оказываются отрицательными.

#### Ограничения и погрешность метода

Результаты вычислений, представленные в предыдущих разделах, доказывают, что предложенный метод обладает приемлемой точностью и подходит для анализа ЭЭ корпусов с заполненной апертурой. Однако описанный в работе вариант этого метода обладает рядом ограничений. Во-первых, при расчете ЭЭ с использованием (7)–(9) не могут быть учтены высшие типы волн, распространяющиеся в апертуре. Это ограничение связано с использованием квазистатического моделирования и применением при расчете импеданса  $Z_{ap}$  наиболее простого выражения (1) из аналитической модели [13]. Во-вторых, в отличие от [19], предложенный метод не подходит для анализа ЭЭ корпусов с апертурой произвольной формы. При этом он пригоден для прямоугольных апертур, которые довольно часто встречаются на практике. В-третьих, в описанном варианте предложенного метода не может быть учтено произвольное положение апертуры во фронтальной стенке корпуса. Наконец, необходимо отметить, что электростатическая аналогия (5), применяемая в данной работе для вычисления погонной индуктивности,

имеет собственные ограничения. Так, при моделировании с использованием (5) частота предполагается настолько высокой, что линии магнитного поля можно считать расположенными вне сечений проводников КПЛ. Иными словами, данная электростатическая аналогия не может гарантировать удовлетворительную точность результатов при решении низкочастотных задач экранирования.

Погрешность предложенного метода во многом зависит от выражения, применяемого для вычисления импеданса  $Z_{ар}$ . Так, существенное влияние на ЭЭ оказывает коэффициент  $l/a$ , который может быть заменен на другой коэффициент, позволяющий получить более корректные результаты, например, из [29]. Заметную долю погрешности может вносить неверное определение резонансной частоты апертуры, которое зависит от аргумента функции  $tg$ , применяемой в выражениях для вычисления  $Z_{ар}$ . Другими словами, значение резонансной частоты определяется результатами вычисления погонных емкостей при квазистатическом моделировании, поскольку показатель преломления среды, использующийся при расчете длины волны, рассчитывается на основании этих емкостей. Таким образом, точность расчета резонансной частоты апертуры определяется сходимостью результатов квазистатического моделирования КПЛ. При этом для большинства реальных корпусов эквивалентная КПЛ имеет значительную ширину, но небольшую толщину проводников, т.е. для получения точных результатов необходимо утолщение сетки, что, очевидно, приводит к значительному росту вычислительных затрат. Поэтому при моделировании КПЛ наиболее рационально использовать численные методы с поверхностной дискретизацией границ исследуемой структуры (например, метод моментов, примененный в этой работе).

#### Заключение

Предложен полуаналитический метод для расчета ЭЭ корпусов с апертурой, неоднородно заполненной диэлектрическим или магнитным материалом. Метод может быть объединен с любой аналитической моделью на основе эквивалентной схемы корпуса, поэтому его можно использовать для определения ЭЭ сложных конструкций, таких как корпус с печатными платами, кабельными сборками или другими элементами РЭС. Выполнено тестирование предложенного метода. Показано, что он обладает приемлемой точностью в сравнении с численными методами, при этом требует значительно меньших вычислительных затрат. Описаны недостатки метода и предложены способы их преодоления.

Результаты вычислительных экспериментов, выполненных в работе, показывают, что заполнение апертуры значительно влияет на ЭЭ корпуса. Так, увеличение относительной магнитной проницаемости материала, заполняющего апертуру, приводит к увеличению ЭЭ, а заполнение диэлектриком приводит к изменению резонансных частот апертуры, что может значительно ухудшить ЭЭ. Например, для структуры на рис. 11 из-за наложения резонансов

корпуса и апертуры ЭЭ становится отрицательной в широком частотном диапазоне. Таким образом, при проектировании корпуса РЭС необходимо уделять значительное внимание предполагаемому содержанию как самого корпуса, так и его апертур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.

#### Литература

1. On the meaning of enclosure shielding effectiveness / J. Dawson, A.C. Marvin, M.P. Robinson, I. Flintoft // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Netherland, Amsterdam, 2018. – P. 746–751.
2. Li F. Study of the influence of PCB parameters on the shielding effectiveness of metal cavity with holes / F. Li, J. Han, C. Zhang // Proc. of IEEE International technology, networking, electronic and automation control conference. – China, Chengdu, 2019. – P. 1–5.
3. Model of the electromagnetic field inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards / D.W.P. Thomas, A.C. Denton, T. Konefal et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2001. – Vol. 43, No. 2. – P. 161–169.
4. Characterisation of the shielding effectiveness of populated equipment enclosures / D.W.P. Thomas, A. Denton, T. Konefal et al. // Proc. of International conference and exhibition on electromagnetic compatibility. – USA, New York, 1999. – P. 1–6.
5. A fast circuit model description of the shielding effectiveness of a box with imperfect gaskets or apertures covered by thin resistive sheet coatings / T. Konefal, J. Dawson, A.C. Marvin et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2006. – Vol. 48, No. 1. – P. 134–144.
6. Solin J.R. Formula for the field excited in a cavity sealed by a plate backed with a conductive elastomer / J.R. Solin // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 1. – P. 111–116.
7. Araneo R. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects / R. Araneo, G. Lovat // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2009. – Vol. 51, No. 2. – P. 274–283.
8. Study of the shielding properties of enclosures with apertures at higher frequencies using the transmission line modeling method / B.L. Nie, P.A. Du, Y. Yu, Z. Shi // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2010. – Vol. 53, No. 1. – P. 73–81.
9. EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements / M. Li, J. Nuebel, J.L. Drewniak et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2000. – Vol. 42, No. 1. – P. 29–38.
10. Finite element method applied to shielding performance of enclosures / L.B. Gravelle, G.I. Costache // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – USA, Seattle, 1988. – P. 69–72.
11. Куксенко С.П. Методы оптимального проектирования линейных антенн и полосковых структур с учетом электромагнитной совместимости: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.12.07. – Томск, ТУСУР, 2019. – 436 с.
12. Aperture excitation of electrically large, lossy cavities / D.A. Hill, M.T. Ma, A.R. Ondrejka et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1994. – Vol. 36, No. 3. – P. 169–178.
13. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures / M.P. Robinson, T.M. Benson,

C. Christopoulos et al. // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 1999. – Vol. 40, No. 3. – P. 240–248.

14. A fast multiple mode intermediate level circuit model for the prediction of shielding effectiveness of a rectangular box containing a rectangular aperture / T. Konefal, J. Dawson, A. Marvin et al. // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2005. – Vol. 47, No. 4. – P. 678–691.

15. Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with a small aperture / J.R. Solin // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2011. – Vol. 53, No. 1. – P. 82–90.

16. Wallyn W. Fast shielding effectiveness prediction for realistic rectangular enclosures / W. Wallyn, D.D. Zutter, E. Laermans // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2003. – Vol. 45, No. 4. – P. 639–643.

17. Youngfang B. Analysis for shielding effectiveness of infinite metal plate with arrayed apertures using semi-analytical FDTD / B. Youngfang, L. Yinghua // *Proc. of Asia-pacific conference on environmental electromagnetics*. – China, Hangzhou, 2003. – P. 56–59.

18. Shielding effectiveness of screened rooms with line feed-throughs – a semi-analytical approach / H. Karcoon, S. Parr, S. Dickmann, R. Rambousky // *Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility*. – Germany, Dresden, 2015. – P. 312–316.

19. Inbavalli V.P. Calculation of shielding effectiveness of an enclosure with arbitrary shaped apertures using hybrid approach / V.P. Inbavalli, C. Venkatesh, T.R. Suresh Kumar // *Proc. of International conference on electromagnetic interference and compatibility*. – India, Bengaluru, 2018. – P. 1–4.

20. Circuit modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure / J. Shim, D.G. Kam, J.H. Kwon, J. Kim // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2010. – Vol. 52, No. 3. – P. 566–577.

21. Gupta K.C. *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed. / K.C. Gupta, R. Garg, I.J. Bahl. – USA, Norwood: Artech House, 1996. – 547 p.

22. Collin R.E. *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed. / R.E. Collin. – USA, Piscataway: IEEE Press, 1991. – 859 p.

23. Mautz J.R. The inductance matrix of multiconductor transmission line in multiple magnetic media / J.R. Mautz, R.F. Harrington, G.G. Hsu // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. – 1988. – Vol. 36, No. 8. – P. 1293–1295.

24. Иванов А.А. Обзор аналитических моделей для оценки эффективности экранирования металлических корпусов на основе метода эквивалентной цепи / А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов // *Системы управления, связи и безопасности*. – 2019. – № 2. – С. 110–142.

25. Gazizov T.R. Analytic expressions for MoM calculation of capacitance matrix of two dimensional system of conductors and dielectrics having arbitrarily oriented boundaries / T.R. Gazizov // *Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility*. – Canada, Montreal, 2001. – P. 151–155.

26. Grover F.W. *Inductance calculations, working formulas and tables* / F.W. Grover. – USA, NY, Mineola: Dover Publications, 1946. – 286 p.

27. Finite element method magnetics: Home Page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (дата обращения: 15.12.2020).

28. Shi D. 3 high-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture / D. Shi, Y. Shen, Y. Gao // *Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility*. – China, Qingdao, 2007. – P. 361–364.

29. Sadiku M.N.O. *Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB* / M.N.O. Sadiku. – 3rd ed. – USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2009. – 730 p.

30. Ivanov A.A. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure populated with conducting plates / A.A. Ivanov, M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2020. – Vol. 62, No. 5. – P. 2307–2310.

#### Иванов Антон Андреевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

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

Тел.: +7 952 182 01 43

Эл. почта: anton.ivvv@gmail.com

#### Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, доцент каф. ТУ ТУСУРа

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

Тел.: +7-952-888-38-96

Эл. почта: maxmek@mail.ru

Ivanov A.A., Komnatnov M.E.

#### Semi-analytical method for evaluating shielding effectiveness of an enclosure with an aperture

The paper presents a semi-analytical method for calculating the shielding effectiveness (SE) of an enclosure with an aperture filled with a dielectric or magnetic material. The method is based on a combination of quasi-static analysis of coplanar strip lines (CPS) and an analytical model of an enclosure equivalent circuit. A simulation of a CPS is reduced to solving a simple electrostatic problem and can be performed by any available numerical method. The SE calculation can be performed using any of the existing models of an enclosure equivalent circuit. In the range up to 1 GHz, a validation of the proposed method was carried out using a standardized enclosure  $300 \times 120 \times 300 \text{ mm}^3$  as an example. To show the capabilities of the method, the paper presents the results of SE for enclosures with a PVC ventilation grill and a glass in the aperture. Using this method in conjunction with a previously published analytical model, the SE calculations for the enclosure with a conducting plate were also performed. The results show that the proposed method has an acceptable accuracy, and the average value of the absolute error does not exceed 6.4 dB.

**Keywords:** shielding effectiveness, equivalent circuit method, quasi-static simulation.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23

#### References

1. Dawson J., Marvin A.C., Robinson M.P., Flintoft I. On the meaning of enclosure shielding effectiveness. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. The Netherland, Amsterdam, 2018, pp. 746–751.

2. Li F., Han J., Zhang C. Study of the influence of PCB parameters on the shielding effectiveness of metal cavity with holes. *Proc. of IEEE International Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference*. China, Chengdu, 2019, pp. 1–5.

3. Thomas D.W.P., Denton A., Konefal T. et al. Model of the electromagnetic field inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards. *IEEE*

- Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, vol. 43, no. 2, pp. 161–169.
4. Thomas D.W.P., Denton A., Konefal T. et al. Characterisation of the shielding effectiveness of populated equipment enclosures. *Proceedings of International Conference and Exhibition on Electromagnetic Compatibility*. USA, New York, 1999, pp. 1–6.
5. Konefal T., Dawson J., Marvin A.C. et al. A fast circuit model description of the shielding effectiveness of a box with imperfect gaskets or apertures covered by thin resistive sheet coatings. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 1, pp. 134–144.
6. Solin J.R. Formula for the field excited in a cavity sealed by a plate backed with a conductive elastomer. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 1, pp. 111–116.
7. Araneo R., Lovat G. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, vol. 51, no. 2, pp. 274–283.
8. Nie B.L., Du P.A., Yu Y., Shi Z. Study of the shielding properties of enclosures with apertures at higher frequencies using the transmission line modeling method. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 53, no. 1, pp. 73–81.
9. Li M., Nuebel J., Drewniak J.L. et al. EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2000, vol. 42, no. 1, pp. 29–38.
10. Gravelle L.B., Costache G.I. Finite element method applied to shielding performance of enclosures. *Proc. of IEEE International symposium on Electromagnetic Compatibility*. USA, Seattle, 1988, pp. 69–72.
11. Kuksenko S.P. *Metody optimalnogo proektirovaniya linejnyh antenn i poloskovykh struktur s uchetom jelektromagnitnoj sovmestimosti* [Methods of an optimum designs for linear antennas and stripline structures taking into account electromagnetic compatibility. Doctor thesis], Tomsk, Russia, 2019. 436 p. (in Russ.).
12. Hill D.A., Ma M.T., Ondrejka A.R. et al. Aperture excitation of electrically large, lossy cavities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1994, vol. 36, no. 3, pp. 169–178.
13. Robinson M.P., Benson T.M., Christopoulos C. et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1999, vol. 40, no. 3, pp. 240–248.
14. Konefal T., Dawson J., Marvin A.C. et al. A fast multiple mode intermediate level circuit model for the prediction of shielding effectiveness of a rectangular box containing a rectangular aperture. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 678–691.
15. Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with a small aperture. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 82–90.
16. Wallyn W., Zutter D.D., Laermans E. Fast shielding effectiveness prediction for realistic rectangular enclosures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 4, pp. 639–643.
17. Youngfang B., Yinghua L. Analysis for shielding effectiveness of infinite metal plate with arrayed apertures using semi-analytical FDTD. *Proceedings of Asia-pacific Conference on Environmental Electromagnetic*, China, Hangzhou, 2003, pp. 56–59.
18. Karcoon H., Parr S., Dickmann S., Rambousky R. Shielding effectiveness of screened rooms with line feed-throughs – a semi-analytical approach. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Germany, Dresden, 2015, pp. 312–316.
19. Inbavalli V.P., Venkatesh C., Suresh Kumar T.R. Calculation of shielding effectiveness of an enclosure with arbitrary shaped apertures using hybrid approach. *Proceedings of International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*. India, Bengaluru, 2018, pp. 1–4.
20. Shim J., Kam D.G., Kwon J.H., Kim J. Circuitual modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 52, no. 3, pp. 566–577.
21. Gupta K.C., Garg R., Bahl I.J. *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed. USA, Norwood: Artech House, 1996. 547 p.
22. Collin R.E. *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed. USA, Piscataway: IEEE Press, 1991. 859 p.
23. Mautz J.R., Harrington R.F., Hsu G.G. The inductance matrix of multiconductor transmission line in multiple magnetic media. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, vol. 36, no. 8, pp. 1293–1295.
24. Ivanov A.A., Komnatnov M.E. The analytical models review for metal enclosures shielding effectiveness estimating based on the equivalent circuit method. *System of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 110–142.
25. Gazizov T.R. Analytic expressions for MoM calculation of capacitance matrix of two-dimensional system of conductors and dielectrics having arbitrarily oriented boundaries. *Proc. of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Canada, Montreal, 2001, pp. 151–155.
26. Grover F.W. *Inductance calculations, working formulas and tables*. USA, NY, Mineola: Dover Publications, 1946. 286 p.
27. Finite element method magnetics: Home Page [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. (Accessed: December 15, 2020).
28. Shi D., Shen Y., Gao Y. 3 high-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. China, Qingdao, 2007, pp. 361–364.
29. Sadiku M.N.O. *Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB*, 3rd ed. USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2009. 730 p.
30. Ivanov A.A., Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure populated with conducting plates. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, vol. 62, no. 5, pp. 2307–2310.

**Anton A. Ivanov**

Postgraduate student, Department of Television and Control  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-182-01-43  
Email: anton.ivvv@gmail.com

**Maxim E. Komnatnov**

Candidate of Science in Engineering,  
Senior Researcher, Associate Professor,  
Department of Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-888-38-96  
Email: maxmek@mail.ru



УДК 691.396.67

Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов

## Анализ эффективности многопортовой печатной антенны

Рассмотрена печатная микрополосковая антенна, имеющая несколько портов для возбуждения поля круговой поляризации. Произведена оценка полного коэффициента отражения при одновременном возбуждении портов антенны с учетом их взаимного влияния. Исследована полная эффективность антенны в зависимости от количества возбуждаемых портов. Проведено сравнение расчетных характеристик и данных, полученных путем электродинамического моделирования. Получены выражения для определения полного коэффициента отражения с произвольными фазами возбуждения портов. Показано, что полный коэффициент отражения и полная эффективность печатной многопортовой антенны круговой поляризации практически не зависят от количества возбуждаемых портов. В случае возбуждения одного порта многопортовой антенны коэффициент отражения увеличивается, а эффективность уменьшается с ростом количества портов.

**Ключевые слова:** печатная антенна, круговая поляризация, полный коэффициент отражения, полная эффективность.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-24-29

### Характеристики многопортовых антенн

Печатные антенны, которые также называют патч антеннами, благодаря их малым габаритам и массе являются перспективными для широкого круга задач [1, 2], в том числе для систем спутниковой радионавигации [3].

В зависимости от количества возбуждаемых портов печатной антенны и их расположения, а также амплитуд и фаз возбуждения можно получить различные режимы работы. Частным случаем является создание поля круговой поляризации при возбуждении нескольких портов антенны, как показано на рис. 1. Использование антенн с несколькими портами позволяет увеличить коэффициент эллиптичности в большем телесном угле [4] и обеспечить высокую стабильность фазового центра [5].

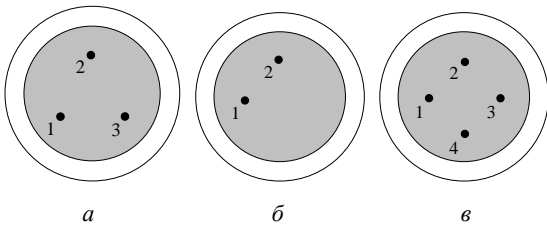


Рис. 1. Многопортовая печатная антенна с портами для создания поля круговой поляризации: с тремя  $N = 3 - a$ ; двумя  $N = 2 - б$ ; четырьмя  $N = 4 - в$

Для многопортовой антенны модули коэффициентов отражения каждого из портов  $|\dot{S}_{i,i}|$  (где  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – количество портов) не дают исчерпывающей информации о значениях падающих и отраженных мощностей, при одновременном возбуждении всех ее портов. В этом случае требуется учет амплитуд и фаз возбуждения всех портов антенны, а также коэффициентов передачи между ними.

За последние годы были предложены различные методы для описания характеристик многопортовых антенн [6–11]. При возбуждении всех портов многопортовой антенны записывают активные  $S$ -параметры, которые представляют собой суперпозицию отраженных волн всех возбужденных портов, норми-

рованную на комплексную амплитуду падающей волны порта  $i$ . В этом случае активный коэффициент  $\dot{S}_{i,1+2+\dots+N}$  показывает, какая часть мощности возвращается на порт  $i$  при возбуждении всех портов антенны  $(1+2+\dots+N)$ :

$$\dot{S}_{i,1+2+\dots+N} = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{b}_i}{\dot{a}_i} = \frac{\dot{a}_1 |\dot{S}_{i,1}| + \dot{a}_2 |\dot{S}_{i,2}| + \dots + \dot{a}_N |\dot{S}_{i,N}|}{\dot{a}_i}, \quad (1)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – комплексные амплитуды падающей и отраженной волн  $i$ -го порта  $N$ -портовой антенны. В [6–8] вводят активный коэффициент отражения  $\Gamma_a^i$ , который для каждого из портов  $i$  соответствует элементам активных  $S$ -параметров:

$$\Gamma_a^i = \dot{S}_{i,1+2+\dots+N}. \quad (2)$$

Следует отметить, что при возбуждении всех портов антенны  $|\Gamma_a^i|$  может принимать значения больше единицы. В этой связи вводят полный активный коэффициент отражения (далее полный коэффициент отражения)  $\Gamma_a^T$ , пределы изменения модуля которого находятся между 0 и 1 [9]. Полный коэффициент отражения равен отношению сумм мощностей отраженных и падающих волн всех портов антенны [10, 11]:

$$\Gamma_a^T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\dot{b}_i|^2}{\sum_{i=1}^N |\dot{a}_i|^2}}. \quad (3)$$

Наряду с  $\Gamma_a^T$  выделяют полную эффективность при многопортовом возбуждении

$$\eta_{\text{total}} = 1 - |\Gamma_a^T|^2, \quad (4)$$

которая учитывает все потери в антенне [12, 13].

Ниже произведено сравнение характеристик печатной антенны с различным количеством портов возбуждения ( $N = 2; 3; 4$ ) для создания поля круговой поляризации.

### Двухпортовое возбуждение антенны

Рассмотрим частотные зависимости коэффициентов матрицы рассеяния антенны для  $N = 2$ . Порты расположены таким образом, чтобы обеспечить воз-

буждение двух ортогональных мод  $TM_{10}$  и  $TM_{01}$  с фазовым смещением  $90^\circ$  для получения круговой поляризации (см. рис. 1, б). Сначала для определения коэффициентов матрицы рассеяния рассмотрим случай при возбуждении только порта 1 (активный порт), а порт 2 (пассивный) будет нагружен на согласованную нагрузку. Затем порт 2 будет активным, а порт 1 пассивным. Моделирование этих случаев в CST Studio Suite показало, что коэффициенты отражения  $|S_{11}| = |S_{22}|$  ниже  $-10$  дБ соответствуют диапазону частот  $ff_0 \approx 0,98-1,02$  (рис. 2). Значение коэффициентов передачи между портами в этой полосе частот ниже  $-18$  дБ. Следует отметить, что для патч антенны круглой формы  $S_{ii} = S_{jj}$ ,  $S_{ij} = S_{ji}$ , так как она обладает симметрией и не содержит взаимных связей

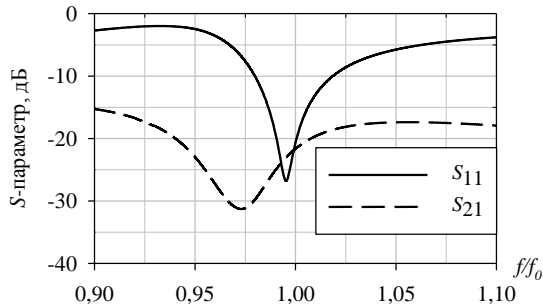


Рис. 2. Коэффициенты матрицы рассеяния с  $N = 2$

Вычислим полный коэффициент отражения  $\Gamma_a^T$  с учетом взаимного влияния портов. В этом случае равноамплитудное возбуждение будет организовано как в порте 1, так и в порте 2. Фазовое смещение между ними составит  $90^\circ$  для возбуждения поля круговой поляризации. Запишем матрицу рассеяния с соответствующим вектором возбуждения

$$\begin{bmatrix} \dot{b}_1 \\ \dot{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{a}_1 \\ \dot{a}_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $\dot{a}_1 = a_1 \cdot e^{j\theta_0} = 1$ ,  $\dot{a}_2 = a_2 \cdot e^{j\theta_1} = j$ , при  $a_1 = a_2 = 1$ ,  $\theta_0 = 0$ ,  $\theta_1 = \pi/2$ . Поэтому

$$\begin{aligned} \dot{b}_1 &= S_{11} \cdot \dot{a}_1 + S_{12} \cdot \dot{a}_2 = S_{11} + jS_{12}, \\ \dot{b}_2 &= S_{21} \cdot \dot{a}_1 + S_{22} \cdot \dot{a}_2 = S_{21} + jS_{22}. \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку  $|b| = \sqrt{\text{Re}(b)^2 + \text{Im}(b)^2}$ , то

$$|\dot{b}_1| = \sqrt{(S_{11})^2 + (S_{12})^2} = |\dot{b}_2|. \quad (7)$$

Следовательно,

$$\Gamma_a^T = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N |\dot{b}_i|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |\dot{a}_i|^2}} = |\dot{b}_1|. \quad (8)$$

Несложно показать, что в случае равноамплитудного возбуждения двух портов антенны для создания круговой поляризации  $\Gamma_a^T = |\Gamma_a^i|$

$$\begin{aligned} \Gamma_a^1 &= S_{11} + jS_{12}, \\ \Gamma_a^2 &= S_{21} + jS_{22}. \end{aligned} \quad (9)$$

На рис. 3 показаны частотные зависимости коэффициента отражения  $|S_{11}|$  при возбуждении порта 1

и полного коэффициента отражения  $\Gamma_a^T$  при возбуждении двух портов антенны:  $[1(1, 0), 2(1, 90)]$  – обозначения в системе автоматизированного проектирования CST Studio Suite, приведены номер порта и в скобках за номером его амплитуда и фаза. Видно, что кривые схожи благодаря высокой развязке портов

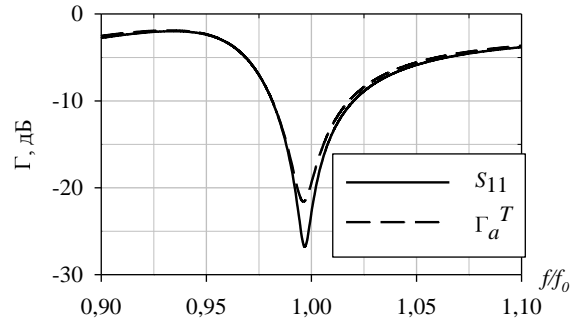


Рис. 3. Коэффициенты отражения антенны при возбуждении двух портов  $\Gamma_a^T$  и при возбуждении первого порта  $S_{11}$

Рассчитаем полную эффективность антенны при помощи  $\Gamma_a^T$  по формуле (4) и сравним с результатами, полученными при расчете  $\eta_{total}$  в CST Studio Suite. Следует отметить, что в CST Studio Suite расчет полной эффективности производится посредством оценки свойств направленности антенны в дальней зоне по мониторам поля, при этом

$$\eta_{total} = \frac{rG(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{P_{rad}}{P_{stim}}, \quad (10)$$

где  $rG(\theta, \varphi)$  – реальный КУ, учитывающий прямые и обратные потери в антенне  $D(\theta, \varphi)$  – коэффициент на

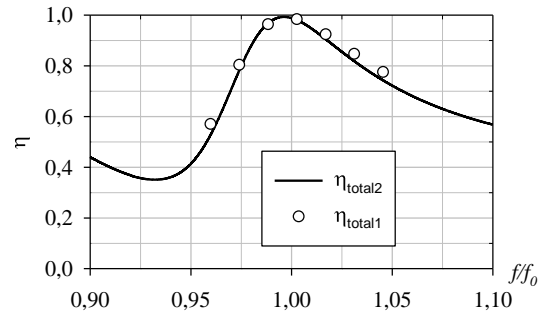


Рис. 4. Эффективность антенны, рассчитанная при помощи  $\Gamma_a^T$  ( $\eta_{total2}$ ) и вычислений в CST Studio Suite ( $\eta_{total1}$ )

Из рис. 4 следует, что полная эффективность близка к единице и совпадает в случае расчета и моделирования для равноамплитудного возбуждения.

Для произвольных фазовых смещений между портами  $\theta_1$  можно записать

$$\Gamma_a^T = \frac{\sqrt{|S_{11}a_1 + S_{12}a_2e^{j\theta_1}|^2 + |S_{21}a_1 + S_{22}a_2e^{j\theta_1}|^2}}{\sqrt{|a_1|^2 + |a_1e^{j\theta_1}|^2}}, \quad (11)$$

с учетом того, что  $e^{j\theta_1} = \cos \theta_1 + j \sin \theta_1$  и

$$|\dot{b}| = \sqrt{\text{Re}(b)^2 + \text{Im}(b)^2}, \text{ получим}$$

$$\Gamma_a^T = \sqrt{(S_{11} + S_{12} \cos \theta_1)^2 + (S_{12} \sin \theta_1)^2}. \quad (12)$$

Так как коэффициент передачи между портами антенны мал для  $N = 2$ , то и эффективности при однопортовом и двухпортовом возбуждениях будут практически одинаковыми. При этом значения эффективностей на собственной резонансной частоте антенны стремятся к единице. Интерес представляет анализ случая возбуждения антенны тремя и четырьмя портами, в которых количество связей портов будет больше, чем при  $N = 2$ .

**Трехпортовое возбуждение антенны**

Для  $N = 3$  (см. рис. 1, а) коэффициенты передачи между портами ( $S_{21} = S_{31}$ ) менее  $-10$  дБ в полосе рабочих частот (рис. 5) что больше чем для случая  $N =$

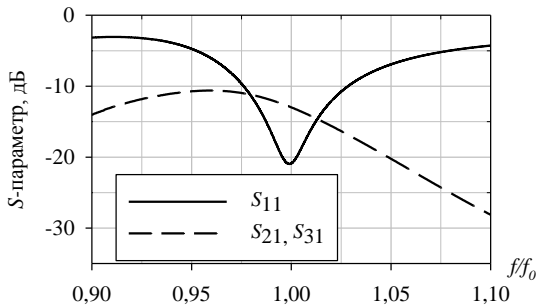


Рис. 5. Коэффициенты матрицы рассеяния с  $N=3$

В общем виде полный коэффициент отражения

$$\Gamma_a^T = \frac{\sqrt{|\dot{b}_1|^2 + |\dot{b}_2|^2 + |\dot{b}_3|^2}}{\sqrt{|\dot{a}_1|^2 + |\dot{a}_2|^2 + |\dot{a}_3|^2}} = \frac{\sqrt{|S_{11}a_1 + S_{12}a_2e^{j\theta_1} + S_{13}a_3e^{j\theta_2}|^2 + |S_{21}a_1 + S_{22}a_2e^{j\theta_1} + S_{23}a_3e^{j\theta_2}|^2 + |S_{31}a_1 + S_{32}a_2e^{j\theta_1} + S_{33}a_3e^{j\theta_2}|^2}}{\sqrt{|a_1|^2 + |a_2e^{j\theta_1}|^2 + |a_3e^{j\theta_2}|^2}}, \quad (13)$$

где  $\dot{a}_1 = a_1 \cdot e^{j\theta_0} = 1$ ,  $\dot{a}_2 = a_2 \cdot e^{j\theta_1}$ ,  $\dot{a}_3 = a_3 \cdot e^{j\theta_2}$  при  $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ .  $\theta_0=0$ ,  $\theta_1=2\pi/3$ ,  $\theta_3=4\pi/3$  для получения круговой поляризации. Поэтому при  $S_{12}=S_{13}$  получим

$$\dot{b}_1 = S_{11} + S_{12}(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) + jS_{12}(\sin \theta_1 + \sin \theta_2), \quad (14)$$

соответственно

$$|\dot{b}_1|^2 = (S_{11} + S_{12}(\cos \theta_1 + \cos \theta_2))^2 + (S_{12}(\sin \theta_1 + \sin \theta_2))^2, \quad (15)$$

при  $S_{11} = S_{22} = S_{33}$  и  $S_{12} = S_{21} = S_{13} = S_{31}$  будем иметь

$$|\dot{b}_1|^2 = |\dot{b}_2|^2 = |\dot{b}_3|^2, \text{ поэтому}$$

$$\Gamma_a^T = \sqrt{(S_{11} + S_{12}(\cos \theta_1 + \cos \theta_2))^2 + (S_{12}(\sin \theta_1 + \sin \theta_2))^2}. \quad (16)$$

При возбуждении портов [1(1, 0), 2(1, 120), 3(1, 240)]

$$\Gamma_a^T = S_{11} - S_{12}. \quad (17)$$

Графики частотных зависимостей полного коэффициента отражения  $\Gamma_a^T$  и  $S_{11}$  показаны на рис. 6, из которого следует, что минимумы характеристик совпадают для случаев возбуждения одного и трех портов

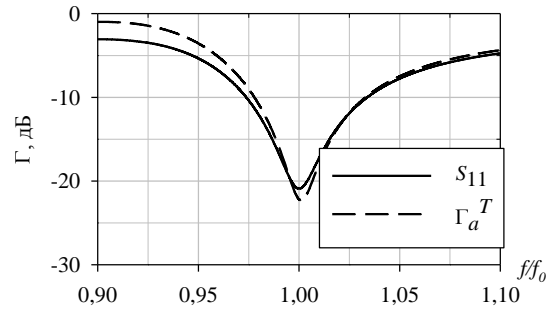


Рис. 6. Коэффициенты отражения антенны при возбуждении

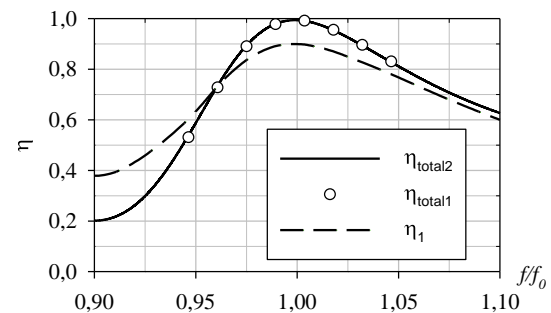


Рис. 7. Эффективность антенны при возбуждении трех портов, рассчитанная при помощи  $\Gamma_a^T$  ( $\eta_{total2}$ ) и посредством вычислений CST Studio Suite ( $\eta_{total1}$ ), а также при возбуждении только порта 1 ( $\eta_1$ ) расчетом в CST Studio

Полные эффективности антенны, полученные при помощи расчета и моделирования в CST Studio Suite, также совпадают (рис. 7). Однако эффективность при возбуждении первого порта антенны не превышает 0,9 из-за большей взаимосвязи портов, чем при  $N=2$ .

**Четырехпортовое возбуждение антенны**

В случае возбуждения четырех портов антенны для создания круговой поляризации (см. рис. 1, в)  $S_{31}$  менее  $-7$  дБ,  $S_{21} = S_{41}$  менее  $-12,5$  дБ в диапазоне рабочих частот (рис. 8), что больше, чем для случая  $N = 3$ . Проведем оценку  $\Gamma_a^T$  для этого случая

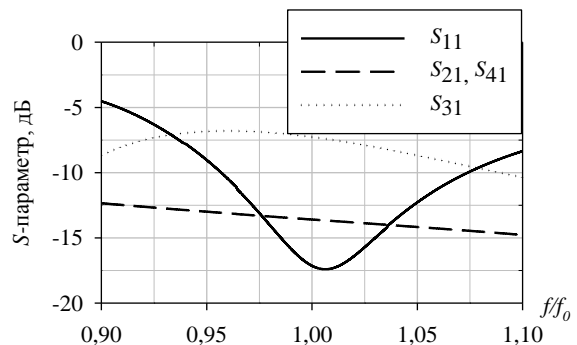


Рис. 8. Коэффициенты матрицы рассеяния с  $N = 4$

Полный коэффициент отражения для  $N = 4$

$$\Gamma_a^T = \frac{\sqrt{\begin{aligned} &|S_{11}a_1 + S_{12}a_2e^{j\theta_1} + S_{13}a_3e^{j\theta_2} + S_{14}a_4e^{j\theta_3}|^2 + \\ &|S_{21}a_1 + S_{22}a_2e^{j\theta_1} + S_{23}a_3e^{j\theta_2} + S_{24}a_4e^{j\theta_3}|^2 + \\ &|S_{31}a_1 + S_{32}a_2e^{j\theta_1} + S_{33}a_3e^{j\theta_2} + S_{34}a_4e^{j\theta_3}|^2 + \\ &|S_{41}a_1 + S_{42}a_2e^{j\theta_1} + S_{43}a_3e^{j\theta_2} + S_{44}a_4e^{j\theta_3}|^2 \end{aligned}}}{\sqrt{|a_1|^2 + |a_2e^{j\theta_1}|^2 + |a_3e^{j\theta_2}|^2 + |a_4e^{j\theta_3}|^2}}, \quad (18)$$

где  $\theta_1 = \pi/2$ ,  $\theta_2 = \pi$ ,  $\theta_3 = 3\pi/2$ ,  $e^{j\theta_1} = i$ ,  $e^{j\theta_2} = -1$ ,  $e^{j\theta_3} = -i$  для правой круговой поляризации. Запишем матрицу рассеяния с соответствующим вектором возбуждения

$$\begin{bmatrix} \dot{b}_1 \\ \dot{b}_2 \\ \dot{b}_3 \\ \dot{b}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -i \\ -1 \\ i \end{bmatrix}. \quad (19)$$

При этом

$$\begin{aligned} \dot{b}_1 &= S_{11} - iS_{12} - S_{13} + iS_{14} = S_{11} - S_{13}, \\ \dot{b}_2 &= S_{21} - iS_{22} - S_{23} + iS_{24} = i(S_{24} - S_{22}) = -ib_1, \\ \dot{b}_3 &= S_{31} - iS_{32} - S_{33} + iS_{34} = S_{31} - S_{33} = -b_1, \\ \dot{b}_4 &= S_{41} - iS_{42} - S_{43} + iS_{44} = i(S_{44} - S_{42}) = ib_1. \end{aligned} \quad (20)$$

Следовательно,

$$\Gamma_a^T = \frac{\sqrt{|\dot{b}_1|^2 + |-ib_1|^2 + |-b_1|^2 + |ib_1|^2}}{\sqrt{|1|^2 + |-i|^2 + |-1|^2 + |i|^2}} = |\dot{b}_1|. \quad (21)$$

Для произвольных углов возбуждения полный коэффициент отражения

$$\Gamma_a^T = \sqrt{\frac{(S_{11} + S_{12}(\cos \theta_1 + \cos \theta_3) + S_{13} \cos \theta_2)^2}{+(S_{12}(\sin \theta_1 + \sin \theta_3) + S_{13} \sin \theta_2)^2}}, \quad (22)$$

при возбуждении портов: [1(1,0), 2(1, 90), 3(1, 180), 4(1, 270)]

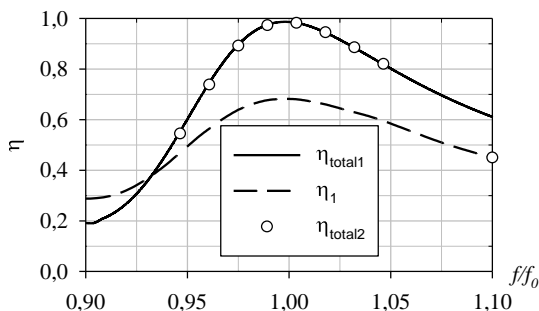


Рис. 9. Эффективность антенны при возбуждении четырех портов, рассчитанная при помощи  $\Gamma_a^T$  ( $\eta_{total2}$ ) и вычислений в CST Studio Suite ( $\eta_{total1}$ ), а также при возбуждении только порта 1 ( $\eta_1$ ) и расчетом в CST Studio

Как видно из рис. 9, несмотря на высокие значения  $S_{31}$  для  $ff_0=1$ , полная эффективность антенны близка к единице. Однако эффективность при возбуждении только первого порта  $\eta_1$  составляет не более 0,7 из-за большей взаимосвязи портов, чем при  $N = 3$ .

Кроме того, из формулы (22) можно увидеть, что если  $\theta_1 - \theta_3 = \pi$ , то  $S_{12} = S_{14}$  не учитывается при расчете  $\Gamma_a^T$ , а  $\Gamma_a^T$  определяется  $S_{11}$  и  $S_{13}$ , а также углом  $\theta_2$ . При этом если  $\theta_2 = \pi$ , то  $\Gamma_a^T$  будет минимальным, если  $\theta_2 \neq \pi$ , то  $\Gamma_a^T$  увеличивается от минимального значения и при  $\theta_2 = 0$  достигает максимального значения из-за противофазного возбуждения моды  $TM_{10}$  при помощи портов, расположенных на одной оси симметрии антенны.

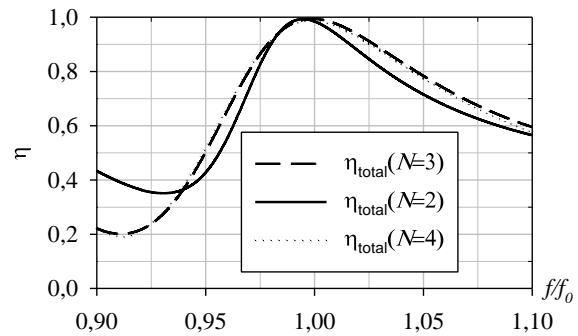


Рис. 10. Эффективность антенны, рассчитанная при помощи  $\Gamma_a^T$  для  $N = 2, 3, 4$

### Заключение

В настоящей статье рассмотрено влияние количества портов возбуждения на полную эффективность печатных антенн круговой поляризации. Установлено, что полная эффективность близка к единице на собственной резонансной частоте антенны круговой поляризации и практически не зависит от количества возбужденных портов  $N = 2, 3, 4$ . Однако для случая  $N = 4$  коэффициент передачи между точками питания является самым большим, в сравнении с  $N = 2, 3$ , и для получения малого значения  $\Gamma_a^T$  в полосе рабочих частот к обеспечению фазового смещения между портами  $[0, 90, 180, 270^\circ]$  предъявляются повышенные требования. Другими словами, необходимо обеспечить противофазное возбуждение портов антенны, расположенных в одной плоскости. В этом случае  $\Gamma_a^T$  будет иметь низкие значения. Для создания круговой поляризации набег фазы между парами противофазно возбужденных портов в ортогональных плоскостях должен составлять ровно  $90^\circ$ , в этом случае  $\Gamma_a^T$  будет минимален.

Следует отметить, что выбор количества портов влияет на поляризационные и фазовые характеристики антенны [15]. Кроме того, антенна с многопортовым возбуждением требует схемы питания, потери в которой будут определять эффективность антенны в целом. В этой связи использование меньшего количества плеч схемы питания со ступенчатой фазовой задержкой является предпочтительным.

## Литература

1. Roca L.J. Handbook on small antennas / L.J. Roca, M. Martínez-Vázquez, R.S. Calvo. – Belgium, Brussels: EurAAP Technical Working Group on Compact Antennas, 2012. – 693 p.
2. Панченко Б.А. Микроразомкнутые антенны / Б.А. Панченко, Е.И. Неведов. – М.: Радио и связь, 1986. – 144 с.
3. GPS satellite surveying / A. Leick, L. Rapoport, D. Tarnikov. – John Wiley & Sons, Inc., 2015. – 807 p.
4. Гафаров Е.Р. Двухчастотная антенна для спутниковых радионавигационных систем / Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов // 25-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). – Севастополь, 2015. – С. 499–500.
5. GPS antenna design and performance advancements: The Trimble Zephyr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-86094>. свободный (дата обращения: 11.12.2020).
6. Курушин А.А. Моделирование излучающих многопортовых СВЧ-структур // Современная электроника. – 2014. – № 7. – С. 70–73.
7. Банков С.Е. Расчёт квадрифилярной антенны / С.Е. Банков, А.Е. Давыдов, А.А. Курушин // Современная электроника. – 2008. – № 1. – С. 54–57.
8. Manteghi M. Multiport characteristics of a wide-band cavity backed annular patch antenna for multipolarization operations / M. Manteghi, Y. Rahmat-Samii // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2005. – Vol. 53, No. 1. – P. 466–474. – DOI: 10.1109/TAP.2004.838794
9. Chae S.H. Analysis of mutual coupling, correlations, and TARC in MIMO antenna array / S.H. Chae, S. Oh, S. Park // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2007. – Vol. 6. – P. 122–125. – DOI: 10.1109/LAWP.2007.893109
10. Andrade E. The correct application of total active reflection coefficient to evaluate MIMO antenna systems and its generalization to N ports / E. Andrade, H. Aguilar, J. Tirado-Mendez // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2019. – P. 1–10. – DOI: 10.1002/mmce.22113
11. A Closed-form formula of radiation and total efficiency for lossy multiport antennas / M. Wang, T. Loh, Y. Zhao, Q. Xu. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Vol. 18, no. 1. – P. 2468–2472. – DOI: 10.1109/LAWP.2019.2940382
12. Kakkar N.A. Four elements fan-shaped MIMO antenna with enhanced bandwidth / N.A. Kakkar; M.R. Tripathy // 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). – Noida, India, 2020. – DOI: 10.1109/SPIN48934.2020.9070948
13. Broadband capacitively coupled stacked patch antenna for GNSS applications / D. Li, P. Guo, Q. Dai, Y. Fu // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2012. – Vol. 11. – P. 701–704. – DOI: 10.1109/LAWP.2012.2205129
14. Jayant S. Four Elements UWB MIMO antenna array / S. Jayant, G. Srivastava // 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). – Noida, India, 2020. – DOI: 10.1109/SPIN48934.2020.9070922
15. Multiband three-layer GNSS microstrip antenna / E.R. Gafarov, A.A. Erokhin, A.V. Stankovsky, Y.P. Salomatov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Tomsk, Russia, 18–20 April 2019. – DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729623

## Гафаров Евгений Раисович

Ст. преп. каф. радиотехники  
Сибирского федерального университета (СФУ)  
Свободный пр-т, 79, г. Красноярск, Россия, 660041  
Тел.: +7-923-306-27-05  
Эл. почта: egafarov@sfu-kras.ru

## Саломатов Юрий Петрович

Зав. каф. радиотехники СФУ  
Свободный пр-т, 79, г. Красноярск, Россия, 660041  
Тел.: +7 (391-2) 91-22-78  
Эл. почта: ysalomatov@sfu-kras.ru

Gafarov E.R., Salomatov Y.P.

## Efficiency analysis of a multiport patch antenna

The article considers the patch antenna with several ports to excite a circular polarization. The effect of excitation ports number on the total efficiency of antenna was investigated. Taking into account the mutual coupling of the antenna ports, the total active reflection coefficient was estimated. A comparison of the calculated characteristics and the data obtained by CAD-modeling was carried out. It was shown that the total efficiency of the multiport patch antenna is independent from the number of excitation ports.

**Keywords:** patch antenna, circular polarization, total efficiency.  
**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-24-29

## References

1. Roca L.J., Martínez-Vázquez M., Calvo R.S. Handbook on small antennas. *Belgium, Brussels, EurAAP Technical Working Group on Compact Antennas*, 2012, 693 p.
2. Panchenko B.A., Nefedov E.I. *Mikropoloskovye anteny* [Microband antennas]. Moscow, Radio i Svyaz', 1986, 144 p. (in Russ.).
3. Leick A., Rapoport L., Tarnikov D. GPS satellite surveying. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2015, 807 p.
4. Gafarov E.R., Salomatov Y.P. The dual-band antenna for navigation satellite systems. *25<sup>th</sup> International Crimean Conference «Microwave engineering and telecommunications» (CriMiCo 2015)*, Sevastopol, 2015, pp. 499–500 (in Russ.).
5. GPS antenna design and performance advancements: The Trimble Zephyr [electronic source]. Available at: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-86094>. (Accessed: December 11, 2020).
6. Kurushin A.A. Modelirovanie izluchayushchih mnogoportovyh SVCH-struktur [Modelling of radiating multiport microwave structures]. *Modern electronics*, 2014, no. 7, pp. 70–73 (in Russ.).
7. Bankov S.E., Kurushin A. A. Raschyot kvadrifilarnoj anteny [Calculating a quadrifilar antenna]. *Modern electronics*, 2008, no 1, pp. 54–57 (in Russ.).
8. Manteghi M., Rahmat-Samii Y. Multiport characteristics of a wide-band cavity backed annular patch antenna for multipolarization operations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, vol. 53, no. 1, pp. 466–474. DOI: 10.1109/TAP.2004.838794
9. Chae S.H., Oh S., Park S. Analysis of mutual coupling, correlations, and TARC in MIMO antenna array. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, vol. 6, pp. 122–125. DOI: 10.1109/LAWP.2007.893109

10. Andrade E., Aguilar H., Tirado-Mendez J. The correct application of total active reflection coefficient to evaluate MIMO antenna systems and its generalization to N ports. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, pp. 1–10. DOI: 10.1002/mmce.22113
11. Wang M., Loh T., Zhao Y., Xu Q. A Closed-form formula of radiation and total efficiency for lossy multiport antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 2468–2472. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2940382
12. Kakkar N.A., Tripathy M.R. Four elements fan-shaped MIMO antenna with enhanced bandwidth. *7<sup>th</sup> International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, India, 2020. – DOI: 10.1109/SPIN48934.2020.9070948
13. Li D., Guo P., Dai Q., Fu Y. Broadband capacitively coupled stacked patch antenna for GNSS applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, vol. 11, pp. 701–704. DOI: 10.1109/LAWP.2012.2205129
14. Jayant S., Srivastava G. Four Elements UWB MIMO antenna array. *7<sup>th</sup> International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, India, 2020. – DOI: 10.1109/SPIN48934.2020.9070922
15. Gafarov E.R., Erokhin A.A., Stankovsky A.V., Salomatov Y.P. Multiband three-layer GNSS microstrip antenna. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings*, Tomsk, Russia, 18-20 April 2019. – DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729623

---

**Evgeniy R. Gafarov**

Senior Lecturer Radio Engineering Department,  
Siberian Federal University  
79, Svobodny st. Krasnoyarsk, Russia, 660041  
Phone: +7-923-306-27-05  
Email: egafarov@sfu-kras.ru

**Yury P. Salomatov**

Head of Radio Engineering Department  
Siberian Federal University  
79, Svobodny st. Krasnoyarsk, Russia, 660041  
Phone: +7 (391-2) 91-22-78  
Email: ysalomatov@sfu-kras.ru



**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА**





УДК 004.056.5

Н.И. Глухов, П.Н. Наседкин

## Аналитика внутренних угроз информационной безопасности предприятий

Проводится анализ внутренних угроз информационной безопасности. В результате проведенного в данной работе анализа угроз, связанных с утратой информации, предлагается новый подход к оценке возможного ущерба на предприятиях через рассмотрение онтологической модели взаимосвязи основных концептов. На основании онтологической модели выведена обобщенная формула для оценки потенциального ущерба предприятиям, которая отражает зависимость оценки потенциального ущерба от угроз безопасности и их источников в разрезе каждого информационного актива и свойств информации. В настоящей работе перечислены основные источники угроз, виды информации, затраты на бюджет и основные проблемы контроля и противодействия внутренним угрозам информационной безопасности.

**Ключевые слова:** источники угроз, риски, онтологическая модель, аналитика внутренних угроз, утечки конфиденциальной информации.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-33-41

В рамках данной работы проводимый анализ внутренних угроз информационной безопасности учитывает следующие классификационные признаки угроз, обусловленных:

- 1) размещением источника внутренних угроз;
- 2) потенциальным существенным ущербом в количественном выражении;
- 3) природой возникновения:

3.1) искусственных (субъективных) угроз среди которых выделим непреднамеренные (случайные) угрозы в разрезе ошибок персонала;

3.2) преднамеренных, т.е. умышленных угроз, обусловленных действиями людей.

3.3) типов угроз в соответствии с ГОСТом Р 50922–96 [1], таких как утечка информации, несанкционированное воздействие на информацию и ее носители, т.е. зависящих от целенаправленного или возможно непреднамеренного воздействия.

Основные проблемы информационной безопасности происходят по причине умышленных угроз, и как следствие являются главной причиной противоправных действий [9].

Отметим, что носителями внутренних угроз безопасности информации предприятий являются следующие источники угроз:

1. Персонал и работники подрядных организаций, допускающих ошибки при эксплуатации автоматизированных систем.

2. Бывшие, обиженные и действующие сотрудники предприятий, в действиях которых просматриваются либо элементы коррупционной составляющей, либо действия умышленного противоправного характера.

В настоящее время возросло количество умышленных угроз в области экономической деятельности предприятий на фоне снижения реальных доходов населения, сокращения персонала предприятий, и в целом обусловленной нестабильной ситуацией на рынке труда, что отражается на настроениях и в поведении не только сотрудников многих компаний, но и лиц, не имеющих постоянных заработков, а также

и криминальных структур. Опасаясь за собственное будущее, а возможно и в целях получения дополнительного дохода работники копируют доступную конфиденциальную информацию и нередко вступают в сговор с криминальными структурами и фирмами подрядных организаций или фирмами-конкурентами, при этом еще работая на предприятиях. Все вышеперечисленные действия увеличивают в большей степени риски утечки конфиденциальной информации. Компании, озабоченные утечкой корпоративных секретов, начали активно инвестировать в безопасность, повышая собственную конкурентоспособность.

Объектом исследования настоящей статьи являются внутренние источники информационных угроз, возникающие в процессе экономической деятельности предприятий. Предметом исследования настоящей статьи в разрезе проводимой аналитики внутренних угроз информационной безопасности предприятий является разработка онтологической модели взаимосвязи основных концептов в аналитике внутренних угроз информационной безопасности предприятий на основе понятий модели безопасности по ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1–2012 [2].

### Онтологическая модель взаимосвязи основных концептов в аналитике внутренних угроз информационной безопасности предприятий и факторов влияния на оценку потенциального ущерба

В результате умышленных или непреднамеренных действий работников предприятия могут быть задействованы каналы утечки конфиденциальной информации, что в свою очередь создает вероятность нанесения ущерба предприятию. **Потенциальный ущерб является важным звеном при расчетах, связанных с оценкой эффективности информационных угроз предприятию.** В рамках данной работы по анализу внутренних угроз мы будем исходить из построения онтологической модели взаимосвязи основных концептов в аналитике внутренних угроз информационной безопасности пред-

приятий и их влияния на оценки возможного ущерба предприятиям.

С позиции экономического подхода утечки конфиденциальной информации влияют на оценку возможного ущерба информационной безопасности предприятиям, в связи с чем возможный или потенциальный ущерб складывается из:

1. Прямого потенциального ущерба информационной безопасности предприятиям, который может возникнуть вследствие утечки конфиденциальной информации.

2. Косвенного возможного ущерба, т.е. текущих потерь, которые зависят от ограничительных мероприятий на распространение информации конфиденциального характера.

В основе описания прямого потенциального ущерба предприятиям в данной работе лежат количественные и качественные показатели, использующие экспертные оценки по обоснованию отнесения информации к конфиденциальной, а также оценки возможных сценариев развития событий и их последствий с учетом стоящих перед предприятиями целей и задач.

Ограничительные мероприятия на распространение информации конфиденциального характера, влияющие на расчет косвенного возможного ущерба, могут иметь положительные и отрицательные последствия, а именно:

1. Положительные, связанные с предотвращением потенциального прямого ущерба предприятию из-за утечки конфиденциальной информации.

2. Отрицательные, связанные с увеличением затрат на защиту информации и упущенную выгоду от ее открытого распространения, а также с увеличением вероятности косвенного потенциального ущерба.

Расчет потенциального ущерба предприятию с точки зрения информационной безопасности, связанного с утечкой конфиденциальной информации, на основании общего представления об оценке угроз производится в следующем порядке:

1. Вся информация на предприятии методом экспертного анализа и количественного оценивания ранжируется по степени важности, в том числе с учетом конфиденциальности.

2. В соответствии со степенью важности информации сравнивают входящие в нее сведения с количественной экспертной оценкой возможного ущерба, который может произойти с утратой данной информации.

Анализ научной литературы с учетом ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012 [2] позволил определить состав концептов в области понятий в аналитике внутренних угроз информационной безопасности предприятий, их взаимосвязей и влияния на возможный ущерб предприятий, что позволило построить онтологическую модель, представленную на рис. 1, которая может быть адаптирована и применена к различным предметным областям данного направления исследований. Онтологическая модель, представленная на рис. 1, выполнена в приложении

«StarTools» – это приложение, которое позволяет проектировать и легко создавать концепт-карты.

В соответствии с онтологией, представленной на рис. 1, просматривается влияние на расчет возможного ущерба (оценки суммарных издержек –  $S$ ) следующих составляющих характеристик: количество рисков (угроз) для каждого информационного актива –  $N_{ij}$ , где номер угрозы  $i = \overline{1, n}$ ; номер актива –  $j = \overline{1, m}$ ; реализации угроз (оценки риска) в разрезе основных свойств информации (конфиденциальность, целостность, доступность) по каждому информационному активу –  $A_k(i, j)$ ,  $A_{ц}(i, j)$ ,  $A_{д}(i, j)$ , усредненное значение риска каждого информационного актива  $A_{cp}(i, j)$ .

С учетом вышесказанного влияние возможного ущерба на уровень общего риска всего предприятия основывается на следующих шагах:

**Шаг первый.** Оценка риска, определяемая через вероятность реализации угроз с учетом уязвимостей каждого элемента информационного актива в разрезе зависимости от вклада коэффициентов конфиденциальности, целостности, доступности, а также с учетом коэффициента разрушительности актива и частоты возникновения неблагоприятного события. Для первого шага можно привести следующие формулы [12, 13]:

$$A_k(i, j) = K_{kj} \times P1_{ij} \times P2_{ij} \times V_{ij} \times R_{ij}, \quad (1)$$

$$A_{ц}(i, j) = K_{цj} \times P1_{ij} \times P2_{ij} \times V_{ij} \times R_{ij}, \quad (2)$$

$$A_{д}(i, j) = K_{dj} \times P1_{ij} \times P2_{ij} \times V_{ij} \times R_{ij}, \quad (3)$$

где  $(j)$  – определяемый информационный актив;  $A_k(i, j)$  – значение риска конфиденциальности;  $K_{kj}$  – коэффициент конфиденциальности информационного актива;  $P1_{ij}$  – вероятность реализации угрозы;  $P2_{ij}$  – вероятность использования уязвимости;  $A_{ц}(i, j)$  – значение риска целостности;  $K_{цj}$  – коэффициент целостности информационного актива;  $A_{д}(i, j)$  – значение риска доступности;  $K_{dj}$  – коэффициент доступности информационного актива;  $V_{ij}$  – частота возникновения за фиксированный промежуток времени неблагоприятного события;  $R_{ij} \in [0; 1]$  – коэффициент разрушительности [12, 13].

Далее необходимо учесть среднее значение риска по информационным активам (1)–(3) в зависимости от угроз  $i = \overline{1, n}$ , где

$$A_{cp}(m, n) = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (A_k(i, j) + A_{ц}(i, j) + A_{д}(i, j)), \quad (4)$$

Предлагаемое отношение позволяет оценить значение риска и подсчитать стоимостные затраты при появлении инцидентов информационной безопасности.

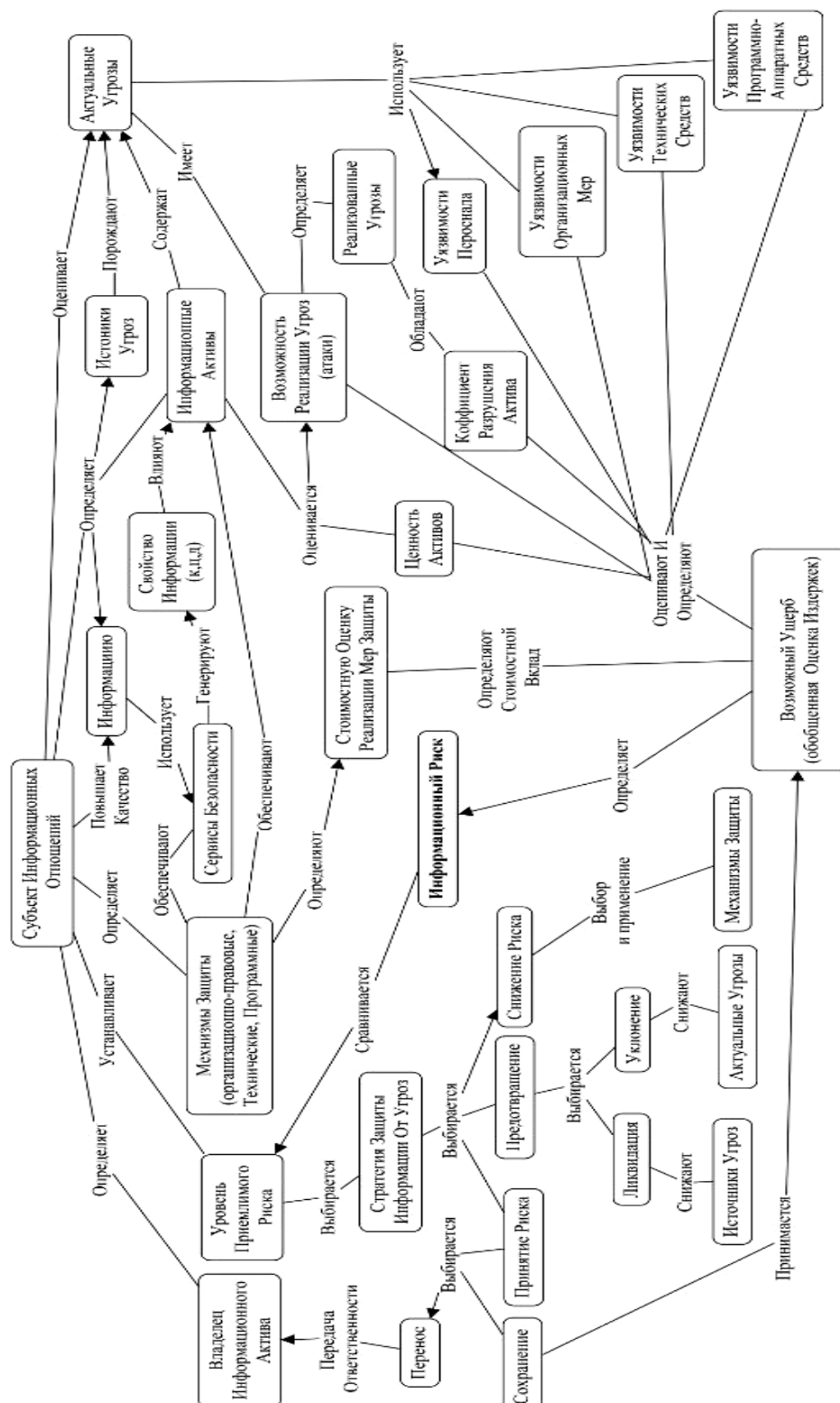


Рис. 1. Онтологическая модель предметной области

**Шаг второй.** На основании вышеописанного можем сделать предположение об обобщенной формуле оценки возможного ущерба (допустимых издержек) используя среднее значение риска, рассчитанного по каждому информационному активу и с учетом размера потенциальных потерь. Таким образом, значение ущерба  $S(x)$  принимает следующий вид (5):

$$S(x) = S_0 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (A_{cp}(m, n) \times B_{ij} + C_{ij}), \quad (5)$$

где  $S_0$  – параметр начальных затрат (издержек) на создание системы информационной безопасности предприятия;  $S_1$  – параметр ежегодно планируемых затрат (издержек) на восстановление информационных активов;  $S_2$  – параметр затрат (издержек) на

ежегодное сопровождение и техническое обслуживание информационных активов;  $S_3$  – параметр планируемых ежегодных затрат (издержек) на внедрение новых информационных активов;  $S_4$  – параметр ежегодных затрат (издержек) на службу безопасности предприятий;  $n$  – количество рисков (опасности определенной угрозы);  $m$  – количество информационных активов, «стоимостная оценка потерь (возможного ущерба) в случае реализации угрозы –  $B_{ij}$ ; стоимостная оценка реализации мер защиты –  $C_{ij}$ .

Необходимо отметить, что существуют и другие подходы расчета ущерба информационной безопасности предприятий. Однако они в своей сути выполняют методику расчета с учетом определенных задач, не включающих все факторы влияния на оценку потенциального ущерба предприятия, к примеру, включают в одном случае оценку возможного ущерба автоматизированных систем (информационного ресурса) [11], а в другом случае оценку ущерба от реализации угроз, связанных с неправомерным доступом и использованием утечки персональных данных, в том числе включая штрафы за нарушение законодательства и стоимость на восстановление информационных ресурсов [14].

Далее рассмотрим текущее состояние в области обеспечения информационной безопасности в разрезе основных источников угроз, каналов утечки информации и их контроля, ущерба и затрат в рам-

ках бюджета, выделяемых предприятиями на свою защиту информации.

#### Исследование основных направлений и показателей информационной безопасности 2019 г., влияющих на возможный ущерб от внутренних угроз компаний России и стран СНГ

В соответствии с аналитическим отчетом компании «СёрчИнформ» (Россия) за 2019 г. в области оценки уровня информационной защиты и подходов к вопросам информационной безопасности в России, странах СНГ были установлены источники внутренних угроз, которые приведены в табл. 1–3 [10]. В исследовании принимали участие 1 052 человека – это начальники, работники, эксперты отраслей, руководители организаций (коммерческой (76%), государственной (22%) и некоммерческой сфер (2%)). Исследованием охвачены такие отрасли экономики, как ИТ, нефтегазовый сектор, промышленность, логистическая сфера, кредитно-финансовая сфера, ритейл, здравоохранение и другие отрасли.

Все приводимые далее сравнительные статистические оценки (%) исследований необходимо понимать как некое распределение (выборку) с учетом охваченного количества работников и отраслей.

Как видно из приведенной аналитики, как в России, так и в странах СНГ подавляющее число источников угроз информационной безопасности приходится на рядовых работников предприятий (73/81% – соответственно Россия и СНГ) и уволенных (40/30% – соответственно Россия и СНГ).

Таблица 1

Источники угроз в России и странах СНГ

Распределение источников угроз по России и СНГ, %	Источники угроз								
	Менеджеры отдела снабжения	Бухгалтеры/экономисты/финансисты	IT-специалисты	Помощники руководителя/секретари	Логисты	Другое	Руководители	Рядовые	Уволенные
Компании России	34	24	19	13	10	45	27	73	40
Компании СНГ	32	33	23	20	9	51	19	81	30

Источники угроз кредитно-финансовой сферы, нефтегазового сектора, промышленности, строительства, логистической сферы, ритейла, здравоохранения и IT-компаний в разрезе персонала предприятий

Распределение источников угроз по отраслям, %	Источники угроз							
	Менеджеры отдела снабжения	Бухгалтеры/экономисты/финансисты	IT-специалисты	Помощники руководителя/секретари	Логисты	Другое	Руководители	Рядовые
Компании нефтегазовой сферы России	44	24	24	18	12	65	29	84
Промышленность России	46	24	14	12	10	38	30	70
Кредитно-финансовая сфера России	21	47	32	13	3	37	36	89
Ритейл России	69	13	16	0	25	50	48	93
Сфера ИТ России	32	27	39	13	12	36	13	91
Строительство России	26	31	19	10	10	31	29	79
Логистическая сфера России	42	14	19	14	36	11	19	89
Здравоохранение России	6	38	19	19	6	44	26	74

Таблица 3

**Источники угроз кредитно-финансовой сферы, нефтегазового сектора, промышленности, строительства, логистической сферы, ритейла, здравоохранения и IT-компаний в разрезе рядовых работников предприятий**

Источник угроз – персонал	Распределение источников угроз по отраслям, %							
	Компании нефтегазовой сферы России	Промышленность России	Кредитно-финансовая сфера России	Ритейл России	Сфера ИТ России	Строительство России	Логистическая сфера России	Здравоохранение России
Рядовые	84	70	89	93	91	79	89	74

При рассмотрении по восьми отраслям экономики в разрезе должностей работников предприятий выделяются с порогом не ниже 25% от распределения по источникам угроз, возникающим от работников следующие позиции:

1. Источники угроз ИБ, возникающие по вине менеджеров отделов снабжения. Основная доля угроз по ИБ от действий менеджеров отделов снабжения приходится на такие отрасли, как ритейл (69%); промышленность (46%), компании нефтегазовой сферы (44%), логистическая сфера (42%), сфера ИТ (32%), строительство (26%). Остальная часть источников угроз ИБ, возникающих от работников в разрезе отраслей, распределяется на других работников, исполняющих свой функционал согласно должностным инструкциям.

2. Источники угроз ИБ возникающие по вине работников бухгалтерии, экономистов, финансистов. Основная доля по данным источникам угроз ИБ приходится на такие отрасли, как: кредитно-финансовая сфера (47%), здравоохранение (38%), строительство (31%), сфера ИТ (27%).

3. Источники угроз ИБ, возникающие по вине ИТ-специалистов. Основная доля по данным источникам угроз ИБ приходится на сферу ИТ-услуг (39%); кредитно-финансовую сферу (32%).

4. Источники угроз ИБ, возникающие по вине работников служб логистики. Основная доля по данным источникам угроз ИБ приходится на логистическую сферу (36%) и ритейл (25%).

5. Источники угроз ИБ, возникающие по вине руководителей. Основная доля по данным источникам угроз ИБ приходится на такие отрасли, как: Ритейл (48%), кредитно-финансовая сфера (36%), промышленность (30%), нефтегазовая сфера (29%), строительство (29%), здравоохранение (26%).

6. Источники угроз ИБ, возникающие по вине рядовых сотрудников предприятий как источников угроз приходящихся на весь сектор экономики России, доля которых составляет не ниже 70%.

Согласно аналитическому отчету компании «СёрчИнформ» (Россия) за 2019 г. установлены утечки по видам информации, которые приведены в табл. 4 [10].

Таблица 4

**Утечки по видам информации по отраслям кредитно-финансовой сферы, нефтегазового сектора, промышленности, строительства, логистической сферы, ритейла, здравоохранения и IT-компаний в разрезе работников предприятий**

Распределение утечек по видам информации по отраслям экономики РФ и компаниям СНГ, в %	Утечки по видам информации				
	Информация о клиентах и сделках	Техническая информация	Персональные данные	Финансовая информация	Другое
Компании нефтегазовой сферы России	30	43	30	14	8
Промышленность России	47	44	24	29	8
Кредитно-финансовая сфера России	53	8	47	31	14
Ритейл России	59	10	10	44	3
Сфера ИТ России	38	27	22	15	5
Строительство России	37	35	12	30	9
Логистическая сфера России	51	9	14	23	9
Здравоохранение России	16	26	42	11	16
Компании России	35	25	23	19	8
Компании СНГ	31	14	28	20	20

Среди утечек на первом месте выделяются по странам СНГ и России следующие утечки: информация о клиентах и сделках (31 и 35% соответственно) и утечки персональных данных (28 и 23% соответственно), а также 25% утечек технической информации по России в рамках проведенного выборочного исследования.

Среди утечек по отраслям экономики России наиболее значимое количество утечек приходится на:

1) персональные данные в сфере кредитно-финансовой сферы (47%) и здравоохранения (42%);

2) информацию о клиентах и сделках в сфере ритейла (59%), кредитно-финансовую сферу (53%), логистическую сферу (51%);

3) финансовую информацию в сфере ритейла (44%).

Как видно из аналитики суммарных утечек за 2019 г. по отраслям, представленных в табл. 5, выделяются утечки в сфере ритейла (92%) и утечки с порогом не ниже 60% от рассматриваемой выборки в разрезе таких отраслей, как: здравоохранение, кредитно-финансовая сфера, промышленность, логистическая сфера. Важно отметить, что утечки в компаниях нефтегазовой сферы находятся вблизи выбранного порогового значения утечек, как и в сфере строительства и ИТ, что дает нам сделать вывод о том, что работа в направлении обеспечения информационной безопасности на предприятиях данных

отраслей имеет приоритет и проводится, о чем свидетельствуют статистические данные, представленные в табл. 5.

Среди основных каналов утечек, выделенных в аналитическом отчете компании «СёрчИнформ»

(Россия) за 2019 г., как следует из табл. 6, являются: электронная почта (42% – СНГ, 48% – Россия), устройства хранения и мобильные телефоны (46% – Россия, 48% – компании СНГ), мессенджеры и телефоны (29% – Россия, 33% – компании СНГ) [10].

Таблица 5

**Суммарные утечки по компаниям России по отраслям кредитно-финансовой сферы, нефтегазового сектора, промышленности, логистической сферы, ритейлу, здравоохранению, строительству и IT-компаниям, а также общее количество утечек по компаниям СНГ**

Суммарные утечки	Распределение суммарных утечек по отраслям экономики, %									
	Компании нефтегазовой сферы России, %	Промышленность России, %	Кредитно-финансовая сфера России, %	Ритейл России, %	Сфера ИТ России, %	Строительство России, %	Логистическая сфера России, %	Здравоохранение России, %	Компании России, %	Компании СНГ, %
Суммарные утечки по компаниям	60	67	68	92	54	54	63	69	59	50

Таблица 6

**Каналы утечек компаний России, СНГ**

Распределение каналов утечек по России и СНГ, %	Каналы утечек				
	Электронная почта	Устройства хранения и мобильные телефоны	Мессенджеры/ телефония	Документы, отправляемые на печать	Облачные хранилища
Компании России	48	46	29	20	18
Компании СНГ	42	48	33	20	14

В табл. 7 приведена аналитика инцидентов внутренней безопасности по отраслям, среди которых отмечаются следующие направления: попытки откатов (здравоохранение – 44%, ритейл – 42%, ло-

гистическая сфера – 41%, промышленность – 40%, строительство – 38%, сфера ИТ – 30%) и промышленного шпионажа / работы в пользу конкурентов (ритейл – 39%, строительство – 43%, промышленность – 37%).

Таблица 7

**Другие инциденты внутренней безопасности**

Распределение инцидентов по безопасности в компаниях России (отрасли) и СНГ, %	Инциденты внутренней безопасности				
	Попытки откатов	Промышленный шпионаж/ работа в пользу конкурентов	Саботаж	Создание фирм-близнецов	Другое
Компании России	30	24	17	11	14
Компании СНГ	25	25	18	3	26
Компании нефтегазовой сферы России	25	13	15	3	15
Промышленность России	40	37	15	16	10
Кредитно-финансовая сфера России	6	16	19	10	29
Ритейл России	42	39	31	19	3
Сфера ИТ России	30	26	11	8	18
Строительство России	38	43	16	16	14
Логистическая сфера России	41	28	16	22	3
Здравоохранение России	44	13	25	13	13

В настоящее время в бюджете на обеспечение информационной безопасности среди прочих систем защиты информации, используемых на предприятиях различных отраслей, согласно табл. 8, построенном по результатам аналитического отчета компании «СёрчИнформ» (Россия) за 2019 г., не используют в полном мере DLP-системы контроля и выявления утечек.

Однако особой строкой выделяются компании нефтегазовой отрасли (59%) и кредитно-финансовой сферы (53%), чьи службы безопасности активно внедряют и используют в своей работе DLP-системы контроля и выявления утечек, а следовательно, и эффективно противодействуют угрозам внутренней информационной безопасности предприятий [10].

Согласно табл. 9 построенного по результатам аналитического отчета компании «СёрчИнформ» (Россия) за 2019 г. в общем спектре ущерба по отраслям экономики и в сравнении общих показателей компаний России и СНГ существенным является имиджевый ущерб [10].

Согласно табл. 10 построенного по результатам аналитического отчета компании «СёрчИнформ» (Россия) за 2019 г. в общем спектре ущерба по отраслям экономики и в сравнении общих показателей компаний России и СНГ существенным являются мероприятия проводимые на предприятиях по контролю электронной почты, внешних носителей, программного обеспечения для администрирования, облачных хранилищ и документов отправляемых

на печать, телефонии и корпоративных мессенджеров [10].

### Выводы и результаты исследований в области аналитики внутренних угроз информационной безопасности предприятий

На основании проведенной аналитики внутренних угроз информационной безопасности усовер-

шенствован подход к оценке внутренних угроз с использованием разработанной онтологической модели взаимосвязей основных концептов. Ранее применение онтологической модели для исследования аналитики внутренних угроз предприятий с учетом детализации отношений между концептами информационной безопасности не использовался.

Таблица 8

#### Бюджет на обеспечение информационной безопасности среди прочих систем и средств защиты информации, используемых на предприятиях различных отраслей

Распределение бюджета по России и СНГ, %	Средства и системы ЗИ									
	Антивирусная программа	Средства администрирования Windows	NGFW (Firewall и Proxy)	Шифрование (криптошлюз, ПО)	DLP-система	Контроль целостности	IDS/IPS/EPS	SIEM-система	Другое	DCAP
Компании России	99	87	63	46	31	24	17	10	4	1
Компании СНГ	97	71	64	26	17	18	20	11	3	2
Компании нефтегазовой сферы России	100	92	80	57	59	31	33	25	8	4
Промышленность России	97	81	64	43	34	16	11	5	2	1
Кредитно-финансовая сфера России	100	91	80	76	53	56	40	22	2	4
Ритейл России	100	94	69	33	29	20	6	4	2	0
Сфера ИТ России	92	82	70	54	20	25	25	15	9	0
Строительство России	94	84	50	23	29	13	2	4	6	2
Логистическая сфера России	98	78	50	28	23	18	8	10	0	0
Здравоохранение России	96	93	64	71	21	36	18	0	0	4

Таблица 9

#### Виды ущерба по отраслям экономики России и СНГ

Распределение ущерба по России (по отраслям) и СНГ, %	Виды ущерба				
	Имиджевый ущерб	Compliance-риск (угроза наказания от регулятора)	Мелкий финансовый ущерб	Ущерб не было	Крупный финансовый ущерб
Компании России	40	13	39	30	13
Компании СНГ	39	17	43	35	19
Компании нефтегазовой сферы России	42	18	40	34	8
Промышленность России	43	9	50	23	16
Кредитно-финансовая сфера России	59	44	38	31	16
Ритейл России	26	8	67	26	21
Сфера ИТ России	54	13	50	32	8
Строительство России	35	11	35	35	19
Логистическая сфера России	35	6	38	38	21
Здравоохранение России	37	16	37	53	5

Таблица 10

#### Контроль ИТ-активов и документов по отраслям экономики России и СНГ

Распределение мер контроля по России (по отраслям) и СНГ, %	ИТ-активы и документы, подлежащие контролю									
	Корпоративная почта	Внешние носители	ПО для администрирования	Документы, отправляемые на печать	Телефония	Мессенджеры корпоративные	Общедоступная почта	Облачные хранилища	Мессенджеры общедоступные	Другое
Компании России	87	55	51	42	40	37	30	27	22	9
Компании СНГ	83	45	50	28	33	36	29	29	22	14
Компании нефтегазовой сферы России	90	72	51	63	27	37	31	27	24	6
Промышленность России	86	53	48	37	39	40	26	25	22	10
Кредитно-финансовая сфера России	93	82	44	58	40	51	47	29	29	4
Ритейл России	100	43	57	40	40	60	32	34	36	6
Сфера ИТ России	77	44	41	38	43	25	25	25	14	8
Строительство России	86	54	54	32	36	44	34	30	26	4
Логистическая сфера России	79	41	36	41	36	38	31	23	23	0
Здравоохранение России	84	52	60	52	52	24	32	20	20	12



На основании данной онтологической модели выведена обобщенная формула для оценки потенциального ущерба информационной безопасности для предприятий. Данная формула отражает зависимость оценки возможного ущерба от угроз безопасности и их источников в разрезе каждого информационного актива с учетом свойств информации.

Из результатов аналитических исследований за 2019 г., касающихся оценки уровня информационной безопасности в компаниях России и СНГ, следует, что:

1. Не все компании широко используют программно-технические системы контроля и мониторинга (DLP-системы) по противодействию внутренним угрозам, что в свою очередь ведет к значительным утечкам конфиденциальной информации и как следствие к значительному имиджевому ущербу предприятий.

2. Основным источником внутренних угроз информационной безопасности на предприятиях был и остается персонал, контроль которого должен осуществляться как со стороны непосредственного руководителя, так и со стороны кадровых служб и служб безопасности.

#### Литература

- ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения / Утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2006 г. № 3732013-ст. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200058320>, свободный (дата обращения: 18.05.2020).
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1–2012. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. – Ч. 1. Введение и общая модель / Утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 ноября 2012 г. № 814-ст. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200101777>, свободный (дата обращения: 18.05.2020).
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002–2012. Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил менеджмента информационной безопасности / Утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 24 сентября 2012 г. № 423-ст. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200103619>, свободный (дата обращения: 18.05.2020).
- ГОСТ Р ИСО 31000–2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2012. – 24 с.
- ГОСТ Р ИСО 31010–2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. – М.: Стандартинформ, 2012. – 74 с.
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. – М.: Стандартинформ, 2008. – 31 с.
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005:2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности. – М.: Стандартинформ, 2011. – 94 с.
- ГОСТ Р 53114–2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности организации. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.
- Блинов А.М. Информационная безопасность: учеб. пособие. – СПб.: Изд. СПбГУЭФ, 2010. – 96 с.
- Исследование уровня информационной безопасности в компаниях России и СНГ за 2019 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://searchinform.ru/research-2019>, свободный (дата обращения: 17.04.2020).
- Климов С.М. Методика оценки возможного ущерба от нарушения безопасности информации автоматизированной системы // Изв. ТРТУ. – 2003. – № 4 (33). – С. 27–31.
- Легчекова Е.В. Метод расчета риска информационной безопасности / Е.В. Легчекова, О.В. Титов // Сб. науч. статей междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы электронного бизнеса». – Гомель: Изд-во Белорус. торгово-эконом. ун-та потребительской кооперации. – 2017. – С. 87–89.
- Нестеров С.А. Анализ и управление рисками в сфере информационной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/443/57443>, свободный (дата обращения: 18.05.2020). – СПб., 2007. – 1 эл. архив (nesterov-security.zip).
- Управление рисками. Модель безопасности с полным перекрытием [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.intuit.ru/studies/courses/531/387/lecture/8990>, свободный (дата обращения: 17.04.2020).
- Шинаков К.Е. Минимизация рисков нарушения безопасности при построении системы защиты персональных данных: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19. – Брянск, 2017. – С. 70–97.
- ISO/IEC 27000-1:2018 Information technology – Service management. – Part 1: Service management system requirements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:27000-1:ed-3:v1:en>, свободный (дата обращения: 18.05.2020).
- ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://risk-academy.ru/download/iso31000/>, свободный (дата обращения: 18.05.2020).

#### Глухов Николай Иванович

Канд. экон. наук, доцент каф. информационных систем и защиты информации (ИСИЗИ) Иркутского государственного университета путей сообщения» (ИрГУПС) Чернышевского ул., 15, г. Иркутск, Россия, 664074  
Тел.: +7 (395-2) 63-83-99, доб. 01-30  
Эл. почта: gni1953@mail.ru

#### Наседкин Павел Николаевич

Аспирант каф. ИСИЗИ ИрГУПС Чернышевского ул., 15, г. Иркутск, Россия, 664074  
Тел.: +7 (395-2) 63-83-99, доб. 77-74  
Эл. почта: nasedkin\_pn@irgups.ru

Glukhov N.I., Nasedkin P.N.

#### Analysis of internal threats to information security of enterprises

In this work the authors analyze the internal threats to information security. The article provides the research results ob-

tained by analyzing the threats related to the information losses and presents a new approach to estimate possible damage to an enterprise by considering an ontological model of interrelation of basic concepts. Based on the ontological model the generalized formula to estimate a potential damage to an enterprise has been developed. This formula reflects the dependence of estimation of a potential damage on safety threats and their sources from the point of view of each information asset and information properties. In the work the main sources of threats, kinds of the information, expenses for the budget and basic problems in control and counteraction to internal threats of information safety are listed.

**Keywords:** threat sources, risks, ontological model, internal threat analysis, confidential information leaks.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-33-41

### References

1. GOST R 50922-2006. Data protection. Basic terms and definitions. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200058320> (Accessed: May 05, 2020) (in Russ.).
2. GOST R ISO /IEC 15408-1-2012. Information technology. Security methods and tools. Criteria for assessing the security of information technology. Part 1. Introduction and general model. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200101777>, (Accessed: May 05, 2020) (in Russ.).
3. GOST R ISO /IEC 27002-2012 Information Technology (IT). Security methods and tools. Code of norms and rules of information security management Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200103619>, (Accessed: May 05, 2020) (in Russ.).
4. GOST R ISO 31000-2010. Risk management. Principles and guidelines. Moscow, Standartinform, 2012, 24 p. (in Russ.).
5. GOST R ISO 31010-2011. Risk management. Risk assessment methods. Moscow, Standartinform, 2012. 74 p. (in Russ.).
6. GOST R ISO /IEC 27001-2006. Information technology. Security methods and tools. Information Security Management Systems. Requirements. Moscow, Standartinform, 2008. 31 p. (in Russ.).
7. GOST R ISO / IEC 27005:2010. Information technology. Security methods and tools. Information Security Risk Management. Moscow, Standartinform, 2011. 94 p. (in Russ.).
8. GOST R 53114-2008. Data protection. Ensuring the information security of the organization. Key terms and definitions. Moscow, Standartinform, 2009. 20 p. (in Russ.).
9. Blinov A.M. *Informacionnaya bezopasnost: ucheb. posobiye* [Information security]. SPb: SPbGUEF, 2010. 96 p. (in Russ.).
10. *Issledovanie urovnya informacionnoy bezopasnosti v kompaniyach Rossia i SNG za 2019 god* [A study of the level of information security in companies in Russia and the CIS for 2019]. Available at: <https://searchinform.ru/research-2019/> (Accessed: April 04, 2020) (in Russ.).
11. Klimov S.M. *Metodika ozenki vozmozhnogo ucherba ot narushenya bezopasnosti informazii avtomatizirovannoy sistemy* [Methodology for assessing the possible damage from information security breaches of the automated system]. *Izvestia TRTU*, 2003, no. 4 (33), p. 27–31 (in Russ.).
12. Legchekova E.V, Titov O.V *Metod rasheta riska informacionnoy bezopasnosti* [The method of calculating information security risk]. Collection of scientific articles of the international scientific-practical conference «Problems and prospects of electronic business». Gomel, Publishing House of the Belarusian Trade and Economic University of Consumer Cooperatives, 2017, p. 87–89 (in Russ.).
13. Nesterov S.A. *Analiz i upravlenie riskami v sfere informacionnoy bezopasnosti* [Analysis and risk management in the field of information security]. Available at: <http://window.edu.ru/resource/443/57443>, (Accessed: May 18, 2020). St. Petersburg, 2007, 1 email. Archive (nesterov-security.zip) (in Russ.).
14. *Upravlenye riskami. Model bezopasnosti s polnym perecrytiem*. [Risk management. Security model with full overlap]. Available at: <https://www.intuit.ru/studies/courses/531/387/lecture/8990> (Accessed: May 18, 2020) (in Russ.).
15. hinakov K.E. *Minimizazia riskov narushenya bezopasnosti pri postroyenii sistemyzachity personalnykh dannykh: avtoreferat dissertazii* [Minimizing the risks of security breaches when building a personal data protection system]. Bryansk, 2017. P. 70–97 (in Russ.).
16. ISO / IEC 27000-1: 2018. Information technology – Service management. Part 1: Service management system requirements. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:20000:-1:ed-3:v1:en>. (Accessed: May 18, 2020).
17. ISO 31000:2018. Risk management. Guidelines. Available at: <https://risk-academy.ru/download/iso31000/> (Accessed: May 18, 2020).

---

### Nikolay I. Glukhov

Candidate of Science in Economics, Associate Professor, Chair of Information Systems and Information Protection. Irkutsk State Transport University (ISTU)  
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, Russia, 664074  
Phone: +7 (395-2) 63-83-99, ext. 01-30  
Email: gni1953@mail.ru

### Pavel N. Nasedkin

Postgraduate student, Department of Information Systems and Information Protection, ISTU  
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, Russia, 664074  
Phone: +7 (395-2) 63-83-99, ext. 77-74  
Email: nasedkin\_pn@irgups.ru

УДК 004.8

Н.П. Корышев, И.А. Ходашинский

## Алгоритм формирования базы правил нечёткого классификатора на основе алгоритма кластеризации $K$ -средних и метаэвристического алгоритма «китов»

Представлены описание алгоритма генерации нечётких правил для нечёткого классификатора с использованием кластеризации данных, метаэвристики и индекса качества кластеризации, а также результаты проверки работоспособности на реальных наборах данных.

**Ключевые слова:** нечёткий классификатор, кластеризация,  $K$ -средние, алгоритм «китов», индексы качества кластеризации.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-42-47

Нечёткий классификатор является одним из актуальных способов решения задачи классификации, пришедшим из области машинного обучения (как и нечёткие системы в целом); он использует нечёткие множества и нечёткую логику в качестве инструмента для представления знаний о решаемой проблеме [1]. В пространстве признаков нечёткая логика позволяет объекту принадлежать к разным классам одновременно с некоторой степенью принадлежности. Главным достоинством нечеткого классификатора является легкая интерпретируемость правил классификации.

Основным компонентом модели нечёткого классификатора является база нечётких правил. Задача формирования базы сводится к ответу на вопросы о том, сколько правил должно быть в базе и как сформировать антецеденты и консеквенты правил. Применяя подход построения на основе таблицы наблюдения, сформировать правила можно с помощью алгоритма по экстремумам классов [2]. Количество генерируемых указанным алгоритмом нечётких правил равно количеству классов в классифицируемом наборе данных. Это свойство является достоинством и одновременно недостатком алгоритма. Минимальное количество правил в нечётком классификаторе способствует лучшему пониманию его работы, уменьшает вычислительные затраты на его обучение. Однако на минимальном количестве правил не всегда удается получить необходимую точность классификации. Второй подход к формированию базы правил основан на применении методов кластеризации, в частности, алгоритме  $K$ -средних. Алгоритм  $K$ -средних прост в реализации и эффективен для больших наборов данных с точки зрения времени выполнения (по сравнению с другими алгоритмами). Однако алгоритм обладает рядом недостатков: во-первых, число кластеров должно быть определено заранее; во-вторых, результат зависит от выбора исходных центров кластеров, а их оптимальный выбор неизвестен; в-третьих, не гарантируется достижение глобального минимума целевой функции.

Для преодоления последних двух недостатков алгоритма  $K$ -средних и усовершенствования самого

процесса кластеризации исследователи составляют гибридные алгоритмы: совместно с  $K$ -средними можно использовать метаэвристические алгоритмы.

Целью работы является разработка гибридного алгоритма формирования базы правил нечёткого классификатора на основе метода  $K$ -средних и метаэвристического алгоритма «китов».

### Задача кластеризации. Алгоритм $K$ -средних

Кластеризация (кластерный анализ) – это задача группировки множества объектов на подмножества (кластеры) таким образом, чтобы объекты из одного кластера были более похожи по заданной метрике друг на друга. Пусть  $X$  – множество объектов,  $Y$  – множество идентификаторов (меток) кластеров. На множестве  $X$  задана функция расстояния между объектами  $\rho(x, x')$ . Необходимо разбить множество  $X$  на подмножества (кластеры), т.е. каждому объекту  $x_i \in X$  сопоставить метку  $y_i \in Y$  таким образом, чтобы объекты внутри каждого кластера были близки относительно метрики  $\rho$ , а объекты из разных кластеров значительно различались [2]. Кластеризация отличается от классификации тем, что метки  $y_i$  не задаются изначально.

Решение задачи кластеризации объективно неоднозначно: во-первых, не существует однозначного критерия качества кластеризации, во-вторых, результат кластеризации существенно зависит от метрики  $\rho$ , и в-третьих, число кластеров заранее неизвестно и выбирается по субъективным критериям [3].

Алгоритмы кластеризации классифицируются по трём основным категориям: иерархические, нечёткие и секционированные (чёткие) [4]. Иерархические алгоритмы представляют кластеры в виде древовидной структуры. При нечётком подходе каждый элемент набора данных принадлежит всем кластерам с некоторой степенью принадлежности; он удобен, если кластеры перекрываются друг с другом, но даёт некачественные результаты, если кластеры имеют различную дисперсию по различным размерностям элементов.

Алгоритм  $K$ -средних ( $K$ -means) является самым распространённым алгоритмом чёткой кластеризации [5]. Это алгоритм, который группирует объекты на основе значений их признаков в  $K$  непересекаю-

щихся кластеров, представленных в алгоритме их центроидами (точками в пространстве признаков, вблизи которых группируются экземпляры данных). Действие алгоритма таково, что он стремится минимизировать суммарную дисперсию точек кластеров относительно центров этих кластеров:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{\mathbf{x}_i \in C_k} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{C}_k\|^2 \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, N}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{id})$  –  $i$ -й экземпляр данных таблицы наблюдения, представленный точкой в  $d$ -размерном пространстве признаков,  $\mathbf{C}_k$  – координаты центроида  $k$ -го кластера,  $\|\cdot\|$  – метрика, по которой определяется расстояние между экземпляром и центроидом (обычно в роли метрики выступает Евклидово расстояние),  $N$  – количество экземпляров в наборе данных,  $K$  – количество кластеров.

Основная идея алгоритма заключается в том, что на каждой итерации экземпляры разбиваются на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центроидов оказался ближе по выбранной метрике. Затем заново вычисляется центроид для каждого кластера, состав которого определился на предыдущем шаге. Координаты центроида каждого кластера рассчитываются следующим образом:

$$\mathbf{C}_k = \sum_{\mathbf{x}_i \in C_k} \mathbf{x}_i / |C_k|, \quad (2)$$

где  $|C_k|$  – объём  $k$ -го кластера. Алгоритм завершается, когда на текущей итерации не происходит изменения расстояния.

Эффективность работы алгоритма  $K$ -средних может быть улучшена за счет гибридизации с метаэвристическими, основное назначение которых – решение задач оптимизации [6]. В рамках данной работы исследуется применение метаэвристического алгоритма «китов» (Whale Optimization Algorithm, или WOA) совместно с алгоритмом  $K$ -средних.

#### Метаэвристический алгоритм «китов»

WOA – роевой алгоритм, основанный на поведении горбатых китов. Здесь используются два поведенческих механизма, которые обновляют вектор решения на каждой итерации: сужающегося окружения добычи и построения спиралевидной пузырьковой сети для атаки на добычу. Первый механизм представляет собой выполнение этапа диверсификации, второй – этапа интенсификации, в котором решения стремятся к оптимуму, двигаясь по спиралевидной траектории [7].

Последовательность выполнения WOA состоит из следующих шагов. Вначале случайным образом инициализируется популяция особей, т.е. решений, и определяется наилучшее из них. Затем на каждой итерации все имеющиеся решения корректируются согласно поведенческим механизмам: на начальных итерациях используется преимущественно первый механизм, на последних – второй; в конце итерации определяется лучшее решение. Результат работы метаэвристики – наилучшее решение, найденное за

всё время работы алгоритма, и соответствующее ему значение целевой функции.

#### Применение метаэвристик для кластеризации с помощью $K$ -средних

Для того чтобы использовать метаэвристику для кластеризации совместно с  $K$ -средними, после выполнения одной итерации метаэвристики необходимо выполнить корректировку всех решений в соответствии с (2). Целевой функцией для метаэвристики, показывающей работоспособность алгоритма кластеризации, будет выступать дисперсия (1).

Также необходимо определиться с тем, как особь популяции (поисковый агент) будет представлять решение задачи кластеризации. Первый способ называется «ассоциацией объект-кластер» [8]. Каждое решение кластеризации показано через матрицу  $N \times K$ , элементы которой содержат целочисленные или бинарные значения; что представляют целочисленные значения, зависит от метаэвристики и от критерия оптимизации. Такой подход использовался при кластеризации, основанной на эволюционных алгоритмах (в частности, генетическом). Однако он приводит к двум серьёзным недостаткам: высокой стоимости хранения и вычислений (особенно для кластеризации больших наборов данных) и избыточности информации, которые несёт в себе решение.

Второй способ является самым распространённым и лучше первого в отношении вычислительной сложности: решение представлено в виде вещественного вектора, который содержит координаты центроидов кластеров [9]. Решение  $\mathbf{P}_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ , где  $J$  – размер популяции, представляется как

$$\mathbf{P}_j = (\mathbf{C}_1^j, \dots, \mathbf{C}_K^j), \quad \mathbf{C}_k^j = (c_{k1}^j, \dots, c_{kd}^j), \quad (3)$$

где  $c_{kl}^j$  –  $l$ -я координата  $k$ -го центроида в  $d$ -мерном пространстве признаков ( $l = \overline{1, d}$ ) в составе  $j$ -го вектора позиции особи.

Третий способ также использует центроиды. Однако здесь решение задачи кластеризации состоит из всех агентов (а не из одного агента), и поэтому размер популяции агентов равен количеству кластеров [10]. Данный способ требует меньшего объема памяти и меньшего времени вычислений по сравнению с первым. Его потенциальная проблема заключается в том, что он не может в полной мере использовать преимущества, предоставляемые вторым способом, а именно – параллельный поиск решения несколькими агентами. Поэтому в данной работе в разработанном гибридном алгоритме кластеризации было принято представление решения в виде (3).

В оригинальном алгоритме  $K$ -средних не допускается работа с пустыми кластерами [11]. Для того чтобы работа алгоритма кластеризации, использующего метаэвристику, не прерывалась, можно применить различные способы искусственного определения кластера; например, можно заново генерировать случайным образом соответствующий центроид или заменить его на точку в пространстве признаков, соответствующую экземпляру данных.

### Алгоритм формирования базы правил

Первый недостаток алгоритма  $K$ -средних, заключающийся в том, что число кластеров должно быть определено заранее, не позволяет ему в общем случае разбить данные на оптимальное количество кластеров: перед применением алгоритма  $K$ -средних параметр  $K$  произвольно задаётся экспериментатором. Здесь под оптимальным подразумевается количество кластеров, равное количеству классов, на которые в действительности делятся экземпляры данных; в случае когда  $K$  оптимально, сформированные кластеры соответствуют классам. Недостаток приобретает большую важность в реальных случаях применения алгоритмов кластеризации – когда требуется разбить на кластеры экземпляры данных, классы которых неизвестны (неизвестно их количество). В таких случаях не всегда ясно, какое значение  $K$  необходимо выбрать, чтобы затем получившиеся кластеры действительно позволили бы адекватно классифицировать объекты с высокой точностью.

Решение задачи формирования базы правил нечёткого классификатора сводится к решению задачи построения (суб)оптимального количества кластеров. Для того чтобы это сделать с помощью алгоритма  $K$ -средних, предлагается следующий алгоритм.

Шаг 1. Выполняется предобработка данных: значения признаков экземпляров данных нормируются.

Шаг 2. Задаётся параметр  $K = 2$  – количество кластеров, на которые необходимо разбить данные.

Шаг 3. Выполняется алгоритм кластеризации данных (в данной работе им выступает алгоритм, разработанный на основе алгоритмов  $K$ -средних и WOA).

Шаг 4. На основе данных о сформированных кластерах (таких, как состав кластеров, координаты центроидов кластеров) определяется значение критерия валидности для оценки качества проведённой кластеризации.

Шаг 5. После расчёта критерия проверяется, равно ли  $K$  максимальному значению. Максимальное значение параметра  $K$  выбирают, исходя из характеристик классифицируемого набора данных. Если да, идёт переход на шаг 6. В ином случае старое значение  $K$  увеличивается на 1, после чего идёт переход на шаг 3.

Шаг 6. После того как была проведена оценка качества кластеризации при максимальном  $K$ , сравниваются значения критерия, полученные при различных значениях параметра  $K$ . Наилучшее значение использованного критерия качества кластеризации соответствует тому значению параметра  $K$ , которое показывает оптимальное по данному критерию количество кластеров.

Шаг 7. Формируется база нечётких правил в количестве, равном оптимальному количеству построенных кластеров, найденному на предыдущем шаге. Каждое правило соответствует одному из кластеров.

### Критерии качества кластеризации

Вышеуказанный алгоритм использует расчёт значения индекса (или критерия) кластерной валид-

ности (или индекса правильности) на основе результатов кластеризации. Индекс является оценкой качества кластеризации, проведённой при заданном  $K$ : индексы используются не только для осуществления процесса кластеризации, но и для определения оптимального количества кластеров по результатам проведённой кластеризации; дисперсия (1) также является одним из индексов валидности.

Поскольку не существует наилучшего критерия качества кластеризации, построение оптимального количества кластеров и как следствие работоспособность всего алгоритма формирования базы правил будут зависеть от использованного критерия. Следовательно, перед реализацией и проверкой работы алгоритма формирования базы правил для нечёткого классификатора необходимо определиться с тем, какой индекс (или индексы) будет в нём использоваться. Для этого потребуются экспериментальным путём проверить работоспособность алгоритма построения оптимального количества кластеров отдельно для каждого из этих критериев.

Критерии валидности разделяются на внешние и внутренние. Внешние индексы для оценки результата используют предварительную информацию о наборе данных: о количестве классов, о том, к какому классу экземпляры данных в действительности относятся; они используются для выбора наилучших результатов кластеризации для конкретного набора данных [12]. Внутренние используют только информацию о центроидах и составе найденных кластеров; на её основе индексы определяют компактность кластеров и разделимость кластеров друг от друга [13].

В данной работе реализованы только внутренние критерии кластерной валидности. Далее приводятся наиболее распространённые внутренние критерии качества кластеризации, использующиеся для определения оптимального количества кластеров. Эти критерии были проверены и в рамках данной работы.

Индекс Дэвиса–Болдуина (DB) представляет собой меру среднего сходства каждого сформированного кластера с кластером, наиболее близким к данному [14]. Разделимость между кластерами характеризуется значением знаменателя – разницей между центрами кластеров, а компактность кластеров относительно друг друга характеризуется значением числителя – отклонением экземпляров данных от центра кластеров. Кластеры должны быть как можно более удалены друг от друга, при этом отклонение экземпляров от центров кластеров должно оставаться минимальным. Величина индекса неотрицательна. Минимальное значение индекса DB соответствует оптимальному количеству кластеров.

Индекс Данна (Dunn) также работает на предположении, что кластеры компактны и хорошо разделены, если расстояние между кластерами большое, а диаметр кластеров мал [15]. Величина индекса неотрицательна. Максимальное значение индекса указывает на оптимальное количество кластеров. Однако он относительно сложен для вычисления и

чувствителен к присутствию шумовых значений в наборах данных: на значение индекса сильно влияют выбросы значений, поскольку они могут увеличить значения диаметров кластера [16].

Индекс «силуэта» (Silhouette) предполагает расчёт для каждого экземпляра данных меры того, насколько данный экземпляр схож с другими экземплярами своего кластера [17]. В отношении каждого экземпляра значение «силуэта» принимает значение из диапазона  $[-1; 1]$ . Высокое значение указывает на то, что экземпляр хорошо соответствует своему собственному кластеру и плохо соответствует соседним кластерам. Усреднённое по всем экземплярам значение индекса будет являться мерой того, насколько плотно сгруппированы экземпляры данных.

В индексе Calinski–Harabasz (CH) величина компактности основана на расстоянии от точек кластера до их центроидов, а величина разделимости – на расстоянии от центроидов кластеров до глобального центроида. Максимальное значение индекса указывает на оптимальное количество кластеров [17].

#### Эксперимент

Разработанные гибридный алгоритм кластеризации данных и алгоритм нахождения оптимального количества кластеров с помощью этого гибридного алгоритма были реализованы на языке программирования C#.

Эксперимент состоит из двух частей. Первая часть эксперимента проводилась для тестирования работы непосредственно алгоритма кластеризации на основе WOA в сравнении с алгоритмом роящихся частиц (PSO) (так же совмещённого с алгоритмом  $K$ -средних) и с оригинальным алгоритмом  $K$ -средних. Тестирование проводилось на 15 помеченных наборах данных из репозитория KEEL. Размер популяции для WOA и PSO был равен 50, количество итераций – 200. Все алгоритмы запускались на каждом наборе данных по 50 раз. Количество кластеров задавалось равным числу классов в соответствующем наборе данных.

Также была проверена значимость теста знаковых рангов Уилкоксона для оценки статистической значимости результатов работы алгоритмов. Значимость теста проводилась на нормированных значениях результатов работы алгоритмов. Алгоритмы были настроены так, что в случае обнаружения пустого кластера алгоритм  $K$ -средних прекращал свою работу, а метаэвристики WOA и PSO заменяли соответствующий центроид на точку, координаты которой соответствуют случайно выбранному экземпляру данных.

Усреднённые значения результатов работы алгоритмов кластеризации приведены в табл. 1 (полужирным шрифтом выделены наименьшие значения). Сформулирована нулевая гипотеза: медиана разностей между сравниваемыми выборками равна нулю. На уровне значимости 0,05 критерий знаковых рангов Уилкоксона для связанных выборок указывает на значимое отличие между значениями медиан дисперсии алгоритмов кластеризации WOA и  $K$ -средних

( $p$ -value < 0,001) и WOA и PSO ( $p$ -value = 0,026), следовательно, нулевая гипотеза отклоняется.

Таблица 1

Значения дисперсии алгоритмов кластеризации			
Набор данных	WOA	$K$ -средних	PSO
Iris	<b>97,363</b>	111,547	97,367
Wine	22796,088	23512,313	<b>22545,198</b>
Glass	<b>217,647</b>	264,204	229,942
Contraceptive	<b>7799,101</b>	11141,315	7805,321
Vowel	<b>1877,590</b>	4455,837	1970,139
Hepatitis	<b>5462,169</b>	6055,845	5471,713
Balance	<b>1423,851</b>	1425,811	1426,093
Heart	13303,286	14052,665	<b>13208,503</b>
Cleveland	<b>13903,251</b>	14812,181	13904,009
Pima	<b>54690,055</b>	73193,074	55700,059
Ecoil	<b>9266,317</b>	9567,224	10227,896
Bupa	<b>10165,352</b>	10981,388	10204,181
Ionosphere	<b>796,093</b>	796,560	796,357
Newthyroid	<b>1983,277</b>	2086,499	1986,451
Wisconsin	<b>2984,068</b>	2987,137	2984,171
Vehicle	<b>51565,498</b>	58058,472	53179,808

Вторая часть эксперимента посвящена проведению тестирования работы алгоритма построения оптимального количества кластеров, формируемых алгоритмом кластеризации на основе WOA и  $K$ -средних, и определению наиболее подходящего индекса валидности. Здесь были использованы те же наборы. Размер популяции для WOA был равен 50, количество итераций – 200. Алгоритм запускался на каждом наборе данных по 30 раз. По результатам каждого запуска осуществлялся расчёт значений критериев кластерной валидности. Полученные значения соответствующих индексов усреднялись по количеству запусков; решение о том, сколько же кластеров является оптимальным по этим критериям, принималось на основе средних значений этих критериев. Максимальное проверяемое количество кластеров равнялось удвоенному действительному количеству кластеров: например, для набора Iris с тремя классами максимальное количество проверяемых кластеров равнялось 6.

Также была проверена значимость теста знаковых рангов Уилкоксона для оценки статистической значимости результатов работы алгоритмов построения оптимального количества кластеров с различными критериями.

Определённое с помощью рассмотренного критерия качество кластеризации оптимальное количество кластеров, построенных с помощью гибридного алгоритма кластеризации – WOA и  $K$ -средних, приведено в табл. 2; результаты проверки статистической значимости по критерию Уилкоксона (уровень значимости 0,05) – в табл. 3. Значимое отличие между действительным и предсказанным количеством кластеров показал индекс CH. Для трех остальных индексов отличие незначимо. Лучший результат показал индекс Dunn.

Таблица 2

Набор данных	Кол-во кластеров действительное	Количество кластеров предсказанное			
		Silhouette	CH	DB	Dunn
Iris	3	2	2	2	2
Pima	2	3	2	3	2
Wine	3	3	3	3	5
Contraceptive	3	2	2	2	2
Glass	7	2	2	2	2
Ecoli	8	2	2	2	2
Vehicle	4	2	2	2	2
Ionosphere	2	2	2	2	2
Balance	3	6	2	6	6
Newthyroid	3	2	3	2	3
Hepatitis	2	2	2	2	2
Wisconsin	2	2	2	2	2
Heart	2	2	2	2	2
Vupa	2	2	2	2	2
Vowel	11	2	2	2	2

Таблица 3

Тест Уилкоксона. Значения  $p$ -value

	Количество кластеров предсказанное			
	Silhouette	CH	DB	Dunn
Кол-во кластеров действительное	0,094	0,017	0,094	0,182

## Заключение

Усреднённые результаты кластеризации свидетельствуют о том, что алгоритм кластеризации на основе WOA превосходит алгоритмы PSO и  $K$ -средних (кроме набора данных Heart и Wine). Алгоритм  $K$ -средних по полученным результатам значительно уступает метаэвристикам. Это связано с одним из недостатков данного алгоритма: результат зависит от выбора исходных центров кластеров, что часто ведёт к сходимости к локальному оптимуму. Результаты теста Уилкоксона подтверждают превосходство алгоритма WOA, следовательно, разработанный алгоритм может использоваться для кластеризации и разработки алгоритма формирования базы правил нечёткого классификатора.

Результаты нахождения оптимального количества кластеров с помощью алгоритма кластеризации WOA- $K$ -средние показывают, что применённые критерии качества кластеризации обеспечивают формирование действительного количества кластеров только в том случае, если это действительное количество не более трёх (например, для Wisconsin, Heart и Vupa). В остальных случаях, особенно при высоком действительном количестве кластеров, индексы позволяют сформировать количество кластеров, которое далеко от действительного. Яркими примерами являются проверки на наборах данных Glass, Ecoli, Vowel: согласно большинству критериев, для этих наборов два кластера являются оптимальным количеством, тогда как в действительности в них определено 7, 8 и 11 классов соответственно.

Проверка работоспособности гибридного алгоритма кластеризации WOA- $K$ -средние и алгоритма формирования оптимального количества кластеров с использованием критерия Dunn показывает, что они могут быть применены для реализации предлагаемого алгоритма генерации базы нечётких правил. В дальнейшем предполагается проверка работоспособности алгоритма формирования базы правил с учётом этого критерия при построении нечёткого классификатора на реальных наборах данных.

## Литература

1. Kaja N. An intelligent intrusion detection system / N. Kaja, A. Shaout, D. Ma // Applied Intelligence. – 2019. – No. 49. – P. 3235–3247.
2. Mex M.A. Сравнительный анализ применения методов дифференциальной эволюции для оптимизации параметров нечетких классификаторов / М.А. Мех, И.А. Ходашинский // Изв. Рос. академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 4. – С. 65–75.
3. Abraham A. Swarm intelligence algorithms for data clustering / A. Abraham, S. Das, S. Roy // Soft Computing for Knowledge Discovery and Data Mining, Part IV. – 2007. – P. 279–313.
4. Shafiq A. Analysis of particle swarm optimization based hierarchical data clustering approaches / A. Shafiq, D. Gillian, U.R. Saeed // Swarm and Evolutionary Computation. – 2015. – P. 1–16.
5. Xu R. Clustering / R. Xu, D.C. Wunsch // New Jersey. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 357 p.
6. Elephant search algorithm applied to data clustering / S. Deb, Z. Tian, S. Fong, R. Wong, R. Millham, K.K.L. Wong // Soft Computing. – 2018. – No. 22. – P. 6035–6046.
7. Mirjalili S. The Whale Optimization Algorithm / S. Mirjalili, A. Lewis // Advances in Engineering Software. – 2016. – No. 95. – P. 51–67.
8. Das S. Automatic clustering using an improved differential evolution algorithm / S. Das, A. Abraham, A. Konar // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – Part A: Systems and Humans. – 2008. – Vol. 38, No. 1. – P. 218–237.
9. Chen C.Y. Particle swarm optimization algorithm and its application to clustering analysis / C.Y. Chen, Y. Fun // Proceedings of 17th conference on electrical power distribution networks (EPDC). – 2012. – P. 789–794.
10. Merwe D.W. Data clustering using particle swarm optimization / D.W. Merwe, A.P. Engelbrecht // 2003 Congress on evolutionary computation (CEC 2003). – 2003. – Vol. 1. – P. 215–220.
11. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematics statistics and probability. – 1967. – Vol. 1. – P. 281–296.
12. Alok A.K. Development of An External Cluster Validity Index using Probabilistic Approach and Min-max Distance / A.K. Alok, S. Saha, A. Ekbal // International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications. – 2014. – Vol. 6. – P. 494–504.
13. NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set / M. Charrad, N. Ghazzali, V. Boiteau, A. Niknafs // Journal of Statistical Software. – 2014. – Vol. 61, No. 6. – P. 1–36.
14. Starczewski A. A new validity index for crisp clusters // Pattern analysis and applications. – 2017. – No. 20. – P. 687–700.
15. Mittal M. Validation of k-means and Threshold based Clustering Method / M. Mittal, R.K. Sharma, V.P. Singh //

International Journal of Advancements in Technology. – 2014. – Vol. 5, No. 2. – P. 153–160.

16. Muca M. A Proposed Algorithm for Determining The Optimal Number of Clusters / M. Muca, G. Kutrolli, M. Kutrolli // *European Scientific Journal*. – 2015. – Vol. 11, No. 36. – P. 112–120.

17. An extensive comparative study of cluster validity indices / O. Arbelaitz, I. Gurrutxaga, J. Muguerza, J.M. Perez, I. Perona // *Pattern recognition*. – 2013. – No. 46. – P. 243–256.

#### Корышев Николай Павлович

Студент каф. безопасности информационных систем (БИС) ТУСУРа

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

Тел.: +7-923-522-99-02

Эл. почта: koryshev1997@gmail.com

#### Ходашинский Илья Александрович

Д-р техн. наук, профессор каф.

комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС)

Томского государственного ун-та

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9355-7638>

Тел.: +7 (382-2) 70-15-29

Эл. почта: hodashn@gmail.com

Koryshev N.P., Hodashinsky I.A.

#### Algorithm to forming a rule base for a fuzzy classifier designed on the basis of the K-means clustering algorithm and the whale optimization algorithm

The article presents a description of the algorithm for generating fuzzy rules for a fuzzy classifier using data clustering, metaheuristic, and the clustering quality index, as well as the results of performance testing on real data sets.

**Keywords:** fuzzy classifier, clustering, K-means, Whale Optimization Algorithm, clustering quality indices.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-42-47

#### References

1. Kaja N., Shaout A., Ma D. An intelligent intrusion detection system. *Applied Intelligence*, 2019, no. 49, pp. 3235–3247.

2. Mekh M.A. Comparative analysis of differential evolution methods to optimize parameters of fuzzy classifiers / M.A. Mekh, I.A. Hodashinsky // *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 4, pp. 616–626.

3. Abraham A., Das S., Roy S. Swarm intelligence algorithms for data clustering. *Soft Computing for Knowledge Discovery and Data Mining, Part IV*, 2007, pp. 279–313.

4. Shafiq A., Gillian D., Saeed U.R. Analysis of particle swarm optimization based hierarchical data clustering approaches. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2015, pp. 1–16.

5. Xu R., Wunsch D.C. Clustering. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2009, 357 p.

6. Deb S., Tian Z., Fong S., Wong R., Millham R., Wong K.K.L. Elephant search algorithm applied to data clustering. *Soft Computing*, 2018, no. 22, pp. 6035–6046.

7. Mirjalili S., Lewis A. The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 2016, no. 95, pp. 51–67.

8. Das S., Abraham A., Konar A. Automatic clustering using an improved differential evolution algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2008, vol. 38, no. 1, pp. 218–237.

9. Chen C.Y., Fun Y. Particle swarm optimization algorithm and its application to clustering analysis. *Proceedings of 17th conference on electrical power distribution networks (EPDC)*, 2012, pp. 789–794.

10. Merwe D.W., Engelbrecht A.P. Data clustering using particle swarm optimization. *2003 Congress on evolutionary computation (CEC 2003)*, 2003, vol. 1, pp. 215–220.

11. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematics statistics and probability*, 1967, vol. 1, pp. 281–296.

12. Alok A.K., Saha S., Ekbal A. Development of An External Cluster Validity Index using Probabilistic Approach and Min-max Distance. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 2014, vol. 6, pp. 494–504.

13. Charrad M., Ghazzali N., Boiteau V., Niknafs A. NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 1–36.

14. Starczewski A. A new validity index for crisp clusters. *Pattern analysis and applications*, 2017, no. 20, pp. 687–700.

15. Mittal M., Sharma R.K., Singh V.P. Validation of k-means and Threshold based Clustering Method. *International Journal of Advancements in Technology*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 153–160.

16. Muca M., Kutrolli G., Kutrolli M. A Proposed Algorithm for Determining The Optimal Number of Clusters. *European Scientific Journal*, 2015, vol. 11, no. 36, pp. 112–120.

17. Arbelaitz O., Gurrutxaga I., Muguerza J., Perez J.M., Perona I. An extensive comparative study of cluster validity indices. *Pattern recognition*, 2013, no. 46, pp. 243–256.

#### Nikolay P. Koryshev

Student, Department of Information Systems Security TUSUR

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7-923-522-99-02

Email: koryshev1997@gmail.com

#### Ilya A. Hodashinsky

Doctor of Science in Engineering, Professor,

Department of Complex Information Security of Computer Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9355-7638>

Phone: +7 (382-2) 70-15-29

Email: hodashn@gmail.com



УДК 004.852

А.С. Гончаров, А.О. Савельев, А.С. Писанкин, А.Ю. Чепкасов, Д.Н.К. Джаякоди

## Подход к автоматическому прогнозированию состояния промышленных манипуляторов с применением методов машинного обучения

В связи с интенсивным развитием информационных технологий и наступлением 4-й промышленной революции количество роботизированных производств неуклонно растет. Также увеличивается объем производства и использования роботов. Одновременно с этим развивается направление по сопровождению и управлению цифровым производством. Робототехнические системы не способны полностью исключить человека из технологической цепочки, так как нуждаются в своевременном обслуживании и отработке персоналом внештатных ситуаций. Одним из способов по снижению рисков неожиданных поломок является прогностический подход к обслуживанию основных средств производства. Реализация данного подхода осуществляется с применением средств анализа данных. В настоящем исследовании приведены результаты применения методов машинного обучения для анализа данных промышленных роботов с целью прогнозирования потенциальных отказов.

**Ключевые слова:** промышленный робот, анализ данных, машинное обучение, предиктивная аналитика.  
**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-48-54

Отличительной чертой современности является существенное увеличение объемов информации, генерируемой различными системами, средами и сообществами. Не являются исключением и технически сложные производства. Оценка текущего состояния оборудования в составе сложных технологических комплексов и прогноз его работоспособности являются в настоящее время одной из приоритетных задач при построении промышленного интернета вещей [1, 2]. Вместе с этим развиваются подходы по организации информационной инфраструктуры для анализа данных крупных промышленных производств с использованием технологий облачных вычислений и беспроводной передачи данных [3, 4]. С развитием систем сбора данных (датчиков, протоколов передачи и агрегирования) становится возможным производство комплексного мониторинга и анализа исторических данных оборудования. Актуальной тенденцией технического обслуживания является прогностный подход, примером которого являются методы прогнозирования и управления здоровьем (Prognosis and Health Management), технического обслуживания на основе состояния (Condition-based Maintenance) и остаточный срок службы (Remaining Useful Life) [5–7]. Системы, реализующие метод прогнозирования и управления здоровьем, предназначены для прогнозирования потенциальных неисправностей и определения оставшегося срока службы оборудования [8]. Модели, реализующие оценку остаточного полезного ресурса оборудования, не только прогнозируют срок службы, но и обеспечивают доверительную границу предсказания. Принимая во внимание данный подход, инженеры могут планировать техническое обслуживание, оптимизировать операционную эффективность и избегать незапланированных простоев. Техническое обслуживание на основе состояния – это стратегия принятых решений по обслуживанию оборудования на основе данных о его фактическом

состоянии [9, 10]. Непрерывно генерируемые массивы данных промышленным оборудованием содержат потенциально полезные знания, которые можно использовать для улучшения и оптимизации производственных процессов [11, 12]. В общем виде процесс технического обслуживания на основе состояния представляет собой следующую последовательность работы с данными:

1. Сбор данных с оборудования программно-аппаратными средствами (датчики и системы мониторинга).
2. Агрегирование и подготовка данных в системах хранения.
3. Применение алгоритмов анализа данных с целью проведения процедуры оценки состояния оборудования, учитывая правила и нормы технического обслуживания.
4. Принятие решения о планировании мероприятий по обслуживанию оборудования с последующими оперативными действиями для устранения выявленных дефектов.
5. Обновление плана и норм по техническому обслуживанию оборудования.

Применение методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей на этапе анализа данных для обучения математической модели прогнозирования технического состояния оборудования на основе исторических данных о работе позволяет перейти к прогностической модели технического обслуживания [13–15].

### Цель

Настоящее исследование направлено на применение подходов интеллектуального анализа данных с целью прогнозирования работоспособности промышленных манипуляторов. В частных случаях прогнозирование направлено на выявление аномальных значений параметров при работе оборудования, классификации потенциальных неисправностей, обучение регрессионной модели для построе-

ния доверительного интервала измеряемых параметров. Подход анализа данных включает в себя: подготовку и первичную обработку данных, применение методов статистической обработки данных, создание и тестирование моделей машинного обучения, анализ результатов.

Цели исследования:

1. Создание и обучение модели для классификации нагрузки на промышленном манипуляторе – подход к решению задачи поиска аномальных значений, свидетельствующих о перегрузке.

2. Сравнительный анализ результатов работы моделей машинного обучения и искусственных нейронных сетей (ИНС) при решении задачи прогнозирования перегрева подвижных частей промышленного манипулятора в рамках предсказательного обслуживания.

Исследование проводилось на данных, собранных с приводов промышленных роботов (как манипуляторов, так и отдельных двигателей), которые выполняли однотипные рабочие операции в разных режимах работы (без нагрузки, с нагрузкой, с перегрузкой).

#### Задачи

Основные задачи в рамках настоящего исследования:

1. Сбор данных с приводов промышленных манипуляторов (испытательного стенда с приводами и отдельными роботами).

2. Разработка модуля управления выборками данных (для обучения и тестирования).

3. Разработка модуля управления моделями машинного обучения (создание, обучение, сохранение, тестирование).

4. Разработка модуля визуализации результатов работы моделей машинного обучения.

5. Обучение и тестирование моделей машинного обучения на данных о работе приводов промышленных манипуляторов.

#### Методы решения задач

Для обработки данных методами статистики использованы:

1. Нормализация данных (z-оценка) – для сравнения значений разброса данных между признаками.

2. Скользящее среднее – для формирования сглаженных временных рядов.

Для анализа данных методами машинного обучения использованы:

1. Методы регрессии: линейная модель, плотная модель, случайный лес, Гауссовский процесс – для выявления зависимости между признаками выборки с целью прогнозирования значения целевого параметра (например, температуры для решения задачи прогнозирования перегрева привода).

2. Методы искусственных нейронных сетей: сверточная, рекуррентная – для прогнозирования значения целевого параметра.

3. Методы классификации: Наивный Байес, опорных векторов, дерево решений – для классифи-

кации нагрузки на промышленном роботе при решении задачи выявления весовой перегрузки.

#### Разработка программного обеспечения

Основной бизнес-процесс, реализуемый приложением:

1. Загрузка исторических данных о работе промышленного робота, описывающих рабочий процесс в штатном и нештатном режиме.

2. Подготовка данных для обработки методами статистики, машинного обучения.

3. Обучение модели на выборке.

4. Тестирование и визуализация результатов.

В настоящее время разработано множество программных средств и библиотек, реализующих алгоритмические и математические методы. Для разработки использованы следующие программные средства:

1. MongoDB – нереляционная база данных для хранения выборок и моделей машинного обучения в виде JSON документов.

2. Django-Framework – фреймворк для создания веб-приложений на языке Python.

3. Pandas, Numpy – библиотеки обработки и подготовки данных на языке Python.

4. Scikit Learn, Keras – открытые библиотеки для создания моделей машинного обучения и нейронных сетей на языке Python.

5. Matplotlib, Plotly – библиотеки для визуализации данных на языке Python.

#### Результаты применения методов машинного обучения

Задача классификации нагрузки актуальна для промышленных манипуляторов, работающих с передвижением различного типа грузов. Штатные средства мониторинга и самодиагностики сигнализируют о перегрузке по весу только тогда, когда зафиксированы параметры, превосходящие определенный порог значений, заданный производителем как максимально допустимая нагрузка. Исходя из этого, оператор не сможет получить сигнализацию о том, что робот, который настроен на перемещение объектов определенного веса, манипулирует объектом, масса которого отклоняется от необходимой, но при этом значения параметров робота находятся в пределах допустимых значений. Для решения такой задачи применяются методы классификации, позволяющие определять текущую нагрузку на промышленном манипуляторе.

Исходный набор содержит данные по 25 опытам, каждый из которых реализует 5 экспериментов с определенным значением нагрузки. Каждый опыт состоит из набора данных для всех исполняемых команд рабочего цикла манипулятора, содержащего значения силы тока в электроприводе на каждой из четырех осей и метки соответствующей им нагрузки.

Для анализа были выбраны следующие поля набора данных:

1. Команда – это номер исполняемой операции, соответствующий номеру строки программы рабочего процесса.

2. Ось – подвижный элемент манипулятора (включает в себя силу тока на статоре, момент силы, скорость вращения).

3. Нагрузка – категория веса, которым оперирует манипулятор (варьируется от 0 до 4).

Для повышения точности из обучающей выборки исключены данные, соответствующие команде бездействия, использование которых в обучающей выборке нецелесообразно. Далее определен набор осей, чьи графики зависимостей силы тока от нагрузки приближены к виду монотонно возрастающей или убывающей функции (рис. 1).

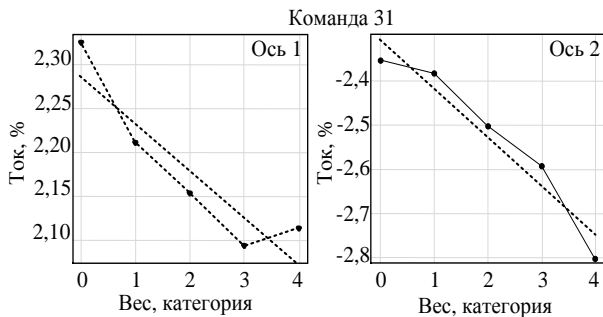


Рис. 1. Зависимость средних значений токов на осях № 1, 2 от нагрузки на манипуляторе; сплошная линия – средние значения тока при определенной нагрузке, пунктирная линия – монотонная функция

На основе проведенного анализа сформированы выборки:

1. Выборка 1 – для каждого веса формируется кортеж, значения которого – средние значения токов для осей, чьи графики зависимости приближены к виду монотонной функции.

2. Выборка 2 – замена значений токов, вносящих наибольшую погрешность, на значения аппроксимирующих прямых.

3. Выборка 3 – для каждого веса формируется кортеж, компонентами которого являются значения аппроксимирующих прямых.

4. Выборка 4 идентична выборке 1 за исключением данных, вносящих наибольшую погрешность.

Для решения задачи классификации нагрузки были отобраны три алгоритма, показавшие наилучший результат: Наивный Байес, дерево решений и метод опорных векторов. Входным признаком для обучения и тестирования моделей выбран ток на каждой из осей манипулятора. Выходным признаком является номер категории нагрузки. Общее количество строк данных в выборке 5 176 (примерно по 1 000 строк, описывающих цикл работы манипулятора с определенной категорией весовой нагрузки). Распределение данных на обучающую и тестовую выборки проводилось в соотношении 80:20 с использованием функции рандомизации. Эффективность используемых алгоритмов оценивается по двум параметрам:  $t$  – среднее время тестирования (в миллисекундах),  $P$  – точность (процент правильных ответов). Результаты работы алгоритмов машинного обучения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Модель	Выборка 1		Выборка 2		Выборка 3	
	$t$ , мс	$P$ , %	$t$ , мс	$P$ , %	$t$ , мс	$P$ , %
Наивный Байес	1,09	88	1,03	84	1,35	92
Дерево решений	1,08	72	0,93	36	1,11	76
Метод опорных векторов	1,05	88	1,06	84	1,13	92

Достигнутый результат – определение веса с точностью 92%, определение нагрузки за полный рабочий цикл манипулятора. Из-за малого количества исходных данных и специфики решаемой задачи формирование обучающей выборки (значения, полученные линейной аппроксимацией данных) и тестовой выборки (усредненное значение по каждой команде) происходило на основе всех имеющихся данных, что вносит погрешность в полученный результат, однако достигнутая высокая точность, позволяет сделать вывод, что решение задачи определения нагрузки манипулятора по измеренным значениям силы тока на электроприводе возможна при использовании различных наборов данных для обучающей и тестовой выборок. Определить нагрузку на манипуляторе в произвольный момент времени не представляется возможным по двум причинам: диапазон изменения силы тока в ходе выполнения любой команды слишком велик (значения меняются произвольным образом), и в ходе исследования не была выявлена зависимость между нагрузкой и значением силы тока для некоторых команд рабочего цикла.

Апробация алгоритма прогнозирования неисправностей выполнена на примере задачи прогнозирования перегрева привода промышленного робота.

Исходный набор содержит данные, собранные с четырех промышленных манипуляторов, выполнявших определенный рабочий процесс на протяжении не менее 40 ч. Общее количество строк данных 188 323 (для одного манипулятора). Распределение данных на обучающую и тестовую выборки проводилось в соотношении 70:30 с использованием функции рандомизации. Для каждой оси манипулятора температура колеблется в определенном диапазоне, постепенно увеличиваясь в процессе выполнения рабочего процесса. С целью уменьшения погрешности была проведена аппроксимация временного ряда температуры.

На этапе подготовки данных для улучшения точности модели проведена операция по нормализации данных с применением z-оценки:

$$S = (x - \mu) / \sigma, \quad (1)$$

где  $x$  – значение,  $\mu$  – среднее значение,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

На рис. 2 изображен результат нормализации данных.

При обучении использовались следующие модели ИНС: линейная, плотная (линейная с несколь-

кими скрытыми слоями), сверточная ИНС, рекуррентная ИНС. Используемая функция активации: gelu. Данная функция возвращает значение, переданное в функцию, если оно положительно, в противном случае возвращает значение ноль. На рис. 3 представлен результат тестирования модели.

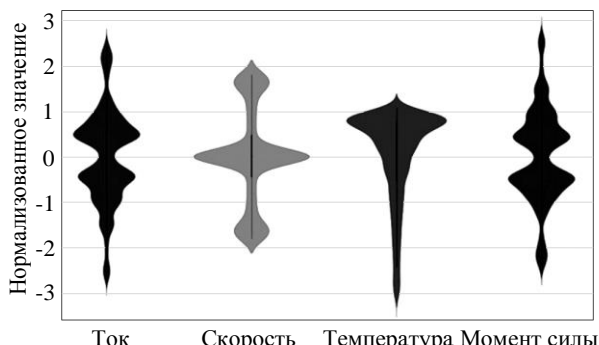


Рис. 2. Нормализованные данные для одной из выборок

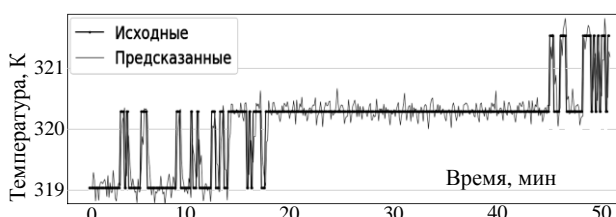


Рис. 3. Результат прогнозирования при использовании сверточной нейронной сети; толстая линия – исходные данные, тонкая линия – предсказанные данные

Эффективность выбранных алгоритмов машинного обучения для решения поставленной задачи определяется следующими параметрами:  $t$  – время обучения и  $P$  – относительная погрешность предсказаний температуры. В табл. 2 представлены результаты тестирования моделей ИНС.

Таблица 2

**Результаты тестирования моделей**

Модель	Метрики		
	$P$ , %	$t$ , с	Кол-во эпох
Линейная	2,4	24,27	17
Плотная	2,41	8,54	5
Сверточная ИНС	2,25	24,32	15
Рекуррентная ИНС	2,22	1184,9	20

Исходя из результатов тестирования, наибольшую точность показывает рекуррентная ИНС, однако сверточная ИНС показывает близкую точность прогнозирования при меньших временных затратах на обучение.

Прогнозирование значений температуры обеспечивается при помощи методов регрессии случайного леса (рис. 4) и Гауссовского процесса (рис. 5). Регрессионный анализ позволяет найти зависимость между зависимой величиной (в данном случае – температура привода) и независимыми переменными (скорость вращения, ток, момент силы) во временном ряду.

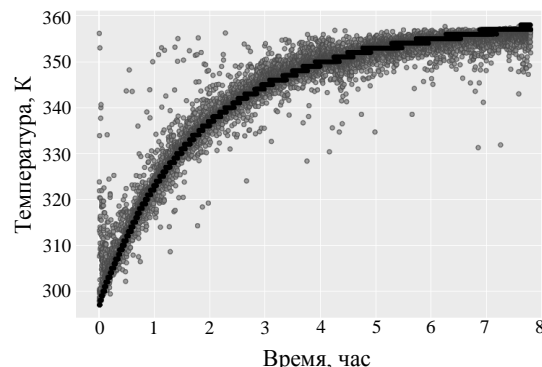


Рис. 4. Модель случайного леса (линия – измеренные данные; точки – прогнозируемые данные)

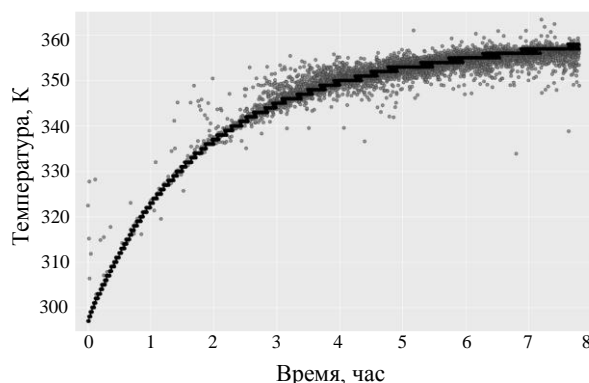


Рис. 5. Модель регрессора Гауссовского процесса (линия – измеренные данные; точки – прогнозируемые данные)

Эффективность выбранных алгоритмов машинного обучения для решения поставленной задачи определяется следующими параметрами:  $t$  – время обучения, MSE – среднеквадратичная ошибка, MAE – средняя абсолютная ошибка и оценка дисперсии регрессии (табл. 3).

Таблица 3

**Результаты тестирования моделей**

Модель	Метрики			
	$t$ , с	MSE	MAE	Оценка дисперсии регрессии
Случайный лес	1	18,64	2,2	0,92
Гауссовский процесс	45	1,56	0,45	0,99

Исходя из результатов, можно сделать вывод, что модель регрессии Гауссовского процесса точнее модели регрессии случайного леса, но требует больше времени на обучение. Обученные модели, имеющие удовлетворительные результаты при тестировании (более 90% точности), могут быть использованы для анализа данных при реализации стратегии предсказательного обслуживания. В условиях непрерывной генерации данных производством указанные модели могут быть дообучены до требуемой точности при решении задач прогнозирования сбоев и отказов оборудования.

**Заключение**

В настоящем исследовании рассмотрен подход к прогнозированию состояния промышленного манипулятора с использованием методов ИНС и ма-

шинного обучения. Задача прогнозирования является актуальной и развитие технологий сбора и обработки данных обеспечивает переход к новой модели управления производством – управление и планирование бизнес-процессов предприятия на основе анализа данных (Data-driven decision management).

Несмотря на значительный прогресс в вопросах сбора и предварительной обработки данных, нет эффективного решения, обеспечивающего унификацию процесса управления различными типами промышленных манипуляторов, в том числе от разных производителей. Существующие на рынке решения по мониторингу и анализу данных собираются под конкретные типы роботов и производств, зачастую не совместимых с оборудованием другого производителя. Потенциальным решением является апробированный в рамках настоящей работы подход по анализу обобщенных данных о работе манипулятора (не привязанных к конкретной системе мониторинга) с использованием машинного обучения в качестве надстройки над системами сбора данных. Апробация подхода на тестовых данных при решении задачи определения значения целевого параметра – нагрузки – показала точность более 90% при применении моделей ИНС и машинного обучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90113.

#### Литература

- Maintenance Analytics – The New Know in Maintenance / R. Karim, J. Westerberg, D. Galar, K. Uday // 3rd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology AMEST. Biarritz, France. – 2016. – Vol. 49, No. 28. – P. 214–219.
- Him L.C. IoT-based Predictive Maintenance for Smart Manufacturing Systems / L.C. Him, Y.Y. Poh, L.W. Pheng // Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). – Lanzhou, China, 2019. – P. 1942–1944.
- Ayad S. An IoT approach for a smart maintenance / S. Ayad, L.S. Terrissa, N. Zerhouni // 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET). – Hammamet, Tunisia, 2018. – P. 210–214.
- Chanv B. Structural health monitoring system using IOT and wireless technologies / B. Chanv, S. Bakhru, V. Mehta // 2017 International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT). – Jaipur, India, 2017. – P. 151–157.
- Cachada A. Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture / A. Cachada, J. Barbosa, L. Deusdado et al. // 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – Turin, Italy, 2018. – P. 139–146.
- Borgi T. Data analytics for predictive maintenance of industrial robots / T. Borgi, A. Hidri, B. Neef, M.S. Na-ceur // 2017 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET). – Hammamet, Tunisia, 2017. – P. 412–417.
- Li Z. Prediction of Railcar Remaining Useful Life by Multiple Data Source Fusion / Z. Li, Q. He // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2015. – Vol. 16, No. 4. – P. 2226–2235.
- Essential steps in prognostic health management / S. Das, R. Hall, S. Herzog, G. Harrison, M. Bodkin, L. Martin // 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management. – Montreal, Canada, 2011. – P. 1–9.
- Zhang Y. Research on decision-making process of condition-based maintenance / Y. Zhang, S. Wang, X. Han // 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). – Chengdu, China, 2013. – P. 1437–1440.
- Rawat M. Condition based optimal maintenance strategy for multi-component system / M. Rawat, B.K. Lad. // 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. – Bangkok, China, 2013. – P. 1437–1441.
- Rahhal J.S. IOT Based Predictive Maintenance Using LSTM RNN Estimator / J.S. Rahhal, D. Abualnadi // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE). – Istanbul, Turkey, 2020. – P. 1–5.
- Kanawaday A. Machine learning for predictive maintenance of industrial machines using IoT sensor data / A. Kanawaday, A. Sane // 2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). – Beijing, China, 2017. – P. 87–90.
- Rastegari A. Maintenance decision making, supported by computerized maintenance management system / A. Rastegari, M. Mobin // 2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). – Tucson, USA, 2016. – P. 1–8.
- Dsouza J. Preventive Maintenance for Fault Detection in Transfer Nodes using Machine Learning / J. Dsouza, S. Velan // 2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE). – Dubai, United Arab Emirates, 2019. – P. 401–404.
- Fariza V. Comparing Artificial Neural Network and Failure Distribution Methods for Maintenance Scheduling: A Case Study of Wooden Door Industry / V. Fariza, Z. Zulkarnain, I. Surjandari // 2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). – Zhengzhou, China, 2018. – P. 161–165.

#### Гончаров Аркадий Сергеевич

Программист научно-образовательного центра «Автоматизация и информационные технологии» Инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77  
Эл. почта: asg19@tpu.ru

#### Савельев Алексей Олегович

Кан. техн. наук, доцент отд. информационных технологий ИШИТР НИ ТПУ  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77, вн. т. 44-31.  
Эл. почта: sava@tpu.ru

#### Писанкин Андрей Сергеевич

Студент отд. информационных технологий ИШИТР НИ ТПУ  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77  
Эл. почта: asp66@tpu.ru

**Чепкасов Артем Юрьевич**

Студент отд. информационных технологий ИШИТР НИ ТПУ  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77  
Эл. почта: аус1@tpu.ru

**Джаякоди Душанта Налин Кумара**

Ph. D, профессор научно-образовательного центра  
«Автоматизация и информационные технологии» ИШИТР  
и робототехники НИ ТПУ  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-7004-2930  
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77, вн. т. 44-09  
Эл. почта: nalin@tpu.ru

Goncharov A.S., Savelev A.O., Pisankin A.S.,  
Chepkasov A.Y., Jayakody D.N.K.

**Approach to an automatic prediction of the state of industrial manipulators using machine learning methods**

Due to intensive development of information technologies and the onset of 4th industrial revolution the number of robotic industries is steadily growing. The volume of production and the use of robots is also increasing. At the same time, the support and the management of digital production is being rapidly developing. The robotic systems are incapable of completely excluding a person from the technological chain, since they need timely maintenance and personnel working out the emergency situations. One of the solutions to reduce the risk of unexpected breakdowns is a predictive approach to the maintenance. The implementation of this approach is carried out using data analysis tools. This study presents the results of applying machine learning methods to analyze data from industrial robots in order to predict potential failures.

**Keywords:** industrial robot, data analysis, machine learning, predictive analytics

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-48-54

**References**

1. Karim R., Westerberg J., Galar D., Uday K. [Maintenance Analytics – The New Know in Maintenance]. *3rd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology AMEST*. Biarritz, France, 2016, vol. 49, no. 28, pp. 214–219.
2. Him L.C., Y.Y. Poh, L.W. Pheng. [IoT-based Predictive Maintenance for Smart Manufacturing]. *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*. Lanzhou, China, 2019, pp. 1942–1944.
3. Ayad S., Terrissa L.S., Zerhouni N. [An IoT approach for a smart]. *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET)*. Hammamet, Tunisia, 2018, pp. 210–214.
4. Chanv B., Bakhru S., Mehta V. [Structural health monitoring system using IOT and wireless]. *2017 International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT)*. Jaipur, India, 2017, pp. 151–157.
5. Cachada A., Barbosa J., Deusdado L. et al. [Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System]. *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Turin, Italy, 2018, pp. 139–146.
6. Borgi T., Hidri A., Neef B, Naceur M.S. [Data analytics for predictive maintenance of industrial robots]. *2017 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET)*. Hammamet, Tunisia, 2017, pp. 412–417.

7. Li Z., He Q. [Prediction of Railcar Remaining Useful Life by Multiple Data Source Fusion]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015, vol. 16, no. 4, pp. 2226–2235.

8. Das S., Hall R., Herzog S., Harrison G., Bodkin M., Martin L. [Essential steps in prognostic health management]. *2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management*. Montreal, Canada, 2011, pp. 1–9.

9. Zhang Y., Wang S., Han X. [Research on decision-making process of condition-based maintenance]. *2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*. Chengdu, China, 2013, pp. 1437–1440.

10. Rawat M., Lad B.K. [Condition based optimal maintenance strategy for multi-component system]. *2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Bangkok, China, 2013, pp. 1437–1441.

11. Rahhal J.S., Abualnadi D. [IOT Based Predictive Maintenance Using LSTM RNN Estimator]. *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*. Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1–5.

12. Kanawaday A., Sane A. [Machine learning for predictive maintenance of industrial machines using IoT sensor data]. *2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*. Beijing, China, 2017, pp. 87–90.

13. Rastegari A., Mobin M. [Maintenance decision making, supported by computerized maintenance management system]. *2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. Tucson, USA, 2016, pp. 1–8.

14. Dsouza J., Velan. S. [Preventive Maintenance for Fault Detection in Transfer Nodes using Machine Learning]. *2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*. Dubai, United Arab Emirates, 2019, pp. 401–404.

15. Fariza V., Zulkarnain Z, Surjandari I. [Comparing Artificial Neural Network and Failure Distribution Methods for Maintenance Scheduling: A Case Study of Wooden Door Industry]. *2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. Zhengzhou, China, 2018, pp. 161–165.

**Arkady S. Goncharov**

Software Developer, School of Computer Science & Robotics, Scientific and Educational Center «Automation and Information Technologies», National Research Tomsk Polytechnic University (NI TPU) 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-17-77  
Email: asg19@tpu.ru

**Alexey O. Savelev**

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor, School of Computer Science & Robotics, Department of Information Technology NI TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-17-77, ext. 4431.  
Email: sava@tpu.ru

**Andrey S. Pisankin**

Student, School of Computer Science & Robotics, Department of Information Technology NI TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-17-77  
Email: asp66@tpu.ru

**Artem Y. Chepkasov**

Student, School of Computer Science & Robotics,  
Department of Information Technology NI TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-17-77  
Email: ayc1@tpu.ru

**Dushantha Nalin K. Jayakody**

PhD, School of Computer Science & Robotics,  
Scientific and Educational Center «Automation and Infor-  
mation Technologies» NI TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-7004-2930  
Phone: +7 (382-2) 70-17-77, ext. 44-09  
Email: nalin@tpu.ru

УДК 65.011.56: 622

**Э.М. Мехтиев**

## Современные подходы при создании системы управления техническим обслуживанием контрольно-измерительными приборами и автоматики на нефтегазодобывающих предприятиях

Рассматриваются вопросы проектирования архитектуры системы управления техническим обслуживанием контрольно-измерительных приборов и автоматики, включающей в себя различные подсистемы и элементы как составляющие для организации бизнес-процессов технического обслуживания крупных производственных предприятий в нынешних реалиях при создании сложных цифровых моделей и места подобных систем в составе информационного пространства. Определены функциональные требования, которым должна удовлетворять система управления при реализации, предложены подходы по разработке и актуализации нормативов обслуживания. С учетом общей тенденции увеличения количества собираемой и обрабатываемой информации с полевого уровня, множества технологических объектов, а также повышения автономности и сложности управляющих систем задача по организации своевременного обслуживания и ремонта и обработке результатов традиционными методами становится не решаемой. Обеспечение независимой оценки качества и своевременности работ, невозможность искажения информации об обслуживании является ключевым моментом для построения прозрачных взаимоотношений при организации сервисного обслуживания. В данной статье изложены методы и алгоритмы бизнес-процессов, необходимые при проектировании и внедрении подобных систем. На основе описанной методики разработана информационная система, проведена оценка экономического эффекта по итогам ее внедрения и адаптации.

**Ключевые слова:** система управления техническим обслуживанием, ТОиР, нормативы технического обслуживания, бизнес-процессы.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-55-61

Стремительное развитие информационно-коммуникационных технологий, широкое проникновение сетей сотовых операторов в повседневную жизнь, значительное удешевление автономных устройств породило в последнем десятилетии переход от привычного понятия автоматизации технологических процессов к цифровизации производства и как следствие запуск на предприятиях нефтегазового комплекса проектов создания «цифровых месторождений», моделей «цифровых двойников» и пр. Для специалистов и разработчиков в данной области основным различием между этими понятиями является возможность получения конечными пользователями, сотрудниками и руководителями предприятий новых информационно наполненных, взаимосвязанных цифровых сервисов, в том числе охватывающих вспомогательные процессы производства. При этом данные сервисы должны быть доступны, в том числе вне традиционного рабочего места, для оперативного принятия решений в круглосуточном режиме работы.

Обработка больших массивов данных и выборка наиболее важных позволяют избавиться от рутинных операций, сконцентрироваться на наиболее проблемных и системных задачах. Вместо традиционных систем «лоскутной автоматизации» приходят системы со сквозными процессами и возможностью обратиться к первоисточнику информации: датчику или средству измерения, исключаются многократные перегрузки и конвертации данных, снижающие достоверность и доказуемость. Применение в производственной деятельности современных инфор-

мационных решений для управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования направлено на повышение эффективности производства и персонала предприятий, снижение себестоимости, увеличение производительности, в условиях глобальной нестабильности, а также в условиях ограничения потребления основными потребителями продукции [1–3].

На фоне постоянного увеличивающегося количества оборудования и сложности внедряемых систем для подразделений информационных технологий нефтегазодобывающих предприятий наиболее актуальной становится задача организации технического обслуживания и ремонта средств контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), затраты на данную статью бюджета могут составлять до 3% в общей себестоимости продукции. Наиболее распространенным подходом к организации технического обслуживания и ремонта является его осуществление по факту достижения очередного нормативного срока или проведение ремонта (замены) по факту выхода из строя, который является более ресурсоемким и трудозатратным в сравнении с современным подходом, ориентированным на реальное состояние оборудования. Данный подход заключается в мониторинге, измерении или расчете актуального состояния оборудования для своевременного обнаружения и исправления причин отказов оборудования.

Далее предлагается выбор оптимального комбинированного подхода, в основе которого лежит методика, которая в том числе позволяет рассчитать



и обосновать количество достаточного персонала для организации качественного технического обслуживания.

Процесс внедрения современной системы управлением ТОиР средствами КИПиА разделяется на две основные задачи:

- разработка, поддержка и оптимизация нормативов обслуживания;
- внедрение информационной системы, которая поддерживает хранение и накопление фактических

показателей, а также может оптимизировать производственный процесс организации ТОиР.

Описание процесса организации работ основано на опыте по разработке и внедрению отечественного программного обеспечения «Система автоматизации и контроля выполнения работ». Процесс организации ТОиР на промышленном предприятии можно изобразить в виде схемы замкнутого контура управления, представленной на рис. 1.

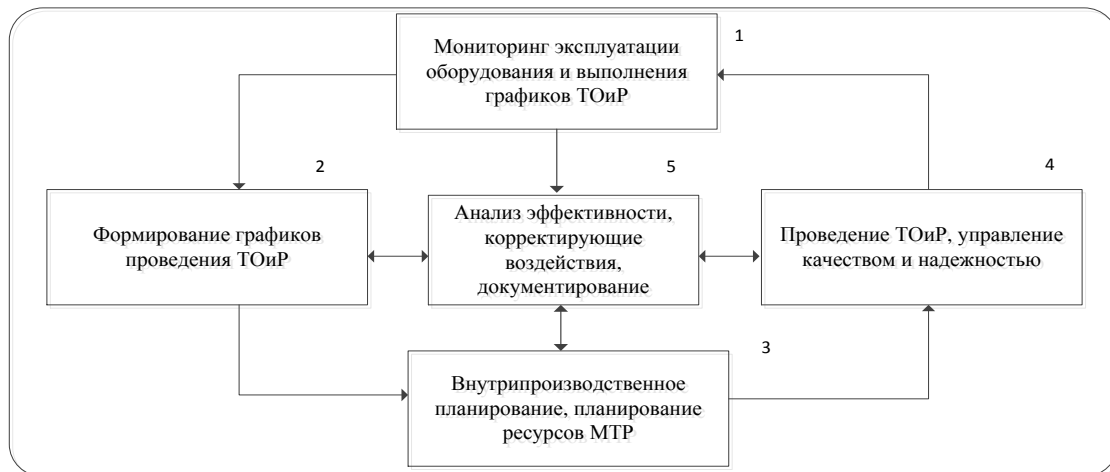


Рис. 1. Замкнутый контур управления при организации процесса ТОиР

Основным источником для любой системы управления производством является достоверная информация с разнородных средств измерения, датчиков и преобразователей. В отличие от организации обслуживания ИТ-инфраструктуры, где практикуется заключение сервисных контрактов на основе соглашения об уровне сервиса (SLA) и показателей качества, рассчитываемых на основе системы метрик, организация технического обслуживания, поверки и калибровки первичных датчиков и средств автоматизации, как правило, базируется на нормативах временных затрат трудовых ресурсов.

Ввиду отсутствия единого классификатора-справочника по продолжительности операций состав и структура набора работ обусловлена типом устройства, методом измерения и сложностью конструкции. Зачастую единственным источником является паспорт или документация на оборудование, рекомендации его производителя по периодичности и набору работ. Каждому предприятию приходится разрабатывать свою уникальную систему расчетов, основанную на мнении экспертов, а также регулярно проводить комплекс работ по составлению и обновлению технологических карт и нормативов. Проведенный анализ открытых и отраслевых источников позволяет сделать вывод об отсутствии актуальных нормативов, а последними основополагающими являются нормы времени, утвержденные в 90-х годах предыдущего столетия, в которых никак не могли быть учтены особенности современного уровня оборудования [2].

Ввиду быстрого выведения на рынок электронного и микропроцессорного оборудования многие производители из-за ограниченного срока эксплуатации не всегда обладают рекомендациями и методиками его обслуживания. Тем не менее обязательное и качественное выполнение ТО средств КИПиА, проверок и инспекционных обходов является залогом работы основного технологического оборудования, недопущения технологических аварий и простоев.

Наиболее сложной задачей, которую необходимо решить в рамках внедрения подобной системы, является обеспечение качества и своевременности проведенного обслуживания, а с учетом ручной обработки и косвенного подтверждения работ при массовом активировании работ на десятках или сотнях распределенных объектах в ограниченный промежуток времени это не представляется возможным. При расследованиях нештатных ситуаций очень тяжело восстановить хронологию предыдущих событий и тем более оценить влияние некачественного проведения работ.

#### Автоматизированное формирование норм трудозатрат. Разработанная методика

Нормативное время обслуживания датчиков и приборов состоит из прямых затрат персонала определенной категории в зависимости от сложности, использования материалов, при необходимости услуг производителя оборудования, а также учитывает различные условия выполнения работ или оказания услуг (удаленность, сезонность, стесненность и пр.) [11, 12].

Нормы времени с учетом коэффициентов рассчитываются следующим образом:

$$H_k = H \left( 1 + \sum_{i=1}^N K_i \right), \quad (1)$$

где  $H_k$  – норма времени с учетом коэффициентов, чел./ч;  $H$  – нормы времени в соответствии с экспертной оценкой либо информацией от производителя оборудования, чел./ч;  $K_i$  – корректирующие коэффициенты.

Для расчета производственной программы и определения (обоснования) необходимой численности персонала для организации обслуживания определяются схема ТОиР, соответствующий набор разных видов ТО в год на основе технологических карт и требований нормативных документов к периодичности ТО.

Следующий шаг – нормы времени для определенного вида ТО умножаются на количество по каждой категории специалистов, а затем умножаются на количество единиц оборудования (ПО) на технологическом объекте.

При отклонении от нормальных условий труда от рабочих условий к нормам времени применяются вышеописанные корректирующие коэффициенты.

При проведении изучения и исследования производственной деятельности и сопутствующей данному процессу сопутствующей и эксплуатационной документации разработана методика формирования норм трудозатрат на техническое обслуживание и ремонт средств КИПиА, которая в последующем была реализована в программном обеспечении и содержит следующие аспекты:

- набор базовых норм, подготовленный на основе открытых источников;
- содержит основные классификационные группы с определением оборудования в зависимости от категорий сложности оборудования;
- предложен подход для расчета базовых норм времени для рационального режима обслуживания и ранее не эксплуатируемого оборудования.

В современных условиях совершенствования элементной базы и технологических платформ происходит постоянное обновление техники и технологий. Кроме того, в связи с различной номенклатурой и производственных средств КИПиА ввиду, как правило, обезличенности в момент приобретения, тем не менее идентичных по конструкции, нормирование всего спектра средств КИПиА является трудоемким и продолжительным процессом, поэтому одним из подходов является применение норм по принципу аналогии и применимости. С целью снижения затрат на разработку и повышения эффективности использования нормативов рационально применять коэффициент применимости, который отражает схожесть конструкций и трудоемкость операций при техническом обслуживании средств КИПиА. В таблице приведены базовые категории технической сложности оборудования КИПиА, характерные для нефтедобывающих предприятий.

В качестве пояснения можно привести следующий пример: чем технически сложнее прибор и выше требования к его метрологическим характеристикам, тем выше категория технической сложности. Каждой единице оборудования присваивается коэффициент технической сложности.

Несмотря на выявление значительного количества оборудования с аналогичными характеристиками, этого недостаточно ввиду наличия как функциональных, так и конструктивных различий. Для оставшихся категорий при разработке нормативов необходимо учесть следующие аспекты:

- требуется провести классификацию по назначению прибора или датчика (расходомеры, измерители различных физических величин, измерители уровня, сигнализаторы, регистраторы и т.п.);
- присвоить выделенным группам категории технической сложности согласно таблице.

Наиболее примитивному оборудованию присваивается категория низшей технической сложности по аналогии и принимается за базис.

Принимаем  $H_{вр}^{база} = H_{вр}^I$ ,  $K_i = 1$ ,  $H_{вр}^{база}$  – норма времени, принятая за базовую, чел./ч;  $H_{вр}^I$  – норма времени, принятая в качестве средней нормы, чел./ч.

Исходя из этого, базисная (первая) категория технической сложности (КТС), определяется по формуле, чел./ч;

$$I_{ср}^i = \sum_{i=1}^N H_{вр\_п}^I / n, \quad (2)$$

$H_{вр\_п}^I$  – норма времени  $n$  прибора или датчика, базисной КТС в рассматриваемой группе, чел./ч;  $n$  – количество приборов или датчиков для базисной КТС (категории технической сложности), шт.

Следующим шагом необходимо для существующих нормативов произвести расчет коэффициентов  $K_2$ ,  $K_3$  для каждой выбранной группы:

$$K_2 = H_{ср}^2 / H_{ср}^1, \quad (3)$$

$$K_3 = H_{ср}^3 / H_{ср}^1, \quad (4)$$

в которых значения  $H_{ср}^2$ ,  $H_{ср}^3$  – это средние нормы времени более высоких уровней технической сложности.

При необходимости добавления нового прибора или датчика для определения нормы используется следующий алгоритм.

Проводится классификация прибора или датчика по функциональному назначению на основе технического описания или паспорта устройства с отнесением к ранее выделенным группам. При отсутствии подходящей создается новая функциональная группа. На основе экспертной оценки данному устройству присваивается КТС. Производится расчет нормы времени на техническое обслуживание прибора или датчика по следующим формулам:

$$H_{вр}^1 = H_{вр}^6, \quad (5)$$

$$H_{вр}^2 = H_{вр}^6 \times K_2, \quad (6)$$

$$H_{вр}^3 = H_{вр}^6 \times K_3, \quad (7)$$

где  $H_{вр}^n$  – нормы времени на техническое обслуживание приборов и датчиков разных категорий сложности, чел./ч.,

Когда в рассматриваемой группе отсутствует базисная норма времени  $H_{вр}^б$ , расчет необходимо производить по формулам (8), (9):

$$H_{вр}^2 = H_{ср}^2, \quad (8)$$

$$H_{вр}^3 = H_{ср}^3, \quad (9)$$

При невозможности применения формул (5)–(9) для нового средства КИПиА применяется метод натурального наблюдения проведения хронометража и составление фотографии рабочей операции или рабочей смены.

Применение разработанной методики и основанного на ней программного обеспечения автоматизированного формирования нормативов трудозатрат обеспечивает информационную поддержку связанных с планированием мероприятий технического обслуживания задач управления [7, 8].

#### Классификация технической сложности оборудования КИПиА

КТС	Характеристики оборудования
К <sub>1</sub>	Датчики физических величин, регулирующие клапаны, и запорная арматура, источники бесперебойного питания, конверторы сигналов, приборы систем обработки информации, в том числе передающие на дальние расстояния устройства, которые характеризуются: – локальным контролем, только измерением параметров и состояния технологического объекта; – одноконтурным регулированием; – примитивным логическим управлением
К <sub>2</sub>	В дополнение функций, характерных для категории К <sub>1</sub> : – ведение трендов, проведение архивирования данных; – вычисление отдельных показателей технологического объекта; – реализация многоуровневого автоматического регулирования на программном уровне; – поддержка открытых протоколов обмена; – наличие встроенных функций конфигурации при помощи сервисного программного обеспечения; – возможность непосредственного измерения технологических параметров, отличающихся методами и способами измерения
К <sub>3</sub>	В дополнение функций, характерных категории для К <sub>1</sub> , К <sub>2</sub> : – возможность мониторинга и анализа состояния технологического процесса по его модели (распознавание кризисных ситуаций, диагностика и прогнозирование аварийных состояний); – возможность подбора режима управления установившимися режимами в статических состояниях или переходными процессами; – возможность управления быстропротекающими процессами в критических условиях или управления с адаптацией (самообучением и изменением алгоритмов и параметров)

#### Описание разработанного и адаптированного программного обеспечения

Практически любое крупное нефтегазодобывающее предприятие имеет распределенную структуру с большим количеством технологических объектов и

площадок, разнородным набором первичных датчиков и средств автоматизации, общее количество которых может превышать 100 тыс. позиций. Поэтому система должна позволять автоматизированно планировать, контролировать на основе внутренних алгоритмов качество работ, а также по заданным критериям определять значение коэффициентов достоверности для проведения расчетов за услуги, оказанные по договору.

Одним из источников для актуализации данных в системе является наличие интеграции промышленных баз данных с геоинформационной системой предприятия (ГИС) в части поддержки актуальной топографической подложки и постоянного обновления объектов инфраструктуры, что зачастую является закрытой информацией предприятия, отсутствует в открытых источниках и картографических сервисах [6]. Функциональная схема информационной системы, а также взаимодействие ее основных элементов изображены на рис. 2.

Обязательным элементом для системы является наличие цифровой идентификации – каждая единица, подлежащая обслуживанию, маркируется цифровым идентификатором, позволяющим аппаратное считывание. Могут быть использованы различные метки, такие как NFC (RFID), QR-коды, Bluetooth-метки. Наличие цифрового идентификатора позволяет проводить работы строго на нужном оборудовании, кроме того, данный идентификатор будет всегда использоваться как уникальный код при проведении заявок и аварийных работ и отслеживании жизненного цикла оборудования.

Персонал проводит работы, применяя мобильные устройства (смартфоны с NFC-считыванием) со специально разработанным нативным Android-приложением. Каждая работа строго регламентирована чек-листом, который определяет, какие операции и в каком порядке надо проводить для достижения надлежащего качества работы. Чек-лист формируется на основе типовой технической карты с добавлением операций по истории эксплуатации оборудования.

Фиксируются время начала / окончания каждой операции, чтение цифрового идентификатора, позиция геолокации, фотофиксация, внесение комментариев и т.п.

Система использует специально разработанную промышленную базу данных регистрации событий («БДРС») с технологией блокчейн. Использование преимущества блокчейна позволяет использовать систему в бизнес-процессах с несколькими сторонами-участниками и обеспечивает арбитражность процессов (каждая из сторон имеет возможность независимого контроля зафиксированной информации). Данные сохраняются без возможности дальнейшего редактирования и удаления. Все события связаны между собой цепочкой hash-сумм, и копии «БДРС» формируются у всех заинтересованных сторон (возможно формирование арбитражной копии на независимом источнике хранения) [14, 15].

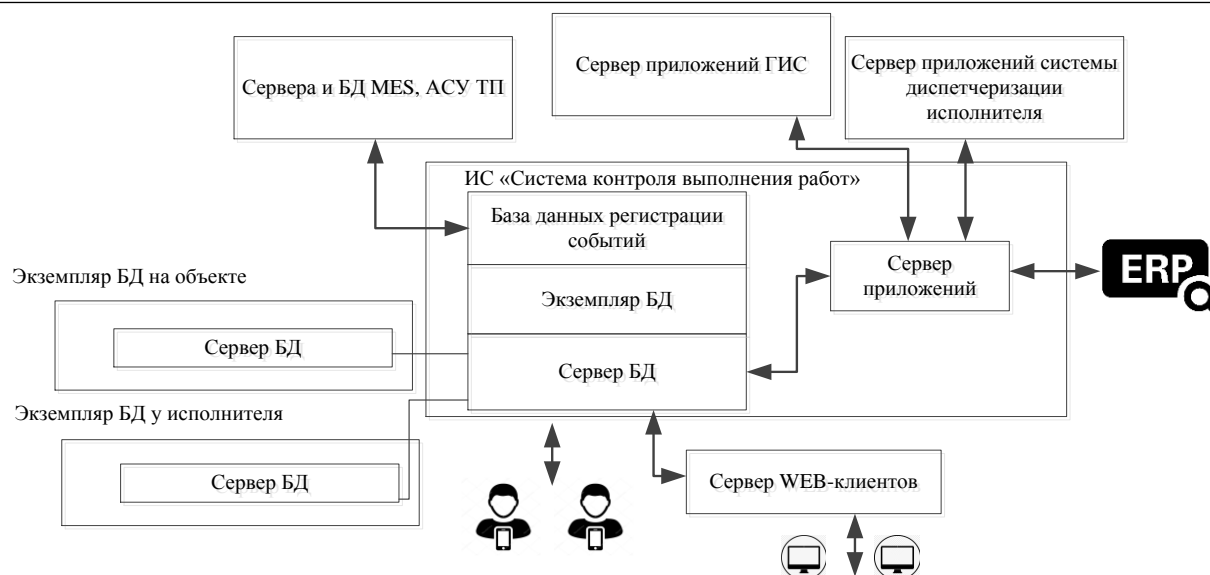


Рис. 2. Функциональная схема информационной системы

Первоначально в системе создаются графики периодического технического обслуживания на основе нормативных сроков и видов технического обслуживания (ТО) с учетом сроков предыдущих работ, назначение нарядов на работы, проведение инспекционного контроля, а также результаты выполнения и оценки осуществляются через формирование связанных экранных форм. Доступ к календарному плану позволяет лицам, принимающим решения в ТОиР, получить информацию о количестве выполненных и невыполненных работ (по назначенным срокам), а также при необходимости изменять сроки проведения работ.

Механизм автоматических алгоритмов проверки (контрольных процедур) запускается сразу, после завершения каждой работы и оценивает достоверность ее выполнения по полученным сообщениям. Проверяются все существенные моменты (определяемые экспертами пользователя на момент адаптации системы), например: считывание метки прибора, геолокация, наличие фотофиксации, длительность выполнения отдельных операций, события в SCADA-системах, информация, накопленная в SMART-приборах.

По результатам работы контрольных процедур отбираются достоверные работы для формирования акта приема-сдачи работ, а также применяется коэффициент на оценку качества, в дальнейшем эти данные используются в системе ERP, для осуществления операций по учету и принятию работ и услуг, а в случае дефектов формируется заявка на закупку необходимых комплектующих.

#### Состав и элементы системы

**Сервер базы данных регистрации событий.** Обеспечивает ведение экземпляра «БДРС», распределенное хранение, обслуживание запросов клиентов (транспортный уровень TCP/IP). Реализованы специализированные команды для приема сообщений о событиях и выдачу данных по запросам (включая отработку выбора по условию). Поддер-

живает обмен сообщениями в формате .xml, а также многопоточность. Обеспечивает сохранение событий как цепочку записей блокчейн с расчетом hash-сумм по алгоритму SHA-256. Hash-функция – функция, осуществляющая преобразование массива входных данных произвольной длины в (выходную) битовую строку установленной длины, выполняемое определенным алгоритмом [13].

**Мобильное приложение (android).** Выполняет получение от сервера «БДРС» распределенных для данного пользователя (предварительная авторизация) работ с чек-листами. Ведет процесс выполнения операций чек-листа с фиксированием времени начала / окончания, чтением цифрового идентификатора (NFC-меток), фотофиксацией, вводом комментариев, геолокацией по датчикам (GPS, GLONASS). Обработывается тип операций «опрос» (с заранее предопределенными вариантами ответа, включая инструктаж-допуск к дальнейшей работе только при верных ответах и дефект-выбор, при котором фиксируется некондиционное состояние оборудования и формируется сообщение о дефекте для дальнейшего проведения ремонта). Отправляет на сервер зафиксированные события как в on-line, так и в off-line режимах (при отсутствии связи). Обеспечивает «ориентирование в поле» – идентификацию оборудования чтением метки и поиском наименования оборудования и его характеристик в «БДРС».

**Веб-сервис доступа клиентов.** Обеспечивает пользовательский интерфейс для настройки системы (доступ администратора) и оперирования данными: просмотр в структурированном виде оборудования, технических мест, работ и связанных с ними событий, результатов оценки смарт-контрактами, создание работ.

**Сервер приложений.** Отдельное приложение на серверной части системы, которое обеспечивает передачу / прием данных из сторонних систем, отправку отчетов по электронной почте, получение данных о погоде в местах расположения объектов,

выполнение автоматических алгоритмов (смарт-контрактов).

### Технический базис

Сервер блокчейн базы данных, мобильное приложение, back-end web-доступа разрабатываются в RAD Studio 10.3 Rio. За счет высокоэффективного компилятора и поддержки кроссплатформенности RAD Studio обеспечивает возможность разработки с едиными исходными текстами для различных операционных систем (Windows, Android, iOS, MacOS) и при компиляции получать нативные для данных ОС приложения.

В качестве фреймворка для front-end при веб-доступе использован UniGUI. Данный фреймворк хорошо интегрирован с RAD Studio, что позволяет проводить разработку web-доступа в одной среде разработки без использования дополнительных средств, что повышает продуктивность.

### Заключение

Основным эффектом от внедрения системы и применения предложенной методики является снижение простоев и аварийности основного оборудования за счёт раннего выявления потенциальных отказов и проведения гарантированного технического обслуживания оборудования КИПиА. Снижение расходов на ТОиР достигается за счёт оптимизации бизнес-процессов на основе достоверной информации о факте выполнения работ, об их качестве (соответствии регламенту) и затраченных трудовых ресурсах. Разработана методика для определения трудозатрат и обоснования численности необходимого для организации работ персонала, а также при вводе нового, ранее не использованного оборудования.

В настоящее время в АО «Самаранефтегаз» проводится испытание и дальнейшая адаптация, подбор наилучшего сценария функционирования системы, по результатам работы которой можно будет сделать окончательные выводы о полученном экономическом эффекте и возможности тиражирования данного подхода на другие бизнес-процессы предприятия. Уже сейчас очевидно, что предложенные подходы актуальны и востребованы в процессах перехода к электронному обмену документами, независимой оценки качества работ, а также способствуют оперативному взаимодействию как внутри предприятия, так и при ведомственном и надзорном контроле. Кратно снижаются затраты времени на документирование, снижается зависимость от конкретных персоналий, путем доступного описания работ и быстрого обучения персонала.

По результатам накопленной статистики появился инструмент, позволяющий гибко изменять нормативы обслуживания с учетом анализа накопленной информации о фактических затратах, прогнозировать отказы оборудования, а также осуществлять расчеты реальной нагрузочной выработки оборудования и его реального ресурса.

### Литература

1. Черняев Д.С. Роль цифровых технологий в разведке, добыче и транспортировке нефтегазовых продуктов /

Д.С. Черняев, Д.Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т.7, № 11.

2. Воробьев А.Е. Цифровизация нефтяной промышленности: «интеллектуальный» нефтепромисел / А.Е. Воробьев, Х. Тчаро, К.А. Воробьев // Вестник Евразийской науки. – Режим доступа: <https://esj.today/PDF/77NZVN318.pdf>, свободный (дата обращения: 01.10.2020)

3. Еремин Н.А. Настоящее и будущее интеллектуальных месторождений / Н.А. Еремин, А.Н. Дмитриевский, Л.И. Тихомиров // Нефть. Газ. Новации. – 2015. – № 12. – С. 44–49.

4. Типовые нормы времени на монтаж контрольно-измерительных приборов и средств автоматики в нефтяной промышленности (утв. приказом Миннефтепрома СССР от 29.09.1987 № 692). – Режим доступа: [http://www.libussr.ru/doc\\_ussr/usr\\_14308.htm](http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_14308.htm), свободный (дата обращения: 09.10.2020).

5. Кошкин А.И. Разработка информационной системы учета технического обслуживания систем КИПиА, АСУТП и метрологии / А.И. Кошкин, Е.А. Попов // Информационные технологии в управлении и экономике. – 2017. – Т. 2, вып.7. – С. 45–57.

6. Чесалин Д.С. Выбор автоматизированной системы управления предприятиями нефтегазового комплекса // Бизнес в законе. – 2010. – № 5. – С. 306–307.

7. Silivant D. Reliability centered maintenance cost modeling: Lost opportunity cost // Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). – Palm Harbor, USA, 2015. – article № 7105111.

8. Гаврилов А.А. Дополнительные возможности в организации технического обслуживания и ремонта оборудования на нефтеперерабатывающем заводе / А.А. Гаврилов, А.А. Минаков // Изв. Самар. научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11, № 5(2). – С. 266–271.

9. Mainkar M.S. Maintenance Management System Effective Tool to Progress and Reach Total Productive Maintenance & Six Sigma Business Development Strategies/ M.S. Mainkar, R.K. Rathod // International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Application (ICIMSA). – Seoul, South Korea, 2017. – Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7985593> (дата обращения: 09.10.2020).

10. Rastegari A. Maintenance decision making, supported by computerized maintenance management system / A. Rastegari, M. Mobin // Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). – Tucson, USA, 2016. – Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=74480867985593> (дата обращения: 09.10.2020).

11. Любченко А.А. Статистическое моделирование качественных показателей эксплуатации и технического обслуживания средств железнодорожной электросвязи в среде AnyLogic / А.А. Любченко, Е.Ю. Копытов, А.А. Богданов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 98–108.

12. Жданов В.В. Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП / В.В. Жданов, Д.К. Авдеев, А.Н. Тихменев // Надежность. – 2011. – № 3 (38). – С. 53–60.

13. Хеш-функция [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Хеш-функция>, свободный (дата обращения: 03.09.2020).

14. Блокчейн для «Приразломной». «Газпром нефть» применила технологию блокчейн в логистике // Отраслевой журнал «Сибирская нефть». – 2018. – № 3/150. – С. 52–53. – Режим доступа: <http://www.gazpromneft.ru/files/journal/SN150.pdf>, свободный (дата обращения: 02.10.2020).

15. Как Blockchain может применяться в нефтегазовой отрасли? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://miningbitcoinguide.com/>, свободный (дата обращения: 03.11.2020).

### Мехтiev Эльчин Мехтievич

Аспирант каф. механизации, автоматизации и энергообеспечения строительства Самарского государственного технического университета Нач. управления ИТ АО «Самаранефтегаз» Волжский пр-т, 50, г. Самара, Россия, 443071  
Тел.: +7-987-986-20-05  
Эл. почта: MekhtievEIM@samng.rosneft.ru

Mekhtiev E.M.

### Modern approaches in creating systems to manage the maintenance of control and measuring devices and automation at oil and gas production enterprises

The article presents the issues related to the architecture design of the control systems for maintenance and automation of measurement equipment, that includes various subsystems and elements as components for the organization of business processes for the maintenance of large industrial enterprises. Those systems take into account the current realities when creating complex digital models and the place of such systems in the information space. The functional requirements that the control system must meet during implementation are defined, and the approaches to the development and updating of service standards are proposed. Taking into account the general trend that consists in the increasing amount of information collected and processed from the field level, a variety of technological objects, as well as the increasing autonomy and complexity of control systems, the task of organizing timely maintenance and repair, and processing of the results using traditional methods, is becoming unsolvable. The ensuring of an independent assessment of the quality and timeliness of work, the impossibility of misrepresenting information about the service is becoming the key point to build transparent relationships in service organization. This article describes the methods and algorithms of business processes necessary to design and implement such systems. Based on the described methodology, an information system was developed, and an assessment of the economic effect was carried out using the results of its implementation and adaptation.

**Keywords:** maintenance management system, MRO, maintenance standards, business processes.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-55-61

### References

1. Chernyaev D.S., Namiot D.E. The role of digital technologies in the development, production and transportation of oil and gas products. *International Journal of Open Information Technologies* ISSN –2019, vol. 7, no. 11.
2. Vorobiev A.E., Tcharo H., Vorobiev K.A. Digitalization of the oil industry: «intellectual» oil industry-villages. *Bulletin of the Eurasian Science*. Available at: <https://esj.today/PDF/77NZVN318.pdf> (Accessed: October 10, 2020).
3. Eremin N.A., Dmitrievsky A.N., Tikhomirov L.I. *Present and future of intellectual deposits*. Oil. Gas. Innovations, 2015, no. 12, pp. 44–49.

4. Standard time standards for the installation of control and measuring devices and automation equipment in the oil industry (approved by the Order of the Ministry of Oil Industry of the USSR of 29.09.1987 № 692). Available at: [http://www.lbussr.ru/doc\\_ussr-/usr\\_14308.htm](http://www.lbussr.ru/doc_ussr-/usr_14308.htm) (Accessed: October 09, 2020).

5. Koshkin A.I., Popov E.A. Development of an information system for accounting for technical maintenance of instrumentation and control systems, automated control systems and metrology. *Information Technologies in Management and Economics*, 2017, vol. 2, Is. 7, pp. 45–57.

6. Chesalin D.S. The choice of an automated system for managing oil and gas complex enterprises. *Business in Law*, 2010, no. 5, pp. 306–307.

7. Silivant D. Reliability centered maintenance cost modeling: Lost opportunity cost *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. Palm Harbor, USA, 2015, article № 7105111.

8. Gavrilov A.A., Minakov A.A. Additional opportunities in the organization of maintenance and repair of equipment at the oil refinery, *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 11, no. 5(2), pp. 266–271.

9. Mainkar M.S., Rathod R.K. Maintenance Management System Effective Tool to Progress and Reach Total Productive Maintenance & Six Sigma Business development Strategies. *International Conference on Industrial Engineering, management Science and Application (ICIMSA)*. Seoul, South Korea, 2017. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7985593> (Accessed: October 9, 2020).

10. Rastegari A., Mobin M. Maintenance decision making, supported by computerized maintenance management system. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. Tucson, USA, 2016. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7448086> 7985593 (Accessed: October 9, 2020).

11. Lyubchenko A.A., Kopytov E.Yu., Bogdanov A.A. Statistical modelling of the quality indicators of operation and maintenance funds railway telecommunications environment AnyLogic, *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 98–108.

12. Zhdanov V.V., Avdeev D.K., Tikhmenev A.N. Problems of calculation of indicators of sufficiency and inventory optimization systems *ZIP Reliability*, 2011, no. 3 (38), pp. 53–60.

13. Hash-function [Electronic resource]: Wikipedia. Free encyclopedia. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Хеш-функция> (Accessed: September 03, 2020).

14. Blockchain for Prirazlomnaya. Gazprom Neft uses blockchain technology in logistics// Industry magazine «Siberian Oil», 2018, no. 3/150, pp. 52–53, Available at: <http://www.gazpromneft.ru/files/journal/SN150.pdf> (Accessed: October 3, 2020).

15. How can Blockchain be applied in the oil and gas industry? (Electronic resource). Available at: <https://miningbitcoinguide.com/> (Accessed: November 3, 2020).

### Eltchin M. Mekhtiev

Postgraduate student, Department Mechanization, Automation and Energy Supply of Construction, Samara State Technical University  
Head of IT Department of Samaraneftgaz JSC  
50, Volzhsky pr., Samara, Russia, 443071  
Phone: +7-987-986-20-05  
Email: MekhtievEIM@samng.rosneft.ru

УДК 004.932:620.19

**М.Ю. Катаев, Р.К. Карпов, К.А. Ламинский**

## Программная система обнаружения дефектов кирпичей на основе методов компьютерного зрения

Для промышленных предприятий важным направлением деятельности является применение неразрушающего контроля в оценке качества продукции. Одними из наиболее развиваемых подходов на практике являются оптические методы (видимая или инфракрасная области спектра) и связанные с ними алгоритмические подходы компьютерного зрения, так как на большом количестве производств используется ручной метод выявления дефектов, который является трудозатратным, интенсивным, медленным и субъективным. В статье представлено описание автоматизированной системы оптического контроля по обнаружению дефектов кирпичей на транспортной ленте, в процессе производства. Основой оптического контроля являются RGB-изображения цифровых камер. Показан алгоритм обработки и приведены полученные результаты.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, анализ изображения, дефекты кирпичей, контроль качества.  
**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-62-67

В России все большее внимание обращают на разработку экономически эффективных технологических процессов с использованием новейших информационных и телекоммуникационных технологий. Важным в таких технологиях является направление, связанное с автоматизацией оценки качества выпускаемой продукции. Техника, основанная на видении, в которой в качестве датчиков используются оптические устройства получения изображений, в настоящее время становится все более используемой в технологических процессах для целей мониторинга [1]. В настоящее время визуальный контроль применяется в задачах мониторинга коррозии [2], выявления сколов [3], трещин [4], деформаций [5] и др. Несмотря на популярность, у техники, основанной на видении (измерении изображений), есть ограничения, которые пока ограничивают практическое использование. К таким ограничениям относятся физические характеристики, связанные с освещенностью, прозрачностью атмосферы, конструктивными особенностями технологического процесса, а также программно-математического плана, так как невозможно разработать алгоритм, способный в себе содержать возможные возникающие ситуации измерения.

Одним из важнейших для человека является производство кирпичей, так как это связано с возможностью строить дома, промышленные объекты и т.д. Поэтому разработка автоматизированных систем визуального контроля для определения качества кирпича является важной и актуальной. Данная статья показывает алгоритм решения задачи обработки изображений RGB-цифровой камеры для контроля дефектов кирпичей, двигающихся по ленте конвейера. Приводятся подходы компьютерного зрения для обработки изображений, которые позволяют решать задачи выделения каждого кирпича из группы и анализа их поверхности индивидуально. Под дефектами понимается наличие на одной из сторон кирпича трещин или сколов, изменения цвета, а также изменения площади и периметра кирпича от некоторого шаблона (формируется по ГОСТу [6]).

### Описание проблемы

Перед продажей кирпичей на каждом производстве проводится анализ соответствия отдельной группы кирпичей определенным требованиям к качеству по требованиям ГОСТ и внутренних стандартов [6, 7]. Чаще всего эту работу выполняют специально обученные инспекторы, которые выбирают для анализа из партии некоторое количество кирпичей и оценивают их по определенным требованиям. Этот подход позволяет работать не с отдельным кирпичом, а с партиями, которая либо пускается в продажу или каким-то образом отделяется от других партий. Так как в отобранной партии может быть всего некоторая часть несоответствующей ГОСТу, бракуется вся партия, и это имеет существенное экономическое значение.

Кроме того, инспекторы подвержены влиянию человеческого фактора и могут не заметить или выполнять непоследовательно операции экспертизы и потерять много времени на проверке больших партий кирпичей. Этот аспект тоже несет за собой не только временные, но и экономические проблемы. В этом плане применение методов компьютерного зрения может улучшить результаты мониторинга качества по отношению к визуальной, интенсивной работе человека-инспектора. Кроме того, человек осматривает лишь только часть кирпичей из партии, а автоматизированная система осматривает все кирпичи.

Отметим, что к настоящему времени выполнены различные исследования, связанные с применением компьютерного зрения, и они широко представлены в литературе. Одним из новых направлений мониторинга, набирающим обороты, является разработка автоматизированных инспекционных линий для машинной сортировки картофеля по размеру, весу, диаметру и цвету [8], контроля свежих и переработанных фруктов [9] или качества пищевых продуктов [10]. В этом плане применение компьютерного зрения позволяет предоставить существенно больший объем точной информации о характеристиках продуктов, что снижает затраты на отбраковку и

гарантирует поддержание стандартов качества в реальном масштабе времени.

Качество кирпича определяется несколькими параметрами, определенными в нормативных документах: 1) отклонением от размеров, мм, не более по длине ( $\pm 4$ ), по ширине ( $\pm 3$ ), по толщине ( $\pm 3$ ); 2) неперпендикулярностью граней и ребер кирпича, отнесенной к длине 120 мм, не более ( $\pm 2$ ); 3) неперпендикулярностью лицевых поверхностей и ребер, мм, не более: по ложку ( $\pm 3$ ) и по тычку ( $\pm 2$ ) и др. На лицевой поверхности кирпича не допускаются сколы и трещины, а также изменения цвета от эталона (кирпич, на котором отсутствуют дефекты).

**Постановка задачи**

Аппаратная система анализа качества поверхности (определения числа и типа дефектов) представлена на рис. 1, где показаны лента конвейера с блоком кирпичей на ней, система освещения и цифровая RGB-камера.

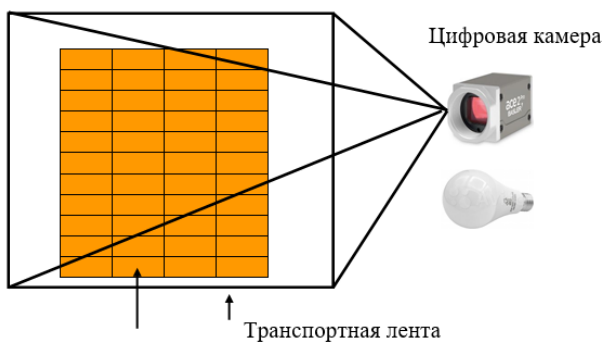


Рис. 1. Схема получения изображений цифровой камерой блока кирпичей на ленте конвейера

Блок имеет  $(N \cdot M)$  кирпичей, каждый из которых имеет размеры  $(L_w \cdot L_h)$  образует пространство размером  $(LW \cdot LH) = (L_w \cdot N + (N - 1) \cdot d) \cdot (L_h \cdot M + (M - 1) \cdot d)$ , где  $d$  – среднее расстояние зазора между кирпичами. В поле зрения цифровой камеры  $(W \cdot H)$  попадает лента конвейера с находящимся на ней блоком кирпичей. Имеется производственное или специальное освещение места съемки движения блока кирпичей (например,  $N = 4$  и  $M = 10$  кирпичей) на конвейере до места сборки поддона. Задачей является получение RGB-изображения блока кирпичей, оценка параметров каждого кирпича в соответствии с ГОСТом и подготовка отчета, содержащего информацию о найденных дефектах отдельных кирпичей.

Для решения поставленной задачи предлагается структура программы, которая показана на рис. 2.



Рис. 2. Структура программы решения задачи оценки качества кирпичей

На рис. 2 показана структура программы решения задачи оценки качества кирпичей, состоящая из блоков: 1) получения изображений; 2) предварительной обработки; 3) обработки; 4) анализа и 5) формирования протокола и записи информации в базу данных в согласовании с ранее записанным изображением.

**Решение задачи**

Цифровая обработка изображений [11, 12], являющаяся элементом компьютерного зрения, используется для подготовки и извлечения информации из изображения. Для тематики статьи, наиболее важными операциями с цифровыми изображениями являются выявление и классификация различных видов дефектов кирпича. Обнаружение дефектов на поступающих от цифровой камеры изображениях (см. рис. 2) связано с набором методов, которые связаны с тремя уровнями (на низком уровне – предварительная обработка, среднем – обработка и высоким – анализ). На низком уровне применяются методы, которые работают с поступающими, еще не обработанными, возможно, зашумленными изображениями. Зашумление возможно от многих факторов, которые возникают на производстве, поэтому задачей этого уровня является преобразование изображений к одному, некоторому стандартному виду (наличие шумов, освещенность и т.д.). На среднем уровне используются методы выделения каждого кирпича на изображении в отдельности. Для этого решаются задачи цветовой сегментации и поиска краев кирпичей. На высшем уровне находятся методы, которые предназначены для извлечения информации о дефектах и записи информации о каждом кирпиче в протокол.

По многим причинам, представленным выше, невозможно отрицать высокое значение автоматизации процесса обнаружения и классификации дефектов кирпичей. Целью нашего исследования, представленного в статье, является разработка эффективного по времени и точности метода обнаружения и классификации дефектов. Для этого необходимо рассмотреть техническую сторону процессов получения изображения.

Анализируемый блок кирпичей занимает площадь около одного метра квадратного (размер одного кирпича составляет  $25 \cdot 6,5 \text{ см}^2$ , тогда сторона блока, например, состоящая из 4 кирпичей, расположенных по длинной стороне, что составляет  $25 \cdot 4 + 3 \cdot 1 = 103 \text{ см}$ , а другая сторона для 10 кирпичей и 1 см (среднее расстояние зазора), дает  $6,5 \cdot 10 + 9 \cdot 1 = 74 \text{ см}$ ). Учитывая, что кирпичи не всегда стоят параллельно друг другу, размеры блока могут увеличиваться на несколько десятков сантиметров.

При работе с одной цифровой камерой необходимо расположить цифровую камеру таким образом, чтобы при определенных характеристиках объектива был виден весь блок кирпичей (рис. 3).

По законам оптики поле зрения объектива (углы  $FOV_x$ ,  $FOV_y$ , от Field of View) рассчитывается по формуле



$$FOV_x = 2 \cdot \arctg(dx/(2 \cdot f)),$$

$$FOV_y = 2 \cdot \arctg(dy/(2 \cdot f)),$$

здесь  $f$  – фокусное расстояние;  $D$  – расстояние цифровой камеры от исследуемой поверхности;  $dx, dy$  – размер сторон RGB-матрицы цифровой камеры;  $S_x, S_y$  – размер сторон исследуемой прямоугольной поверхности, которая включает в себя блок кирпичей и некоторое окружающее его пространство.

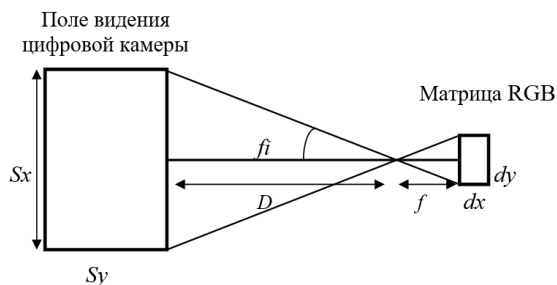


Рис. 3. Определение поля зрения цифровой камеры

Учитывая рассчитанные (или данные в техническом описании объектива цифровой камеры) значения углов поля зрения, можно рассчитать размер стороны изображения с учетом расстояния  $D$  цифровой камеры от исследуемой поверхности:

$$S_x = 2 \cdot D \cdot \operatorname{tg}(FOV_x/2),$$

$$S_y = 2 \cdot D \cdot \operatorname{tg}(FOV_y/2).$$

Зная число пикселей  $[Px]$  матрицы по сторонам изображения ( $N \cdot M$ ), можно рассчитать пиксельное разрешение матрицы, необходимое для оценки возможности обнаруживать типичные дефекты кирпичей:

$$R_x = S_x/N,$$

$$R_y = S_y/M.$$

Учитывая вышеприведенные формулы, можно оценить какое пиксельное разрешение (сколько миллиметров находится в пикселе) может быть достигнуто при определенном расстоянии  $D$  и стороной  $S_x$  (углами поля зрения). Таким образом, можно подобрать соответствующий вариант камеры, необходимый для достижения того или иного пиксельного разрешения, а значит, и обнаружения определенных дефектов (например, царапин или трещин).

Рассмотрим цветовую палитру кирпича (рис. 4). Однородный красный кирпич имеет распределение яркости по каналам  $I(x, y) = \{R(x, y), G(x, y), B(x, y)\}$  (из  $(0 \div 255)$ ): красная составляющая ( $155 \div 205$ ) и максимум в районе 195, зеленая составляющая ( $85 \div 130$ ) и максимум в районе 120, синяя составляющая ( $50 \div 95$ ) и максимум в районе 82. На рис. 4 приведены гистограммы распределения яркости для трех кирпичей, два из которых, номер 1 и номер 2, относятся к категории «норма» и один, номер 3 – к категории «брак». Хорошо видно, что распределение яркости достаточно хорошо позволяет выделить кирпич, на поверхности которого присутствует дефект. Конечно же, изменение гистограммы будет тем более заметным, чем больше по размеру будет дефект [13]. Присутствующие трещины на красном кирпиче изменяют распределение яркости: максимум красной составляющей 185, для зеленой составляющей трещины 110 и для синей составляющей

70. Эти отличия дают основание для выделения трещины по цветовому признаку с высокой надежностью.

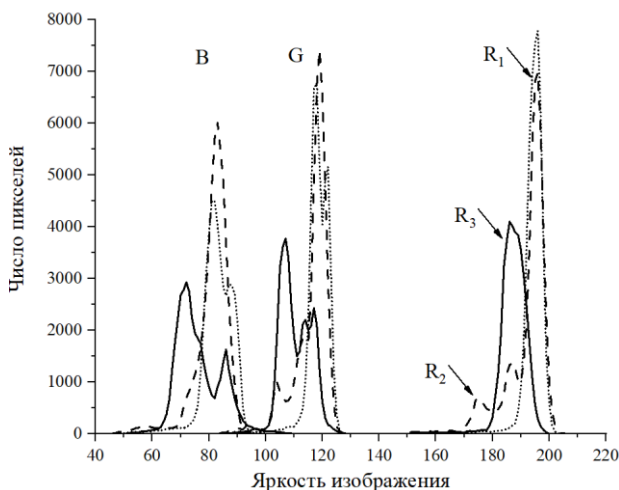


Рис. 4. Гистограммы распределения яркости RGB-каналов на изображении кирпича

Другой аспект, который важен при определении дефектов, связан с тем, что трещина на кирпиче детектируется в случае, если она занимает не менее 2–3 пикселей (рис. 5), и эта трещина выделяется на основе цветового отличия (см. рис. 4). Три пикселя гарантируют, что при наклонной трещине, хотя бы один пиксель будет принадлежать ей целиком. Параллельно с этим изучение цветового пространства поверхности кирпича позволяет выделить средний тон кирпича, чтобы использовать этот показатель для сравнения партий кирпича не только по качеству, но и цветовой палитре. Так как сколы имеют достаточно большую площадь в пикселях, они детектируются по изменению средней палитры RGB, которая отличается от цветовой палитры кирпича без дефектов.



Рис. 5. Изображения кирпичей с различного рода дефектами

При нахождении дефектов освещение блока кирпичей должно быть равномерным, чтобы цветовая палитра каждого кирпича не отличалась за счет освещенности. Например, если освещение неравномерно, то один ряд кирпичей будет светлее, а другой темнее, что скажется на цветовой палитре кирпичей.

Для выделения кирпичей на фоне ленты конвейера нами применяется кластеризация методом  $k$ -средних [14]. Идея метода  $k$ -средних состоит в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек выборки от заранее определенных центров кластеров на основе информации о центрах кластеров кирпичей с дефектами и без них (см. рис. 4). Алгоритм основывается на итерационной процедуре из нескольких шагов: 1) выбирается число кластеров  $K$  (в нашем случае  $k = 3$  – фон, дефект и цвет кирпича без дефектов (см. рис. 5); 2) для каждого пикселя изображения  $(i, j)$  определяется ближайшее расстояние в метрике Евклида от центра каждого кластера  $\{(R(i, j) - Rc(k))^2 + (G(i, j) - Gc(k))^2 + (B(i, j) - Bc(k))^2\}$ ; 3) ближайшее расстояние позволяет определить наименьшее расстояние между конкретным пикселем и всеми выбранными центрами, что позволяет подстроить координаты пикселей центров на основе среднеарифметического; 4) далее идет процедура распределения всех пикселей изображения по уточненным кластерам при помощи сравнения расстояния от каждого пикселя до центров. Пиксель с координатами  $(i, j)$  помечается принадлежащим кластеру, центр которого расположен ближе, чем остальные центры кластеров; 5) такая процедура итерационно продолжается до тех пор, пока все пиксели не будут распределены по кластерам. Выходом работы алгоритма является новое изображение, показанное на рис. 5.

Следующим шагом является поиск прямоугольников на полученном изображении и поворот его до параллельности оси абсцисс. Нами под контуром понимается совокупность точек границы объекта на изображении, которые отличаются от фона в виде перепада величин яркости. Отметим, что контур содержит информацию, необходимую для понимания формы объекта (в нашем случае прямоугольник). В этом плане задача выделения всех кирпичей на изображении связана с поиском контуров каждого кирпича. Так как задача чаще всего решается на основе выявления пикселей изображения, в которых яркость значительно меняется, эти пиксели тем или иным методом соединяются и образуют контур объекта. Этому процессу могут мешать различные изменения яркости за счет разных объектов на изображении [15], неравномерности освещения, поворота и наклона кирпича относительно цифровой камеры и др.

В нашем случае поиск контура кирпичей находится из следующей процедуры: 1) выбираем пиксель на изображении (см. рис. 5) с координатами  $(1,1)$ ; 2) проверяем, какому кластеру ( $k = 3$  – фон) принадлежит данный пиксель, и если не принадлежит  $k = 1$  (белый) или  $k = 2$  (серый), то смещаемся по строке на один пиксель; 3) повторяем п. 2 до тех пор, смещаясь по столбцам и строкам, пока не будут найдены кластеры  $k = 1$  или  $k = 2$ , считаем, что этот пиксель принадлежит прямоугольнику (кирпичу) и помечаем координаты этого пикселя в матрице; 4) для найденного в п. 3 пикселя увеличиваем раз-

мер области на один пиксель в сторону движения, и если следующий пиксель снова принадлежит кластерам  $k = 1$  или  $k = 2$ , то повторяем п. 4; 6) если следующий пиксель принадлежит  $k = 3$ , тогда двигаемся далее по строке и при необходимости сдвигаемся на новую строку. Таким образом, после прохода всех пикселей матрицы имеем разметку, которая четко выделяет координаты прямоугольников (кирпичей) на изображении.

Для поиска углов каждого прямоугольника нами применяется детектор Моравеца [16], который хорошо подходит под нашу задачу. Данный алгоритм основан на расчете яркости квадратной области (блока) на изображении и оценке изменения яркости при смещении блока по алгоритму:

1) для каждого направления смещения в окне  $(3 \cdot 3)$ :

$$(u, v) \rightarrow \{(1,0), (1,1), (0,1), (-1,1), (-1,0), (-1,-1), (1,0), (0,-1), (1,-1)\};$$

2) рассчитывается изменение яркости для окна размером  $(a, b)$ :

$$V(x, y, u, v) = \sum \{I(x+u+a, y+u+b) - I(x+a, y+b)\} / 2;$$

3) определяется вероятность определения угла через вычисление:

$$C(x, y) = \min \{V(x, y, u, v)\}.$$

На этапе нахождения угла по матрице  $C(x, y)$  определяются координаты пикселей, которые соответствуют минимальному изменению яркости через их отбраковку по определенному, заранее вычисленному пороговому значению. В итоге находятся углы каждого кирпича  $g_1$  с координатами  $(x_1, y_1)$ ,  $g_2 \rightarrow (x_2, y_2)$ ,  $g_3 \rightarrow (x_3, y_4)$ ,  $g_4 \rightarrow (x_4, y_4)$  и соответственно стороны  $(c_1, c_2)$  – длинные,  $(c_3, c_4)$  – короткие, которые позволяют оценить периметр  $P$ , площадь  $S$ , соотношения сторон между собой (например,  $Z_1 = c_1/c_2$ ,  $Z_2 = c_3/c_4$ ). Площадь кирпича  $S$  может быть найдена с произвольным расположением на плоскости изображения в порядке обхода по формуле

$$S = 0,5 \cdot |(x_1 - x_2) \cdot (y_1 + y_2) + (x_2 - x_3) \cdot (y_2 + y_3) + (x_3 - x_4) \cdot (y_3 + y_4) + (x_4 - x_1) \cdot (y_4 + y_1)|.$$

Также можно вычислить диагонали прямоугольника  $D_1^2 = (c_1^2 + c_3^2)$  и  $D_2^2 = (c_2^2 + c_4^2)$  и их соотношение  $D_{12} = D_1/D_2$ .

После того, как положение каждого кирпича на изображении (см. рис. 5) известно, происходит подсчет площади всего кирпича, а также число пикселей, которые занимают трещины, сколы и мелкие артефакты. Эта процедура выполняется простым методом деления площади кирпича на блоки  $(3 \cdot 3)$  пикселя и подсчета типов дефектов  $k = 1$  и/или  $k = 2$ . Таким образом, вся найденная числовая информация о цветовых площадных характеристиках дефектов заносится в протокол вместе с изображением каждого кирпича в отдельности в формате Json. Такая структура хранения информации позволяет легко проверить любой результат обработки, а также выполнить аналитические исследования по времени, типу дефектов и т.д., что необходимо для поддержания высокого качества производства.

### Заключение

Разработаны структура и принципы функционирования программной системы локализации дефектов поверхности по изображениям ленты конвейера, на котором находится блок кирпичей перед укладкой их в поддон. Представлена методическая и алгоритмическая реализация предлагаемых методов локализации дефектов. Проведена обработка реальных изображений методами компьютерного зрения для решения задачи обнаружения и локализации каждого кирпича на изображении в отдельности и поиска дефектов. Результаты обработки записываются в протокол, который является основой для аналитических исследований при оценке качества производимой продукции.

### Литература

1. Ананьев А.И. Керамический кирпич и его место в строительстве современных зданий / А.И. Ананьев, О.И. Лобов // Проектирование и строительство в Сибири. – 2013. – № 5. – С. 28–31.
2. Гурьев В.В. Современная нормативная база по мониторингу технического состояния зданий и сооружений / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев // Промышленное и городское строительство. – 2006. – № 4. – С. 24–25.
3. Кудря А.В. Некоторые практические соображения, связанные с компьютерными процедурами обработки изображений в материаловедении / А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, В.Ю. Пережогин // Вектор науки ТГУ. – 2019. – № 4 (50). – С. 35–44.
4. Жизняков А.Л. Использование локальных признаков самоподобия цифровых изображений для решения задач дефектоскопии / А.Л. Жизняков, Д.Г. Привезенцев // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 43–47.
5. Machine learning algorithms application to road defects classification / T.H. Nguyen, T.L. Nguyen, D.N. Sidorov, A.I. Dreglea // Intelligent Decision Technologies. – 2018. – Vol. 12. – P. 59–66.
6. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. – 2017. – № 10. – С. 34–57.
7. ГОСТ 530–2012. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. – М.: ВНИИСТРОМ «Научный центр керамики», 2013. – 49 с.
8. Миронов Б.М. Сегментация изображений кластерным методом и алгоритмом случайных скачков: сравнительный анализ / Б.М. Миронов, А.Н. Малов // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 132–137.
9. Development of a computer vision system to measure the color of potato chips / F. Pedreschi, J. Leon, D. Mery, P. Moyano // Food Research International. – 2006. – Vol. 39. – P. 1092–1098.
10. Raghavendra A. A survey on internal defect detection in fruits by non-intrusive methods / A. Raghavendra, M. Rao // Int. J. Latest Trends Eng. Technol. – 2016. – Vol. 6(3). – P. 343–348.
11. Kim M., Chen Y., Mehl P. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety // Transactions of the ASAE, St. Joseph. – 2001. – Vol. 44, № 3. – P. 721–729.
12. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
13. Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход / Ж. Понс, Д. Форсайт. – М.: ИД Вильямс, 2004. – 465 с.
14. Катаев М.Ю. Методика распознавания растительности на основе цветового и текстурного анализа RGB изображений / М.Ю. Катаев, М.М. Дадонова // Светотехника. – 2019. – № 2. – С. 34–39.
15. Гороховатский В.А. Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении // В.А. Гороховатский. – Харьков: Компания СМИТ, 2014. – 316 с.
16. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance // Proc. Intl. Joint Conference on Artificial Intelligence. – Vancouver, British Columbia, 1981. – P. 785–790.

### Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ), научный руководитель Центра космического мониторинга земли из космоса, Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-960-975-27-85, +7 (382-2) 70-15-36  
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

### Карпов Роман Константинович

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36  
Эл. почта: doitlaunot@gmail.com

### Ламинский Константин Андреевич

Магистрант каф. АСУ ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36  
Эл. почта: klaminskiy@mail.ru

### Kataev M.Yu., Karpov R.K., Laminsky K.A. Software system for detecting brick defects based on computer vision methods

For industrial enterprises, an important area of activity is the use of non-destructive testing in assessing product quality. One of the most developed approaches in practice are optical methods (visible or infrared spectral regions) and associated algorithmic approaches to computer vision. Today a large number of industries use a manual method for detecting defects, which is labor-intensive, slow and subjective. The article presents a description of an automated optical control system to detect imperfections in bricks on a conveyor belt during their production. The optical control is based on RGB images from digital cameras. The processing algorithm is shown and the results obtained are presented.

**Keywords:** computer vision, image analysis, brick defects, quality control.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-62-67

### References

1. Ananiev A.I., Lobov O.I. [Ceramic brick and its place in the construction of modern buildings]. *Design and construction in Siberia*, 2013, no. 5, pp. 28–31 (in Russ.).
2. Guryev V.V., Dorofeev V.M. [Modern normative base for monitoring the technical condition of buildings and structure]. *Industrial and urban construction*, 2006, no. 4, pp. 24–25 (in Russ.).

3. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Perezhogin V.Yu. [Some practical considerations associated with computer procedures for image processing in materials science]. *Vector of Science TSU*, 2019, no. 4(50), pp. 35–44 (in Russ.)
  4. Zhiznyakov A.L., Privezentsev D.G. [The use of local signs of self-similarity of digital images for solving flaw detection problems]. *Polzunovsky Bulletin*, 2012, no. 3/2, pp. 43–47 (in Russ.).
  5. Nguyen T.H., Nguyen T.L., Sidorov D.N., Dreglea A.I. Machine learning algorithms application to road defects classification. *Intelligent Decision Technologies*, 2018, vol. 12, pp. 59–66.
  6. Vavilov V.P. [Thermal non-destructive testing of materials and products (review)]. *Defektoskopiya*, 2017, no. 10, pp. 34–57 (in Russ.).
  7. GOST 530-2012 [Ceramic bricks and stones. General technical conditions]. Moscow, VNIISTROM "Scientific Center of Ceramics", 2013, 49 p. (in Russ.).
  8. Mironov B.M., Malov A.N. [Image segmentation by the cluster method and random jump algorithm: comparative analysis]. *Computer Optics*, 2010, vol. 34, no. 1, pp. 132–137 (in Russ.).
  9. Pedreschi F., Leon J., Moyano P. Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International Conference*, 2006, vol. 39, pp. 1092–1098.
  10. Raghavendra A., Rao M. A survey on internal defect detection in fruits by non-intrusive methods. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2016, vol. 6 (3), pp. 343–348.
  11. Kim M., Chen Y., Mehl P. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, 2001, vol. 44, no. 3, pp. 721–729.
  12. Shapiro L., Stockman J. [Computer vision]. Moscow, BINOM. Knowledge Laboratory, 2006, 752 p. (in Russ.).
  13. Pons J., Forsyth D. [Computer vision. Modern approach], Moscow, Ed. D. Williams, 2004, 465 p. (in Russ.).
  14. Kataev M.Yu., Dadonova M.M. [Vegetation recognition method based on color and texture analysis of RGB-images]. *Lighting*, 2019, no. 2, pp. 34–39 (in Russ.).
  15. Gorokhovatsky V.A. [Structural analysis and intelligent data processing in computer vision]. Kharkov., Company SMITH, 2014, 316 p. (in Russ.).
  16. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance. *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, pp. 785–790.
- 
- Michael Yu. Kataev**  
Doctor of Engineering Sciences, Department of Automated Control Systems (ACS), Scientific Director of the Center for Space Monitoring of the Earth from Space, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-960-975-27-85, +7 (382-2) 70-15-36  
Email: kataev.m@sibmail.com
- Roman K. Karpov**  
Student, Department of ACS TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-15-36  
Email: doitlaunot@gmail.com
- Konstantin A. Laminsky**  
Student, Department of ACS TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: 7 (382-2) 70-15-36  
Email: klaminskiy@mail.ru

УДК 004.855.5

Н.А. Выходцев

## Использование искусственного интеллекта для оценки стоимости недвижимого имущества

Изложены результаты анализа информационных систем в сфере продажи недвижимого имущества с целью выявления систем, использующих искусственный интеллект. Проведен корреляционный анализ характеристик объектов недвижимости. Осуществлена обработка данных, проведен сравнительный анализ алгоритмов искусственного интеллекта с вычислением коэффициента детерминации, ошибки и отклонения. Проведен ряд экспериментов по подбору гиперпараметров алгоритма. Определены характеристики, оказывающие положительное влияние на адекватность модели.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, машинное обучение, прогностическая модель, недвижимость.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-68-72

Вопрос сбережения и оптимального расхода денежных средств при покупке недвижимого имущества является одним из важнейших, возникающим перед человеком, который желает приобрести такое имущество. Большинство покупателей производят самостоятельный анализ цен на выбранный объект. Данная операция может занимать значительное время, точность же оценки не всегда находится на высоком уровне. Поэтому компании в сфере продажи недвижимого имущества начинают предлагать своим клиентам оценку объектов [1]. Информационные системы таких организаций содержат функциональные возможности, благодаря которым пользователь может ввести в форму поиска характеристики недвижимости, в частности, основной является адрес объекта, и получить рыночную цену с довольно высокой точностью около 95–99% [2]. Такое стало возможным вследствие использования алгоритмов искусственного интеллекта. Алгоритм делает предсказание цены на основе существующих аналогичных данных.

Анализ информационных систем в сфере продажи недвижимого имущества показал, что пользователь может оценить какой-то конкретный объект, но получить информацию обо всех объектах, находящихся в продаже в сжатом, но в то же время исчерпывающем и наглядном виде, пока он не может, поскольку такой функциональной возможности еще не представлено. Для анализа использовались популярные интернет-ресурсы для продажи недвижимости [3]. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Оценка недвижимости в интернет-ресурсах

Интернет-портал	Интерактивная карта	Индивидуальная оценка	Отчет по объекту	Искусственный интеллект
Циан		+		+
Этажи	+			
Яндекс			+	
Твой адрес		+		+
Агентства		+		

Разработка программного обеспечения, способного дать потенциальному покупателю информацию

о выгодности вложения денежных средств в тот или иной объект недвижимости посредством предоставления карты местности с отображенными на ней объектами с индексом привлекательности, где индекс – показатель, формирующийся на основе сравнения предсказанной цены объекта с ценой объекта, которую предлагает продавец, является актуальной, поскольку такое сочетание использования средств визуализации и алгоритмов искусственного интеллекта в сфере недвижимого имущества как на уровне страны, так и на региональном уровне отсутствует. Создание информационной системы ведется для Томского региона. Стоит также отметить, что ускорение принятия решения покупателем за счет быстрого анализа ведет к позитивному влиянию на движение денежных потоков [4] и как следствие экономику региона.

Ключевым моментом в разработке программного обеспечения является процесс оценки стоимости недвижимости, поэтому цель работы заключается в достижении оптимальных характеристик алгоритма машинного обучения для построения высокоточной прогностической модели.

Для реализации поставленной цели выполняется ряд задач: корреляционный анализ характеристик объектов недвижимости, анализ алгоритмов искусственного интеллекта для выбора оптимального под решение задачи прогнозирования цен на недвижимость [5, 6], подбор параметров алгоритма машинного обучения для достижения наилучших результатов.

В работе используется программный пакет «Anaconda». Язык программирования Python. Выбор данного языка программирования обусловлен его высокой частотой использования для решения задач, связанных с искусственным интеллектом [7]. «Anaconda» – современная среда разработки, удобство которой заключается в ее простоте и возможности использования в одной программе сразу нескольких библиотек для обработки и анализа данных, таких как NumPy, Pandas, Sklearn [8]. Наличие данных библиотек как единого согласованного комплекта позволяет избежать конфликтов, возникающих при одиночной установке. Программный код,

используемый в исследовании, написан с помощью трех вышеперечисленных библиотек, а также с использованием библиотек Matplotlib, Math и GeoPy.

Искусственный интеллект как система включает в себя множество подсистем. В исследовании используется раздел искусственного интеллекта, называемый машинным обучением. Машинное обучение, в свою очередь, включает в себя четыре подсистемы: классическое обучение, нейросети и глубокое обучение, обучение с подкреплением и ансамблевые методы [9, 10]. В исследовании используется классическое обучение с учителем, это означает, что на вход алгоритму подаются данные, на которых он учится выявлять взаимосвязи между характеристиками объекта и строит прогностическую модель, которая, в свою очередь, в дальнейшем используется для предсказания цены объекта. Для решения поставленной задачи используется алгоритм регрессии, который способен предсказать дискретное значение [11]. Данные – это база данных с объектами недвижимости города Томска. База данных содержит информацию, включающую более двадцати характеристик о десяти тысячах объектов города и окрестностей, находящихся в продаже и проданных за последние три года. Чем больше данных в базе, тем выше точность предсказания, при этом существуют и другие факторы, влияющие на предсказание цены. Это характеристики объекта (тип объекта, адрес, площадь, количество комнат и др.). Благодаря наличию разнообразных входных данных, машине проще обучиться и выявить закономерности, соответственно и точнее результат.

После загрузки базы данных в среду разработки произведена обработка данных для последующего изучения. Удалены строки с пропущенными значениями методом «dropna()», затем произведен поиск одинаковых строк и удаление одной из них с помощью метода «drop\_duplicates()».

На следующем этапе произведена оценка данных на наличие точек наблюдения, удаленных от других наблюдений. Как правило, такие данные называют выбросами, и они влияют на точность модели в сторону ее уменьшения. На рис. 1 представлена диаграмма метода оценки IQR (interquartile range), используемого для поиска выбросов.

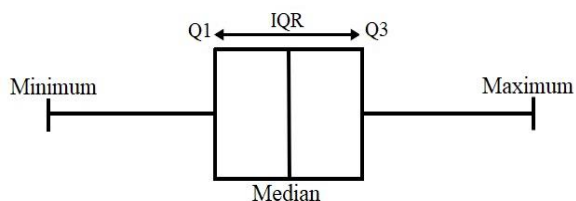


Рис. 1. Диаграмма метода оценки IQR

Median – это второй квартиль; Q1 – первый квартиль данных, т.е. 25% данных находится между Minimum и Q1; Q3 – третий квартиль данных, т.е. 75% данных находится между Minimum и Q3.

$$IQR = Q3 - Q1.$$

Для оценки выбросов используется нормальное распределение данных, т.е. распределение Гаусса. Диапазон 0,25–0,75 считается оптимальным, если мы увеличим его, то соответственно добавим нормальные рабочие данные к выбросам, если же уменьшим, то оставим часть выбросов с нормальными данными.

В результате анализа найдено и удалено 72 строки с выбросами. Общее количество данных составляет 8 213 строк. Таким образом, удалено 0,9% данных.

Для последующей работы с данными проведена их нормализация, т.е. приведение к виду, способному быть воспринятым программным обеспечением. Данные типа «Object» приведены к числовому типу.

Выбор нужных характеристик значительно влияет на итоговый результат, поэтому занимает, как правило, больше времени, чем само обучение модели. Первичная оценка характеристик проведена на основе корреляционной матрицы. Коэффициенты корреляции определены с помощью метода корреляции Пирсона [12] (рис. 2).

Корреляционная матрица:

	price
price	1,000000
area_value	0,928225
floors_total	0,315381
location_latitude	-0,153215
location_longitude	-0,209891
floor	0,238655
rooms	0,847558
building_type	-0,017732
building_series	-0,008270

Рис. 2. Корреляционная матрица характеристик недвижимого имущества

Из 24 характеристик на формирование цены влияют 8. Остальные 16 характеристик имеют оценку корреляции меньше 0,001 в сравнении с ценой (price), поэтому не используются в исследовании.

Как видно из рис. 2, на цену наибольшее влияние оказывают площадь помещения (area\_value) и количество комнат (rooms). Такие характеристики, как материал, из которого построен дом (building\_type), и тип помещения (building\_series), имеют незначительную оценку корреляции и могут как увеличить точность итоговой модели, так и уменьшить ее. Поэтому для того чтобы определить необходимость наличия этих признаков, нужно построить модель и вычислить коэффициент детерминации.

В ходе подготовки данных также осуществлено разделение данных на тестовую и обучающую выборки в отношении 25:75% соответственно.

Чтобы провести оценку недвижимости, необходимо выбрать алгоритм машинного обучения для этой задачи. Для создания и обучения прогностической модели в исследовании используется алгоритм регрессии. Анализ алгоритмов искусственного интеллекта проведен на основе изучения результатов решения задач прогнозирования цен, имеющихся в

свободном доступе в сети Интернет, в частности, анализ цен на жилье в Бостоне [13].

Поставленную задачу можно решить, используя разные алгоритмы регрессии. От выбора алгоритма зависят точность предсказания, скорость работы и размер модели. Однако стоит отметить, что если исходная база данных содержит мало информации по объему или по качеству, то даже правильно подобранный алгоритм не сможет справиться с задачей.

Всего исследуется 6 алгоритмов: «Дерево решений», «Случайный лес», «Линейная регрессия», «Ridge регрессия», «Lasso регрессия» и «Полиномиальная регрессия» [14]. Из самих названий алгоритмов «Дерево решений» и «Случайный лес» уже можно понять, что «Случайный лес» состоит из множества «Деревьев решений». «Случайный лес» – это ансамблевая модель. Ансамблевые модели сегодня используются повсеместно из-за своей эффективности и скорости [15]. Данные методы подходят для всего, где используется классическое обучение, но точность выше, чем у отдельных методов. Часто их сравнивают с нейросетью по своей эффективности. Алгоритм «Случайный лес» строит деревья решений, раз за разом исправляя ошибки предыдущего дерева, в итоге качество полученных предсказаний намного выше в сравнении с использованием алгоритма «Дерево решений».

Такие методы, как «Линейная регрессия», «Ridge регрессия», «Lasso регрессия» и «Полиномиальная регрессия», применяются непосредственно в регрессионном анализе. При этом «Полиномиальная регрессия» так же, как и «Случайный лес», работает на основе более простого алгоритма «Линейной регрессии».

Проведен анализ точности алгоритмов. Работа каждого алгоритма оценена с помощью вычисления коэффициента детерминации (R-квадрат), медианного абсолютного отклонения (MAD) и средней абсолютной ошибки (MAPE) [16]. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

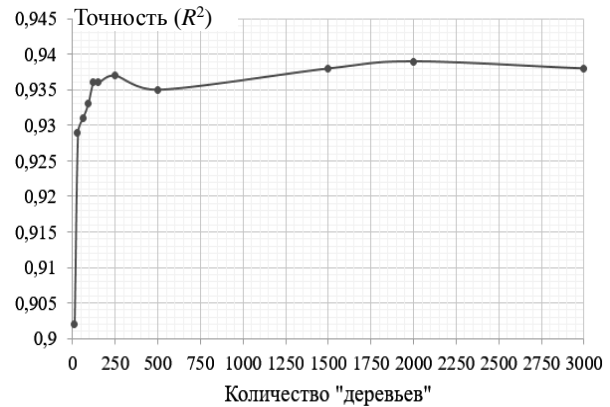
**Сравнение алгоритмов машинного обучения**

Название алгоритма	$R^2$	MAD, %	MAPE, %
RandomForestRegressor	0,939	8,81	13,88
Ridge Regression	0,925	16,48	22,61
Lasso Regression	0,924	15,8	22,61
Linear Regression	0,922	22,53	16,64
Polynomial Regression	0,881	15,6	22,17
DecisionTree	0,807	14,29	23,24

В табл. 2 коэффициенты детерминации у первых четырех алгоритмов очень близки, поэтому дополнительно высчитываются MAD и MAPE. В результате проведения экспериментов по оценке эффективности работы алгоритмов выявлено, что наивысший показатель коэффициента детерминации и наименьшие показатели MAD и MAPE у алгоритма «Случайный лес».

На итоговое значение коэффициента  $R^2$  влияют также значения гиперпараметров алгоритма «Случайный лес». На рис. 3 представлена функция, отоб-

ражающая зависимость адекватности модели от количества «деревьев». При количестве «деревьев», равном 250, коэффициент  $R^2$  составляет 0,937, время обработки данных и формирования модели составляет 5 с. Максимальное значение коэффициента  $R^2$  равно 0,939, достигается при количестве «деревьев» – 2000 за время 10 с. Дальнейшее увеличение гиперпараметра ведет к увеличению времени обработки, но коэффициент детерминации остается на том же уровне.

Рис. 3. Зависимость коэффициента  $R^2$  от количества «деревьев»

В табл. 3 представлена зависимость коэффициента  $R^2$  от глубины «леса». Лучшее значение достигается при глубине «леса», равной 55. Гиперпараметр «min\_samples\_split», обозначающий минимальное количество выборок, необходимое для разделения внутреннего узла, установлен равным 2. При его уменьшении точность уменьшается, при увеличении – не изменяется.

Таблица 3

**Определение максимальной глубины «леса»**

Глубина «леса»	$R^2$
5	0,918
10	0,938
30	0,937
55	0,939
65	0,937
100	0,937

Проведена заключительная оценка характеристик (табл. 4). Для этого исследовано, как влияет наличие последних двух характеристик из корреляционной матрицы на рис. 2 с наименьшими показателями корреляции на адекватность модели. Вычислены коэффициент детерминации, ошибка (MAPE) и отклонение (MAD).

Таблица 4

**Оценка характеристик**

Характеристики	Наличие/отсутствие			
	–	–	+	+
Building_type	–	–	+	+
Building_series	–	+	+	–
Оценки	Значения			
$R^2$	0,872	0,88	0,939	0,87
MAPE	17,61	14,87	13,92	15,65
MAD	9,65	9,5	8,81	9,12

Исходя из результатов экспериментов, лучшее значение коэффициента  $R^2$  достигается при наличии обеих характеристик, следовательно, в исследовании все характеристики важны, и их общее количество равно 8.

Проведенные выше эксперименты показали, что оптимальным алгоритмом является «Случайный лес» с глубиной «леса» – 55, количеством «деревьев» – 2000, «min\_samples\_split» – 2 и количеством характеристик – 8. Значение коэффициента детерминации составило 0,939, медианное абсолютное отклонение – 8,81%.

#### Выводы

Таким образом, в рамках исследования проведено изучение информационных систем по продаже недвижимости, в результате выявлена потребность в выработке алгоритма машинного обучения, необходимого для анализа цен на недвижимость. Для достижения поставленной цели проведен анализ характеристик объектов недвижимости и выбраны оказывающие положительное влияние на адекватность формируемой модели, осуществлена предварительная обработка данных путем удаления выбросов повторяющихся и незаполненных данных, проведен сравнительный анализ алгоритмов искусственного интеллекта с вычислением коэффициента детерминации, ошибки и отклонения, выбран алгоритм «Случайный лес», проведен ряд экспериментов по подбору гиперпараметров алгоритма. Достигнутые характеристики и параметры позволяют сделать вывод об адекватности модели.

#### Литература

1. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.
2. Turing A.M. Computing Machinery and Intelligence // *Mind*. – 1950. – Vol. 59, No. 236. – P. 433–460.
3. Cortes C. Support-Vector Networks / C. Cortes, V. Vapnik // *Machine Learning*. – 1995. – Vol. 20, No. 3. – P. 273–297.
4. Mukhopadhyay S. *Advanced Data Analytics Using Python*. – Kolkata: Apress, 2018. – 195 p.
5. Embarak O. *Data Analysis and Visualization using Python*. – Abu Dhabi: Apress, 2018. – 390 p.
6. Nelli F. *Python Data Analytics*. – Rome: Apress, 2018. – 576 p.
7. Milovanovich I. *Python Data Visualization Cookbook*. – Birmingham: Packt Publishing, 2013. – 280 p.
8. Levantesi S. The Importance of Economic Variables on London Real Estate Market: A Random Forest Approach / S. Levantesi, G. Piscopo // *Risks*. – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 112–129.
9. Randal S. *Python Machine Learning*. – Birmingham: Packt Publishing, 2015. – 454 p.
10. Madhavan S. *Mastering Python for Data Science*. – Birmingham: Packt Publishing, 2015. – 294 p.
11. Squire M. *Mastering Data Mining with Python – Find patterns hind in your data*. – Birmingham: Packt Publishing, 2016. – 269 p.
12. Martins L. *Mastering Python Data Analysis* / L. Martins, M. Persson. – Birmingham: Packt Publishing, 2016. – 282 p.
13. Кормен Т. Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М.: Вильямс, 2013. – 1328 с.
14. Chervonenkis A. A Note on One Class of Perceptrons / A. Chervonenkis, V. Vapnik // *Automation and Remote Control*. – 1964. – Vol. 25, No. 16. – P. 103–109.
15. Рашка С. Python и машинное обучение. – М.: ДМК-Пресс, 2017. – 420 с.
16. Layton R. *Learning Data Mining with Python*. – Birmingham: Packt Publishing, 2015. – 344 p.

#### Выходцев Никита Андреевич

Аспирант отделения информационных технологий (ОИТ) инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-823-33-88  
Эл. почта: vyh.dtsev@mail.ru

Vykhodtsev N.A.

#### Artificial intelligence in price estimation of real estate

The article contains results of information systems analyses that are used for real estate estimation and are based on artificial intelligence. A correlation analysis of the characteristics of real estate objects has been carried out. Data processing, as well as comparative analysis of artificial intelligence algorithms with computation of accuracy, error and deviation were implemented. A number of experiments were realized to select the hyper parameters of the algorithm. The characteristics that have a positive effect on adequacy have been determined.

**Keywords:** artificial intelligence, machine learning, forecast- ing model, real estate.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-68-72

#### References

1. Sholle F. *Glubokoe obuchenie na Python* [Deep learning on Python]. Saint Petersburg, Piter, 2018. 400 p. (in Russ.).
2. Turing A.M. Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, 1950, vol. 59, no. 236, pp. 433–460.
3. Cortes C., Vapnik V. Support-Vector Networks. *Machine Learning*, 1995, vol. 20, no. 3, pp. 273–297.
4. Mukhopadhyay S. *Advanced Data Analytics Using Python*. Kolkata, Apress, 2018, 195 p.
5. Embarak O. *Data Analysis and Visualization using Python*. Abu Dhabi, Apress, 2018, 390 p.
6. Nelli F. *Python Data Analytics*. Rome, Apress, 2018, 576 p.
7. Milovanovich I. *Python Data Visualization Cookbook*. Birmingham, Packt Publishing, 2013, 280 p.
8. Levantesi S., Piscopo G. The Importance of Economic Variables on London Real Estate Market: A Random Forest Approach. *Risks*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 112–129.
9. Randal S. *Python Machine Learning*. Birmingham, Packt Publishing, 2015, 454 p.
10. Madhavan S. *Mastering Python for Data Science*. Birmingham, Packt Publishing, 2015, 294 p.
11. Squire M. *Mastering Data Mining with Python – Find patterns hind in your data*. Birmingham, Packt Publishing, 2016, 269 p.



12. Martins L., Persson M. *Mastering Python Data Analysis*. Birmingham, Packt Publishing, 2016, 282 p.

13. Cormen T., Layzerson Ch., Rivest R. *Algoritmy. Postroenie i analis* [Algorithms. Constructions and analysis]. Moscow, Viliams, 2013, 1328 p. (in Russ.).

14. Chervonenkis A., Vapnik V. A Note on One Class of Perceptrons. *Automation and Remote Control*. 1964, vol. 25, no. 16, pp. 103–109.

15. Rashka S. *Paiton i mashinnoe obuchenie* [Python and machine learning]. Moscow, DMK Press, 2017. 420 p. (in Russ.).

16. Layton R. *Learning Data Mining with Python*. Birmingham, Packt Publishing, 2015, 344 p.

**Nikita A. Vykhodtsev**

Postgraduate student, Department of Information

Technologies (OIT), School of Engineering of Information Technologies and Robotics (ISHITR),

National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)

30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7-913-823-33-88

Email: vyh.dtsev@mail.ru

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**



УДК 621.314

А.В. Осипов

## Синтез двухчастотного тока параллельно-последовательным резонансным *LCLC*-преобразователем с многократной широтно-импульсной модуляцией

Рассмотрены способы формирования двухчастотного тока индуктора в резонансном преобразователе с многократной широтно-импульсной модуляцией для систем индукционного нагрева объектов сложной формы поверхности. Проведено исследование способов формирования и регулирования частотных составляющих тока индуктора. Предложены подходы к оценке энергетической эффективности двухчастотных преобразователей и проведена ее оценка для многократной ШИМ по значениям коэффициентов мощности и габаритной мощности. Показано, что высокочастотная гармоника образована двумя составляющими: собственно формируемой многократной модуляцией и составляющей, содержащейся в прямоугольном напряжении низкой частоты, последняя существенно влияет на энергетические характеристики. Показаны преимущества двухполярной ШИМ над однополярной с энергетических позиций.

**Ключевые слова:** резонансный *LCLC*-преобразователь, многократная широтно-импульсная модуляция, двухчастотный индукционный нагрев, энергетические характеристики.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-75-82

Формирование двухчастотного тока требуется в системах индукционного нагрева для обеспечения заданного температурного распределения в нагреваемом объекте. Данная технология может быть необходима для закалки поверхностей сложной формы, например, закалке зубьев шестерен [1–8], в этом случае высокая частота осуществляет нагрев выпуклой поверхности зуба шестерни, а низкая – межзубовой впадины. Закалка в таком режиме позволяет сохранить сырой сердцевину зуба при равномерной глубине закалки его сложной поверхности. Кроме того, в системах плавки больших объемов двухчастотный ток индуктора позволяет получить равномерный нагрев расплава за счет осуществления его перемешивания, осуществляемого низкочастотной составляющей, а высокая частота осуществляет его нагрев [9, 10]. В этих системах в индукторе формируется 3-фазное электромагнитное поле, обеспечивающее перемешивание расплава.

В ряде практических проектов наиболее широкое применение получили системы суммирования выходных параметров двух разночастотных преобразователей, при этом решающими факторами являлись универсальность решения и простота реализации [1–4]. Однако проектирование двух разнотипных источников и введение частотного фильтра большой мощности удорожают систему и заставляют искать альтернативные пути решения задачи [11], кроме того, в системах суммирования обязательным является включение двух согласующих трансформаторов, что усложняет систему, так как в ряде случаев индукционного нагрева может применяться бестрансформаторное включение индуктора.

В целом задача поиска оптимальной структуры преобразователя сводится к реализации требований технологического процесса при условии минимальных энергетических и массогабаритных затрат. Поэтому целесообразным представляется разработка

резонансного преобразователя, генерирующего напряжение с двумя частотными составляющими гармониками, формируемыми многократной модуляцией выходного напряжения. Синтез двухчастотного тока с заданным гармоническим составом может быть реализован способами формирования [6, 12], основанными на методе гармонического синтеза напряжения с фильтрацией высших гармоник *LCLC*-контуром. Метод основан на формировании ступенчатого напряжения с заданным гармоническим составом, имеющим две преобладающие гармоники, что позволяет достичь регулирования амплитуд составляющих выходного тока. Практическая реализация гармонического синтеза связана со сложным обменом энергий между инверторами многоуровневого преобразователя, что ухудшает его энергетику, при этом необходимо наличие нескольких инверторных ячеек с согласующими трансформаторами.

Методы формирования двухчастотного тока индуктора на основе многократной ШИМ проще с точки зрения структуры преобразователя и рассмотрены в топологии *LCLC*-контра [5, 8, 13]. В большинстве приведенных работ вопросы энергетики и энергетические характеристики резонансного преобразователя при регулировании амплитуд частотных составляющих тока не затрагиваются. Целью настоящей работы является определение характеристик и оценка энергетической эффективности формирования двухчастотного тока индуктора на основе многократной модуляции напряжения инвертора.

### Характеристики резонансного *LCLC*-контра при формировании двухчастотного тока

Формирование двухчастотного тока предполагает получение больших коэффициентов усиления и энергетические характеристики на двух синтезируемых частотах. Поэтому классический *LC*-контур, имеющий низкий реактивный импеданс (т.е. условие резонанса) только на одной частоте, не может при-

меняться. Поэтому в системах индукционного нагрева для синтеза двухчастотного тока индуктора применяется последовательно-параллельный *LCLC*-резонансный контур (рис. 1) с параллельным включением частотоподающих ветвей, осуществляющих фильтрацию паразитных гармоник, что позволяет реализовать синтез тока требуемого гармонического состава.

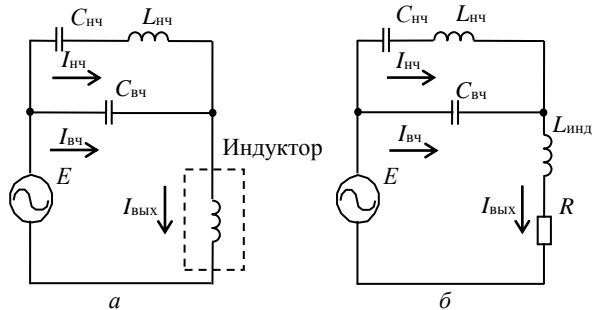


Рис. 1. Двухчастотный *LCLC*-резонансный контур – а; соответствующая ему схема замещения – б

Импедансно-частотные характеристики *LCLC*-топологии можно отразить соотношениями

$$\operatorname{Re} Z(\omega) = R,$$

$$\operatorname{Im} Z(\omega) = \omega L_{\text{инд}} \frac{1}{\omega C_{\text{вч}}} \frac{(1 - \omega^2 L_{\text{нч}} C_{\text{нч}})}{(1 - \omega^2 L_{\text{нч}} C_{\text{нч}}) + C_{\text{нч}}/C_{\text{вч}}},$$

а частотные характеристики выходного тока контура

$$I_{\text{вых}}(\omega) = \frac{E}{Z(\omega)} \rightarrow I_{\text{вых}}^*(\omega) = \frac{R}{Z(\omega)};$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{Im} Z(\omega)}{R} \right).$$

Графически АЧХ и ФЧХ выходного тока при синтезе частот 10 и 70 кГц *LCLC*-контуром с параметрами  $L_{\text{инд}} = 13,7$  мкГн,  $R = 0,5$  Ом,  $C_{\text{вч}} = 0,5$  мкФ,  $L_{\text{нч}} = 43,3$  мкГн,  $C_{\text{нч}} = 4,4$  мкФ показаны на рис. 2. Можно отметить на синтезируемых частотах равные коэффициенты передачи тока, определяемые нагрузкой, при которых  $\operatorname{Im} Z(\omega) = 0$ , что обусловлено топологией контура, и наличие центральной частоты блокирования  $\omega_0$  с высоким реактивным импедансом, при которой  $\operatorname{Im} Z(\omega) \rightarrow \infty$ .

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_{\text{нч}} + C_{\text{вч}}}{C_{\text{нч}} \cdot C_{\text{вч}} \cdot L_{\text{нч}}}}.$$

Частота  $\omega_0$  не зависит от нагрузки, а определяется частотоподающими ветвями *LCLC*-контура, ее необходимо выбирать в области подавления паразитных гармоник, в данном случае 3-й и 5-й.

Характеристика  $I_{\text{вых}}^*(\omega)$  отражает фильтрующие свойства *LCLC*-контура, синтезирующего таким образом две резонансные частоты.

В общем случае математическая модель *LCLC*-контура может быть описана методом парциальных частот [14], его применение для подобных систем показано в [15]. Метод дает приемлемую точность описания процессов, однако в данном случае явля-

ется избыточным, так как при существенной разнице синтезируемых частот парциальные контура фактически не связаны друг с другом. Поэтому, учитывая, что в электротермии присутствует существенная разница синтезируемых частот, справедливо условие  $\omega_{\text{вч}} \gg \omega_{\text{нч}}$ , которое позволяет разбить *LCLC*-контур на схемы замещения и анализировать его свойства отдельно по каждой частоте.

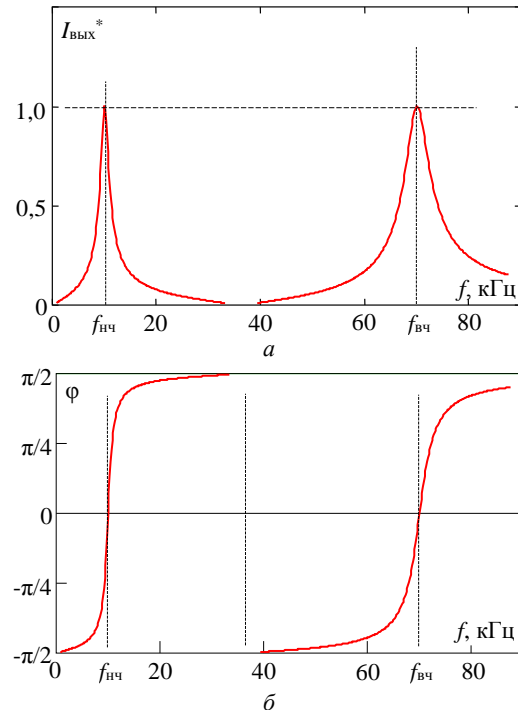


Рис. 2. Частотные характеристики тока резонансного *LCLC*-контура: а – АЧХ, б – ФЧХ

Данный подход обоснован и использован в ряде работ, например в [16], согласно которому на высокой частоте сопротивление конденсатора  $C_{\text{нч}}$  незначительно:

$$\omega_{\text{вч}} L_{\text{нч}} \gg \frac{1}{\omega_{\text{вч}} C_{\text{нч}}},$$

что позволяет закортить его в высокочастотной схеме замещения, а на низкой частоте сопротивление конденсатора  $C_{\text{вч}}$  существенно превышает сопротивление  $L_{\text{инд}}$

$$\omega_{\text{нч}} L_{\text{вч}} \ll \frac{1}{\omega_{\text{нч}} C_{\text{вч}}},$$

соответственно, он может быть исключен из низкочастотной схемы замещения. Таким образом, при синтезе сильно различающихся частот они могут определяться выражениями

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{\text{нч}} = \frac{1}{\sqrt{(L_{\text{инд}} + L_{\text{нч}}) \cdot C_{\text{нч}}}}, \\ \omega_{\text{вч}} = \sqrt{\frac{L_{\text{инд}} + L_{\text{нч}}}{L_{\text{инд}} \cdot L_{\text{нч}} \cdot C_{\text{вч}}}}. \end{array} \right.$$

Интересно, что данный подход позволяет разделить частотные составляющие тока нагрузки неза-

висимо от добротности контура. В приведенной топологии (см. рис. 1) нагрузка включена последовательно с источником, поэтому регулирование амплитуд синтезируемых токов может быть реализовано только регулированием гармоник входного напряжения резонансного контура. Соответственно, основной задачей в данном случае является синтез напряжения инвертора, содержащего гармоники требуемых амплитуд.

**Определение энергетических характеристик преобразователя при генерации двухчастотного тока**

Сопоставление преобразователей, формирующих двухчастотное напряжение, должно производиться на основе анализа их энергетической эффективности. В этой связи нужно сказать, что анализ двухчастотных преобразователей имеет ряд особенностей, заключающихся в том, что полезная энергия нагрузки передается сразу на двух частотах. Поэтому коэффициент мощности  $K_M$ , характеризующий потребляемую резонансным контуром энергию и позволяющий таким образом оценить искажения параметров инвертора, будет выглядеть

$$K_M = \frac{P}{S} = \frac{P_{нч} + P_{вч}}{U \cdot I},$$

где  $P_{нч}$  и  $P_{вч}$  – активная мощность на низкой и высокой частоте,  $U$  и  $I$  – действующие значения выходного напряжения и тока преобразователя. В общем случае, но принимая, что выходной ток состоит только из двух гармоник,

$$K_M = \frac{I_{нч} U_{нч} \cos \varphi_{нч} + I_{вч} U_{вч} \cos \varphi_{вч}}{U \sqrt{I_{нч}^2 + I_{вч}^2}},$$

где  $\varphi_{нч}$   $\varphi_{вч}$  – фазы выходного тока согласно ФЧХ (рис. 2, б). В резонансном режиме можно принять  $\varphi_{нч} = \varphi_{вч} = 0$ , тогда для  $K_M$  можно записать

$$K_M = \frac{I_{нч} U_{нч} + I_{вч} U_{вч}}{U \sqrt{I_{нч}^2 + I_{вч}^2}} = \frac{I_{вч} U_{вч} + I_{нч} U_{нч} \cdot \sigma I \sigma U}{U \sqrt{I_{вч}^2 + I_{нч}^2 \sigma I^2}} = \frac{U_{вч} (1 + \sigma I \sigma U)}{U \sqrt{1 + \sigma I^2}},$$

где  $U_{нч}$ ,  $U_{вч}$ ,  $I_{нч}$ ,  $I_{вч}$  – действующие значения токов и напряжений,  $\sigma U = U_{нч}/U_{вч}$  и отношение гармоник напряжения, синтезируемых преобразователем,  $\sigma I = I_{нч}/I_{вч}$  – отношение гармоник тока нагрузки. Выделяя в данном выражении коэффициент искажения, можно привести его к форме

$$K_M = \frac{1 + \sigma I \sigma U}{\sqrt{1 + \sigma I^2} \cdot \sqrt{1 + \sigma U^2}} \times \frac{\sqrt{U_{вч}^2 + U_{нч}^2}}{U}.$$

В рассматриваемой топологии включения нагрузки (см. рис. 1) выполняется условие  $I_{вых} = I_{вх}$  (т.е. контур не производит импедансного преобразования, а играет исключительно фильтрующую роль), поэтому гармоникам оказывается одинаковое активное сопротивление, тогда справедливо  $\sigma U = \sigma I$ , и коэффициент мощности равен коэффициенту искажения

$$K_M = \frac{\sqrt{U_{вч}^2 + U_{нч}^2}}{U} = K_{2f} И. \tag{1}$$

Учитывая, что полезный сигнал в данном случае состоит из двух гармоник, полученное выражение можно характеризовать как коэффициент искажения выходного напряжения инвертора относительно двух синтезируемых гармоник. Видно, что  $K_M$  полностью определяется искажением формы напряжения по каждой из синтезируемых гармоник. При этом нужно отметить, что в данном случае коэффициент мощности может превышать значение  $K_M = 0,9$ , характеризующее относительную мощность первой гармоники при условии подавления остальных, что присутствует в классических LC-преобразователях. Это объясняется потреблением сразу двух частотных составляющих. При прямоугольном напряжении для коэффициента мощности можно записать

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\nu^2}},$$

где  $\nu$  – номер старшей синтезируемой гармоники.

Другим оценочным показателем энергетической эффективности является габаритная мощность преобразователя, определяемая максимальными значениями его тока и напряжения  $U_m$ , и может быть оценена относительным коэффициентом габаритной мощности

$$P_{\Gamma}^* = \frac{P_{\Gamma}}{P} = \frac{U_m \times \sqrt{2} (I_{нч} + I_{вч})}{I_{нч} U_{нч} + I_{вч} U_{вч}} = \frac{U_m}{U_{вч}} \cdot \frac{\sqrt{2} (\sigma I + 1)}{\sigma I \sigma U + 1} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_m}{U_{нч} + U_{вч}} \times \frac{(\sigma U + 1)(\sigma I + 1)}{\sigma I \sigma U + 1},$$

с учетом условия  $\sigma U = \sigma I$  выражение примет вид

$$P_{\Gamma}^* = 2 \times K_{2fA} \times \frac{(\sigma U + 1)^2}{\sigma U^2 + 1}, \tag{2}$$

где  $K_{2fA}$  – отношение амплитуды напряжения преобразователя к сумме амплитуд синтезируемых гармоник

$$K_{2fA} = \frac{U_m}{U_{mнч} + U_{mвч}}.$$

Данный коэффициент можно выразить через коэффициент амплитуды  $K_a$ , тогда

$$K_{2fA} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{K_a}{K_M} \times \frac{\sqrt{\sigma U^2 + 1}}{\sigma U + 1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{K_a}{K_M} \times \frac{1}{K_S},$$

$$P_{\Gamma}^* = \sqrt{2} \times \frac{K_a}{K_M} \times K_S,$$

где  $K_S$  – отношение алгебраической суммы амплитуд синтезируемых гармоник к их геометрической сумме. Коэффициент  $K_{2fA}$  определяет степень содержания гармоник в выходном напряжении и равен единице, если форма напряжения повторяет форму тока. Коэффициент 2 в данном случае связывает максимальную мгновенную мощность с ее средним значением. Поэтому предельно достижимым значением

$P_r^*$  является его удвоенное значение. Таким образом, форма напряжения инвертора является основным фактором, определяющим энергетическую эффективность преобразования на резонансных частотах, которая может быть оценена коэффициентами  $K_{2fi}$ ,  $K_{2fA}$ . Далее показано определение показателей энергетической эффективности на примере многократных разновидностей ШИМ.

#### Однополярная широтно-импульсная модуляция в $LCLC$ -преобразователе

Последовательный резонансный  $LCLC$ -преобразователь при генерации двухчастотного тока показан на рис. 3. При однополярной ШИМ управляющее воздействие формируется сравнением двустороннего пилообразного напряжения  $U_{\text{trian}}$  с опорным прямоугольным сигналом  $U_{\text{ref}}$  (рис. 4, а). Полученная управляющая импульсная последовательность подается на одну из стоек инвертора  $VT1, VT2$ , определяемую как регулируемая, при этом на другую стойку инвертора  $VT3, VT4$  подается низкочастотный немодулированный сигнал. В результате на такте управления инвертора образуются интервалы, подключения напряжения питания к контуру и интервал закороченного состояния контура, при котором его ток замыкается открытой верхней или нижней парой транзисторов.

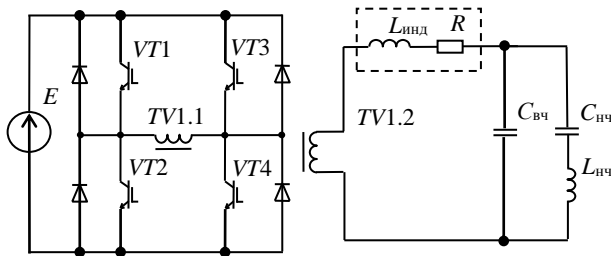


Рис. 3. Последовательный резонансный  $LCLC$ -преобразователь

В резонансном режиме принципиальным является обеспечение именно двухсторонней проводимости транзисторов инвертора, так как ток контура при достаточной амплитуде высокочастотной составляющей может сменить полярность на полупериоде низкой частоты. Поэтому отпирание транзисторов регулируемой стойки на интервале шунтирования с длительностью  $(1 - \gamma)$  является необходимым. Путем изменения величины опорного напряжения  $U_{\text{ref}}$  достигается регулирование длительностей этих интервалов и, соответственно, амплитуд синтезируемых гармоник. По мере уменьшения  $\gamma$  амплитуда 1-й гармоники уменьшается, а 7-й увеличивается, что происходит до  $\gamma = 0,5$ , после чего уменьшаются обе гармоники. Работа инвертора при синтезе 1-й и 7-й гармоник с соотношением амплитуд  $\sigma U = 2$  на основе однополярной многократной ШИМ проиллюстрирована на рис. 4, а, спектры выходного напряжения и тока, полученные путем моделирования в OrCad9.2 конфигурации контура по рис. 2 ( $L_{\text{инд}} = 13,7$  мкГн,  $R = 0,5$  Ом,  $C_{\text{вч}} = 0,5$  мкФ,  $L_{\text{нч}} = 43,3$  мкГн,  $C_{\text{нч}} = 4,4$  мкФ), показаны на рис. 4,

б, отмечено фактически полное подавление паразитных гармоник.

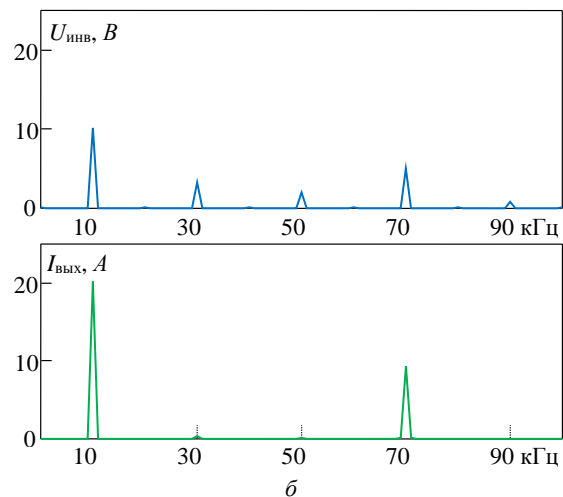
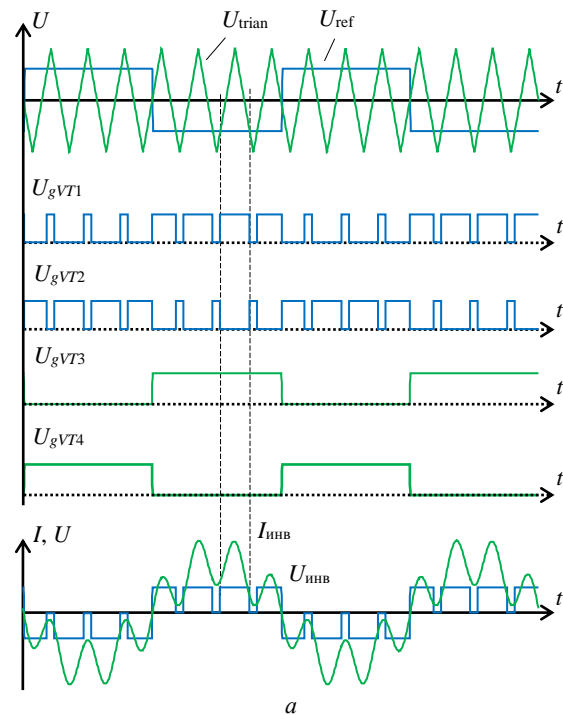


Рис. 4. Диаграммы резонансного  $LCLC$ -преобразователя с однополярной многократной ШИМ при синтезе 1-й и 7-й гармоник – а; спектры выходного напряжения и тока – б

Вычислены значения синтезируемых гармоник напряжения инвертора при его однополярной многократной ШИМ, низкочастотная гармоника

$$U_{m \text{ нч}} = U_{1m} = \frac{4}{\pi} E \gamma$$

и высокочастотная гармоника

$$U_{m \text{ вч}} = U_{\text{pwm}} + U_{\text{vm}} = \frac{4}{\pi} E \left( \frac{\sin \pi \gamma}{2} + \frac{\gamma}{v} \right), \quad (3)$$

которая представлена суммой составляющей, формируемой многократной ШИМ  $U_{\text{pwm}}$ , и составляющей, содержащейся в низкочастотном напряжении  $U_{\text{vm}}$ . Получена регулировочная характеристика их соотношения

$$\sigma U = \frac{2\gamma}{\sin \pi\gamma + \frac{2\gamma}{v}}$$

Учитывая, что действующее значение напряжения инвертора по отношению к его амплитуде при однополярной многократной ШИМ

$$U^*(\gamma, v) = \begin{cases} \sqrt{\frac{(v-1)\gamma+1}{v}} & \text{при } \gamma > 0,5; \\ \sqrt{\frac{(v-1)\gamma+2\gamma}{v}} & \text{при } \gamma < 0,5. \end{cases}$$

Данные соотношения позволяют определить энергетические коэффициенты напряжения инвертора

$$K_{2fA} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{\frac{\sin \pi\gamma}{2} + \gamma \left(1 + \frac{1}{v}\right)},$$

$$K_{2fU} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{\sin \pi\gamma}{2} + \frac{\gamma}{v}\right)^2}}{U^*(\gamma, v)}$$

Данные коэффициенты с помощью (1), (2) позволяют определить энергетические характеристики, которые при синтезе 1-й и v-й гармоник представлены на рис. 5. Отличие случаев синтеза при v = 3 и v = 7 гармоник состоит во влиянии составляющей гармоники, исходно содержащейся в низкочастотном напряжении, в данном случае содержание 3-й гармоники выше, поэтому энергетические характеристики при v = 3 существенно лучше.

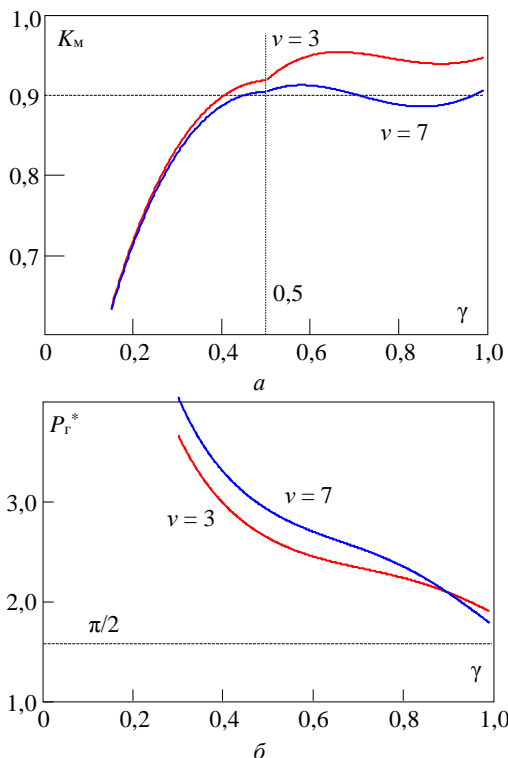


Рис. 5. Энергетические характеристики LCLC-преобразователя при однополярной ШИМ: а – коэффициент мощности; б – коэффициент габаритной мощности

Уменьшение длительности импульсов  $\gamma$  при однополярной ШИМ в диапазоне  $\gamma < 0,5$  приводит к уменьшению обеих синтезируемых гармоник, поэтому высокочастотная составляющая тока в данном случае ограничена.

**Двухполярная широтно-импульсная модуляция в LCLC-преобразователе**

Увеличить высокочастотную составляющую тока преобразователя с многократной ШИМ можно заменой интервала шунтирования нагрузки на интервал рекуперации, таким образом, реализуется многократная двухполярная равномерная ШИМ (рис. 6). В этом случае амплитуды напряжения синтезируемых гармоник описываются соотношениями

$$U_{m\text{нч}} = U_{1m} = \frac{4E(2\gamma-1)}{\pi},$$

$$U_{m\text{вч}} = \frac{4E}{\pi} \left( \sin \pi\gamma + \frac{2\gamma-1}{v} \right). \quad (4)$$

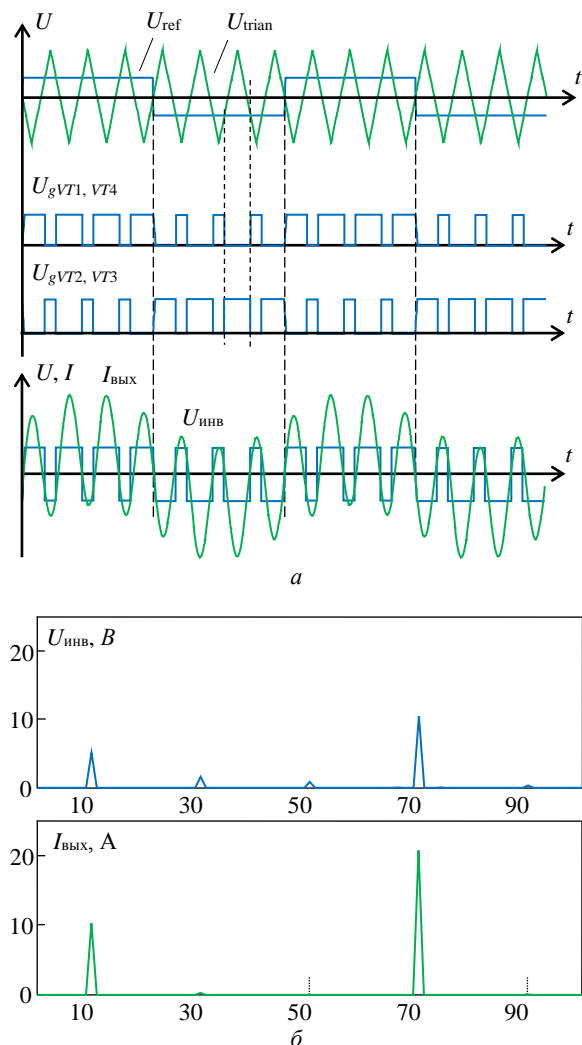


Рис. 6. Диаграммы LCLC-преобразователя с двухполярной многократной ШИМ при синтезе 1-й и 7-й гармоник – а; спектры выходного напряжения и тока – б

Регулирующая характеристика отношения амплитуд гармоник



$$\sigma U = \frac{2\gamma - 1}{\sin \pi\gamma + \frac{2\gamma - 1}{v}}$$

Действующее значение напряжения инвертора в этом случае постоянно:  $U = E$ , коэффициенты искажения и амплитуды

$$K_{2f_{\text{и}}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \sqrt{(2\gamma - 1)^2 + \left(\sin \pi\gamma + \frac{2\gamma - 1}{v}\right)^2},$$

$$K_{2f_{\text{А}}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{|2\gamma - 1| + \sin(\pi\gamma) + \left(\frac{2\gamma - 1}{v}\right)}.$$

Энергетические характеристики преобразователя  $K_M$  и  $P_{\Gamma}^*$  при многократной двухполярной ШИМ получены аналогично с использованием выражений (1), (2) и при синтезе 1-й и 7-й гармоник графически показаны на рис. 7.

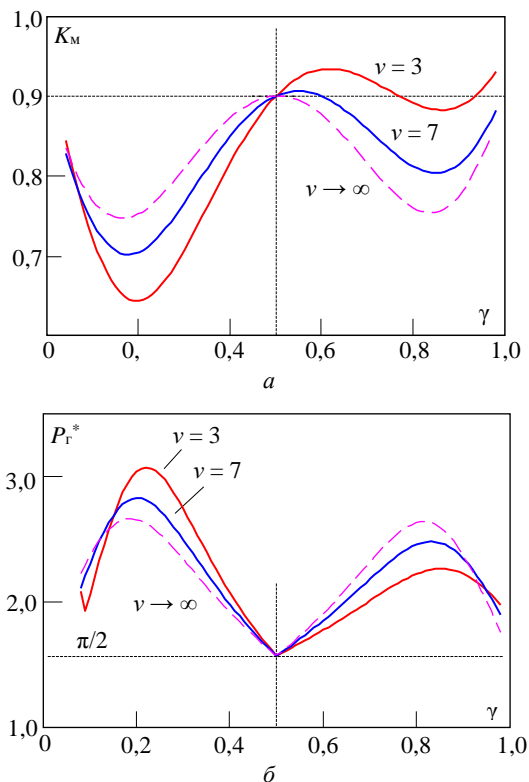


Рис. 7. Энергетические характеристики  $LCLC$ -преобразователя при двухполярной ШИМ:  $a$  – коэффициент мощности,  $b$  – коэффициент габаритной мощности

Нужно отметить симметричный характер энергетических характеристик относительно точки  $\gamma = 0,5$ , при переходе через которую низкочастотная составляющая меняет знак, вместе с которой меняет знак и высокочастотная гармоника низкочастотной составляющей  $U_{\text{vm}}$ . Поэтому на интервале  $\gamma = [0..0,5]$  формируется встречное включение составляющих, образующих высокочастотную гармонику  $U_{m_{\text{вч}}} = U_{\text{pwm}} - U_{\text{vm}}$ . Соответственно, при  $v \rightarrow \infty$  характеристики  $K_M$  и  $P_{\Gamma}^*$  являются полностью симметричными относительно  $\gamma = 0,5$ . Таким образом, работа в области  $\gamma < 0,5$  в данном случае не имеет смысла.

Многократная двухполярная равномерная ШИМ позволяет получить большие, чем однополярная ШИМ, амплитуды синтезируемых гармоник напряжения при заданной амплитуде прямоугольного напряжения, что объясняет ее лучшие энергетические характеристики.

Проведена верификация проведенных расчетов на примере конфигурации  $LCLC$ -контура с параметрами  $L_{\text{инд}} = 13,7$  мкГн,  $R = 0,5$  Ом,  $C_{\text{вч}} = 0,5$  мкФ,  $L_{\text{лч}} = 43,3$  мкГн,  $C_{\text{лч}} = 4,4$  мкФ путем моделирования в OrCad 9.2, результаты приведены на рис. 8.

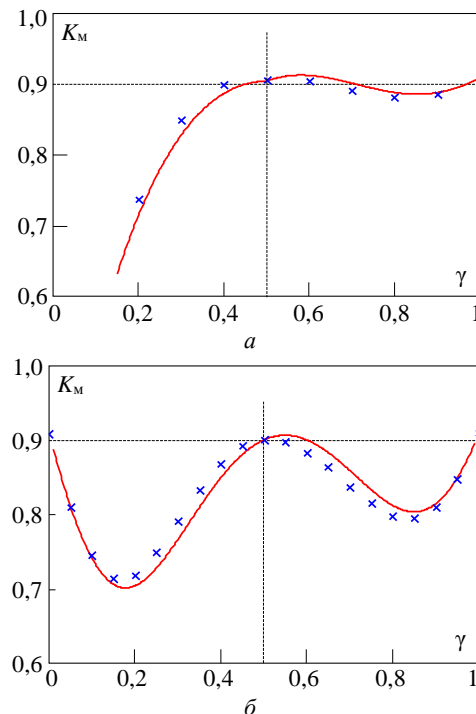


Рис. 8. Результаты моделирования зависимости  $K_M(\gamma)$ :  $a$  – при однополярной ШИМ;  $b$  – двухполярной ШИМ

Можно отметить отклонения аналитического описания  $K_M$  от модели, обусловленные несинусоидальностью выходного тока и недостаточной точностью аппроксимации амплитуд гармоник напряжения (3), (4). Высокочастотная гармоника описана суммой линейной и синусоидальной составляющих, последняя не является до конца точной, однако в точках  $\gamma = 0$ ,  $\gamma = 0,5$ ,  $\gamma = 1$  совпадение можно считать полным.

### Заключение

Описанный в работе способ синтеза двухчастотного тока на основе многократной ШИМ резонансным  $LCLC$ -преобразователем позволяет регулировать соотношение синтезируемых гармоник тока в структурах на основе одного инвертора, что важно при построении систем индукционного нагрева. При этом применение разновидности ШИМ обусловлено особенностями технологического процесса. Важно отметить, что на резонансных частотах  $LCLC$ -контура (см. рис. 1) для определения энергетических характеристик преобразователя достаточно анализировать форму напряжения инвертора с помощью коэффициентов искажения и амплитуды.

## Литература

1. Induction heating inverter with simultaneous dual-frequency output / V. Esteve, J. Jordan, E.J. Dede, E. Sanchis-Kilders, E. Maset // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. – 2006. – Vol. 1, No. 5. – P. 1505–1509.
2. Schwenk W. The simultaneous dual-frequency method of inductive gear hardening // *Gear solutions*. – May 2003. – P. 24–31.
3. Peter H.-J. Applications for surface induction hardening using SDF Induction Heat Treating / H.-J. Peter, W. Schwenk // *Elektrowärme International*. – 2002. – No. 60. – P. 13–18.
4. Schwenk W. Simultaneous Dual-Frequency Induction Hardening // *Heat treating Progress*. – April–May 2003. – P. 35–38.
5. Investigation of Heat Treatment of Gears Using a Simultaneous Dual Frequency Induction Heating Method / D. Yun, H. Park, J.H. Koo, S. Ham, S. Lee // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2015. – Vol. 51, No. 11. – P. 1–4.
6. Multilevel inverters with equal or unequal sources for dual-frequency induction heating / B. Diong, S. Basireddy, K. Corzine, Y. Familiant // *Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC '04. Nineteenth Annual IEEE*. – 2004. – Vol. 2. – P. 825–831.
7. A single-phase dual frequency inverter based on multi-frequency selective harmonic elimination / C. Zhao, D. Costinett, B. Trento, D. Friedrichs // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA*. – 2016. – P. 3577–3584.
8. Esteve V. Comparative Study of a Single Inverter Bridge for Dual-Frequency Induction Heating Using Si and SiC MOSFETs // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – March 2015. – Vol. 62, No. 3. – P. 1440–1450.
9. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Шпицын В.В. Многоинверторные среднечастотные преобразователи в системах электропитания индукционных установок // *Электротехника*. – 2002. – № 9. – С. 57–63.
10. Пат. 2 400 018 РФ, МПК Н 05 В 6/04. Трехфазный с нулевым выводом двухчастотный инвертор тока для индукционного нагрева / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, И.В. Черных, В.В. Шпицын, И.Е. Лопатин. – № 2009 120 864/09. заявл. 01.06.2009; опубл. 20.09.2010. – Бюл. № 26.
11. Дзлиев С.В. Принципы построения систем питания установок индукционной закалки зубчатых колес при двухчастотном нагреве // *Международ. науч.-техн. конф. «АРИН05»*. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2005. – С. 193–201.
12. Пат. 2 399 168 РФ, МПК Н 05 В 6/06. Способ формирования двухчастотного тока индуктора и устройство для формирования двухчастотного тока индуктора / С.К. Земан, Ю.М. Казанцев, А.В. Осипов, А.В. Юшков. – № 2009 120 734/09. заявл. 2009.06.01; опубл. 2010.09.10.
13. Земан С.К. Двухчастотный преобразователь частоты на основе широтно-импульсной модуляции / С.К. Земан, А.В. Осипов, А.В. Юшков // *Всерос. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР»*. – 2010. – С. 184–187.
14. Основы теории колебаний / В.В. Мигулин, В.И. Медведев, Е.Р. Мустель, В.Н. Парыгин. – М.: Наука, 1978. – 392 с.
15. Формирование двухчастотных колебаний тока в системах индукционного нагрева / С.К. Земан, Ю.М. Казанцев, А.В. Осипов, А.В. Юшков // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2009. – Т. 315, № 4. – С. 105–111.
16. Юшков А.В. Энергетически эффективные преобразователи частоты для двухчастотной индукционной плавки: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2012. – 131 с.

## Осипов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-44-75  
Эл. почта: ossan@mail.ru

Osipov A.V.

**Synthesis of two-frequency current by a parallel-to-series resonant LCLC-converter with multiple pulse-width modulation**

The methods to form a two-frequency inductor current in a resonant converter with multiple pulse-width modulation for systems of induction heating of complex surface shape bodies are considered. The study of the methods used to form and to regulate the frequency components of the inductor current is carried out. The approaches to assess the energy efficiency of two-frequency converters are proposed and its assessment is carried out for multiple PWM by the values of power factors and overall power. It is shown that the high-frequency harmonic is formed by two components: the one that is generated by multiple modulation and the one contained in the rectangular voltage of low frequency, the latter significantly affects the energy characteristics. The advantages in terms of energy of bipolar PWM over unipolar PWM are shown.

**Keywords:** resonant LCLC-converter, multiple pulse width modulation, dual frequency induction heating, energy performance.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-75-82

## References

1. Esteve V., Jordan J., Dede E. J., Sanchis-Kilders E., Maset E. Induction heating inverter with simultaneous dual-frequency output. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2006, vol. 1, no. 5, pp. 1505–1509.
2. Schwenk W. The simultaneous dual-frequency method of inductive gear hardening. *Gear solutions*, 2003, May, pp. 24–31.
3. Peter H.-J., Schwenk W. Applications for surface induction hardening using SDF Induction Heat Treating. *Elektrowärme International*, 2002, no. 60, pp. 13–18.
4. Schwenk W. Simultaneous Dual-Frequency Induction Hardening. *Heat treating Progress*, April–May 2003, p. 35–38.
5. Yun D., Park H., Koo J. H., Ham S., Lee S., Investigation of Heat Treatment of Gears Using a Simultaneous Dual Frequency Induction Heating Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1–4.
6. Diong B., Basireddy S., Corzine K., Familiant Y. Multilevel inverters with equal or unequal sources for dual-frequency induction heating. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, Nineteenth Annual IEEE APEC'04*, 2004, vol. 2, pp. 825–831.
7. Zhao C., Costinett D., Trento B., Friedrichs D. A single-phase dual frequency inverter based on multi-frequency selective harmonic elimination. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach*, 2016, pp. 3577–3584.
8. Esteve V. Comparative Study of a Single Inverter Bridge for Dual-Frequency Induction Heating Using Si and SiC MOSFETs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, March 2015, vol. 62, no. 3, pp. 1440–1450.
9. Luzgin V.I., Petrov A.Yu., Shipicyn V.V., Yakushev K.V. [Multi-inverter medium frequency converters in induction plants power supply systems]. *Electrical engineering*, 2002, no. 9, pp. 57–63 (in Russ.).

10. Luzgin V.I., Petrov A.Yu., Chernish I.V., Tshipitsin V.V., Lopatin I.E. *Trehfaznyj s nulevym vyvodom dvuhchastotnyj inverter toka dlja indukcionnogo nagreva* [Three Phase Zero Lead Dual Frequency Inverter for Induction Heating] Patent RF, no. 2400018, 2009 (in Russ.).

11. Dzljev S.V. [Principles of building power systems for induction hardening of gears with dual-frequency heating]. Actual problems of induction heating. Conf. «APIH05», St. Petersburg, SPb Electrotechnical University publ., 2005, pp. 193–201 (in Russ.).

12. Zeman S.K., Kazantsev Yu.M., Osipov A.V., Yushkov A.V. *Sposob formirovaniya dvuhchastotnogo toka induktora i ustrojstvo dlja formirovaniya dvuhchastotnogo toka induktora* [A method for forming a two-frequency inductor current and a device for forming a two-frequency inductor current] Patent RF, no. 2399168, 2005 (in Russ.).

13. Zeman S.K., Osipov A.V., Yushkov A.V. [Dual-frequency frequency converter based on pulse width modulation]. Scientific-practical conference «TUSUR Scientific session», 2010, pp. 184–187 (in Russ.).

14. Migulin V.V., Medvedev V.I., Mustel E.R., Parigin V.N. [Fundamentals of vibration theory]. Moscow, Science, 1978. 392 p. (in Russ.).

15. Zeman S.K., Kazantsev Yu.M., Osipov A.V., Yushkov A.V. [Formation of two-frequency current oscillations in induction heating systems]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 105–111 (in Russ.).

16. Yushkov A.V. *Jenergeticheski jeffektivnye preobrazovateli chastoty dlja dvuhchastotnoj indukcionnoj plavki* [Energy efficient frequency converters for dual frequency induction melting. Cand. Diss.]. Tomsk, 2012 (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

УДК 629.78.064.5, 621.311.6

Р.В. Козлов, В.Г. Букреев, А.Т. Лелеков

## Методика оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата

Предлагается методика оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания (СЭП) геостационарного космического аппарата (КА) на основе критерия выходной удельной мощности. Рассматривается СЭП с энергопреобразующей аппаратурой, содержащей в своем составе мостовые квазирезонансные преобразователи с гальванической развязкой. Приведены результаты оценки энергетической эффективности таких силовых преобразователей при различных диапазонах значений входных напряжений. При оптимизации критерия удельной мощности СЭП учитываются условия положительного энергетического баланса космического аппарата. Отражены результаты оптимизации энергомассовых характеристик СЭП рассмотренной структуры и состава для мощности полезной нагрузки КА на 6 и 13 кВт.

**Ключевые слова:** система электропитания космического аппарата, имитационная модель, удельная мощность, оптимизация энергомассовых характеристик.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-83-90

Одной из основных задач, которая решается при проектировании систем и устройств геостационарных космических аппаратов, является задача повышения энергомассовых характеристик систем электропитания. Решение данной задачи для геостационарных КА особенно актуально, поскольку стоимость вывода аппарата на орбиту (например, 36 тыс. км) имеет максимальное значение по сравнению с более низкими орбитами [1]. Кроме того, в отличие от низкоорбитальных КА, которые имеют различный и резко переменный график работы полезной нагрузки, геостационарные аппараты предназначены, в основном, для осуществления услуг связи и ретрансляции, т.е. имеют постоянную мощность нагрузки. Это дает возможность рассматривать геостационарные КА как класс, для которого возможно разработать универсальные решения в части повышения энергомассовых характеристик СЭП.

В состав оборудования современных СЭП геостационарных КА входят: солнечная батарея (СБ), комплект литий-ионных аккумуляторных батарей (АБ), энергопреобразующая аппаратура (ЭПА) в составе зарядного (ЗУ) и разрядного (РУ) устройств, а также стабилизатора выходного напряжения (СН), прибор контроля и защиты АБ (ПКЗ АБ). Обобщенная структурно-функциональная схема СЭП современных геостационарных КА представлена на рис. 1.

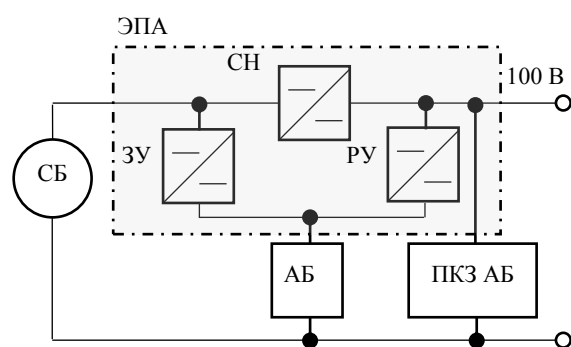


Рис. 1. Структурно-функциональная схема СЭП

Главным показателем эффективности СЭП является её удельная мощность (при сохранении остальных показателей), максимизировать которую можно различными способами – оптимизируя характеристики элементов СЭП, её структуру или режимы её работы. Например, в статье [2] максимизируются характеристики СБ геостационарного КА путём подбора количества последовательно и параллельно включённых фотопреобразователей (ФП); строятся кривые ВАХ ФП для начала и конца (с учётом деградации) срока существования КА, по которым рассчитываются выходные характеристики СБ; используются генетические алгоритмы оптимизации. Такие алгоритмы используются в статье [3], где по критерию минимальной массы или стоимости оптимизируется состав СЭП; из набора вариантов каждого блока (типа ФП, аккумулятора) подбираются состав СЭП и формулы батареи.

В работе [4] та же задача решается выбором оптимальной структуры СЭП и её компонентов (простым перебором вариантов), проверка решения проводится имитационным моделированием в Simulink. Примерно такой же подход и в статьях [5, 6], где после выполнения условий энергобаланса строятся графики, по которым и находится оптимальный вариант.

В диссертационной работе [7] задачу оптимизации удельной мощности и стоимости СЭП решают методами линейного программирования; все нелинейности (характеристики СБ и АБ) линеаризуют, задают ограничения на переменные (напряжение шины, формулы СБ и АБ), записывают уравнения энергобаланса, далее минимизируют функционал, отражающий удельную мощность.

В обзорной статье [8] рассматривается оптимизация параметров наземных солнечных электростанций; хотя у них есть большие отличия в целевой функции (нет ограничения массы, случайный характер освещённости и нагрузки и др.), многие применяемые подходы имеют параллели с задачей проектирования СЭП космического применения.

В статье [9] задача оптимизации решается итерационно, имитационным моделированием циклограммы работы и расчётом энергобаланса; на каждом участке рассчитываются температура и мощность СБ, определяется режим работы СЭП в зависимости от соотношения мощности, отбираемой от СБ, и мощности потребления нагрузки; для каждого режима рассчитываются соответствующие напряжения и токи источников энергии и силовых преобразующих устройств, степень заряженности АБ, потери мощности во всех устройствах СЭП; массы систем рассчитываются через удельные показатели. К недостаткам такой методики следует отнести то, что дискретные параметры систем выбираются из непрерывного ряда; поиск ведётся для заранее определённых вариантов, что не гарантирует нахождения глобального оптимума; после нахождения оптимального варианта требуется дополнительное уточнение параметров СЭП.

Одним из вариантов повышения энергоэффективности характеристик СЭП геостационарных КА является применение новых схемотехнических решений, которые применяются в силовых преобразователях ЭПА. Так, за последнее время было разработано несколько СЭП, где силовые преобразователи выполнены по схеме мостовых квазирезонансных инверторов [10]. Удельная мощность преобразователей, выполненных по схеме мостовых квазирезонансных инверторов, несколько хуже, чем у классических, из-за наличия большего числа транзисторов, трансформатора и сложного устройства управления.

Вместе с тем на уровне ЭПА применение таких преобразователей позволяет добиться выигрыша по удельным характеристикам за счет исключения силовых коммутаторов и снижения массы фильтров [14]. Разрабатываемые на базе мостовых квазирезонансных инверторов ЭПА позволяют обеспечить удельную мощность ЭПА на уровне 400 Вт/кг, в сравнении: 150...170 Вт/кг удельной мощности ЭПА на базе классических преобразователей [15, 16]. При этом ключевое преимущество квазирезонансных преобразователей с гальванической трансформаторной развязкой перед классическими понижающими и повышающими преобразователями заключается в том, что они обеспечивают возможность произвольного задания уровней входных напряжений.

Авторами статьи проведен анализ энергетической эффективности опытных образцов силовых модулей ЭПА, выполненных по схеме мостовых квазирезонансных инверторов, в различных диапазонах выходных напряжений АБ и СБ. Оценка энергетической эффективности проводилась по результатам испытаний модуля стабилизатора напряжения (СН) и разрядного устройства (РУ) с номиналом выходного напряжения 100 В. При этом модуль СН спроектирован для работы на ветви напряжения СБ.

Оценка параметров энергетической эффективности проводилась по методике, приведенной в [11]. Результаты оценки приведены в табл. 1.

В соответствии с методикой [11] потери в преобразователях описываются двумя константами линейной модели вида

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \cdot k - b,$$

где  $b$  – «собственное потребление» преобразователя не зависящее от текущего значения выходной мощности, Вт;  $k$  – «коэффициент передачи мощности», показывающий какую долю входной мощности преобразователь передает в нагрузку, %;  $P_{\text{вых}}$  и  $P_{\text{вх}}$  – выходная и входная мощности преобразователя соответственно, Вт.

Таблица 1

Результаты оценки параметров энергетической эффективности силовых преобразователей

Образец	Диапазон входных напряжений, В	Коэффициент передачи мощности, %	Собственное потребление, Вт
СН	104...150	94,7	6,8
РУ	64...90	95,7	7,5

Коэффициенты передачи мощности (КПМ) обоих устройств отличаются не более чем на 1,5% при сравнимом собственном потреблении и идентичной массе и выходной мощности модулей. Таким образом, в случае если значение выходного напряжения находится внутри диапазона значений входного напряжения, параметры энергетической и энергоэффективности квазирезонансного преобразователя будут не хуже представленных в табл. 1. При этом нахождение значения выходного напряжения внутри диапазона входных напряжений для классических ШИМ преобразователей требует наличия в составе силового модуля как повышающего, так и понижающего преобразователя, что существенно снижает энергоэффективные характеристики силового модуля.

Применение в ЭПА мостовых квазирезонансных инверторов дает возможность варьировать параметрами межблочного силового электрического интерфейса СЭП с сохранением параметров энергетической и энергоэффективности ЭПА. При этом оказывается возможным осуществить оптимизацию энергоэффективных характеристик СЭП в целом, когда за счет незначительного снижения энергоэффективных характеристик одних составных частей осуществляется существенное повышение энергоэффективных характеристик других составных частей СЭП.

Оптимизация энергоэффективных характеристик СЭП осуществляется за счет изменения количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ. Независимое изменение количества последовательно соединенных элементов в АБ и СБ приводит к изменению их массы, массы бортовой кабельной сети (БКС), ЭПА и ПКЗ АБ. Действительно, увеличение количества последовательно соединенных ФП в СБ должно приводить к снижению массы БКС за счет снижения максимального тока СБ. Увеличение количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ (при фиксированной энергоёмкости АБ) приводит к увеличению массы АБ за счет роста доли массы конструкции в массе АБ и к увеличению массы ПКЗ АБ за счет роста требуемого количества каналов контроля. Но при этом снижается масса БКС между АБ и ЭПА за счет снижения максимальных значений тока разряда АБ.

Для достижения оптимальных энергомассовых характеристик СЭП требуется найти экстремум отношения ее выходной мощности к массе. В общем виде данный функционал можно определить следующими выражениями:

$$P_{уд} = P_{вых}/M \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$M = M_{АБ} + M_{СБ} + M_{ЭПА} + M_{ПКЗ\ АБ} + M_{БКС\ СБ} + M_{БКС\ АБ}, \quad (2)$$

$$M_{АБ} = f_1(C_{АБ}, N_{АКК\ посл}), \quad (3)$$

$$M_{СБ} = f_2(N_{ФП\ посл}, N_{ФП\ паралл}), \quad (4)$$

$$M_{ЭПА} = f_3(P_{вых}, I_{АБ\ P_{max}}, I_{АБ3_{max}}, I_{СБ_{max}}, \quad (5)$$

$$M_{ПКЗ\ АБ} = f_4(N_{АКК\ посл}), \quad (6)$$

$$M_{БКС\ СБ} = f_5(I_{СБ_{max}}), \quad (7)$$

$$M_{БКС\ АБ} = f_6(I_{АБ\ P_{max}}), \quad (8)$$

где  $P_{уд}$  – удельная выходная мощность СЭП, Вт/кг;  $P_{вых}$  – выходная мощность СЭП, определяемая циклограммой нагрузки, Вт;  $M$  – масса СЭП, кг;  $M_{АБ}$ ,  $M_{СБ}$ ,  $M_{ЭПА}$ ,  $M_{ПКЗ\ АБ}$ ,  $M_{БКС\ СБ}$ ,  $M_{БКС\ АБ}$  – массы АБ, СБ, ЭПА, ПКЗ АБ, БКС СБ, БКС АБ соответственно, кг;  $C_{АБ}$  – ёмкость аккумуляторов в АБ, А×ч;  $N_{АКК\ посл}$  – количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, шт.;  $N_{ФП\ посл}$ ,  $N_{ФП\ паралл}$  – количество последовательно и параллельно соединенных ФП в СБ, шт.;  $I_{АБ\ P_{max}}$  – максимальный ток разряда АБ, А;  $I_{АБ3_{max}}$  – максимальный ток заряда АБ, А;  $I_{СБ_{max}}$  – максимальный ток СБ, А;  $f_1 - f_6$  – функции зависимости массы составных частей СЭП от их параметров.

Методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА при изменении последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ заключается в следующем.

1. Формируется перечень режимов функционирования КА на орбите, которые определяют требования к характеристикам составных частей СЭП: СБ, АБ, ПКЗ АБ и ЭПА.

2. Определяются диапазоны изменения количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ.

3. На основе имитационной модели осуществляется расчет характеристик СЭП, удовлетворяющих условию положительного энергетического баланса в заданных расчетных случаях для всех значений количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ из заданного диапазона. В ходе имитационного моделирования в каждом расчетном случае определяются следующие характеристики:

- емкость комплекта АБ и требуемое количество параллельно соединенных ФП в СБ для обеспечения положительного энергетического баланса;
- количество проводов заданного сечения силовой кабельной сети между АБ и ЭПА, а также между СБ и ЭПА;
- количество каналов контроля и управления аккумуляторов в ПКЗ АБ;
- количество силовых модулей заданной мощности и энергетической эффективности в ЭПА;
- рабочие диапазоны напряжений и токов силового электрического интерфейса между СБ и ЭПА, а также между АБ и ЭПА;

- массы элементов СЭП: СБ, АБ, ПКЗ АБ, ЭПА, БКС СБ, БКС АБ;

- значение удельной мощности СЭП определяется в виде отношения значений выходной мощности к массе СЭП.

4. Формируется матрица значений массы СЭП размерностью  $[n; m]$ , где  $n$  – диапазон изменения количества последовательно соединенных ФП в СБ, а  $m$  – диапазон количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ.

5. Осуществляется поиск соответствующих минимальному значению массы СЭП значений количества, последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ.

Рассмотрим далее применение методики и алгоритма для оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА с мощностью полезной нагрузки 6 и 13 кВт.

Характеристики системы электропитания космического аппарата должны быть выбраны таким образом, чтобы во всех режимах функционирования КА соблюдались условия положительного энергетического баланса.

Критерием положительного энергетического баланса является выполнение следующих условий:

- положительная разность зарядной и разрядной энергий комплекта АБ на наиболее энергонапряженном витке;

- достаточность мощности СБ для питания нагрузки и обеспечения заряда комплекта АБ.

Для выполнения этого критерия необходимо при заданной циклограмме нагрузки КА подобрать требуемые параметры СЭП:

- ёмкость комплекта аккумуляторных батарей и количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ;

- мощность солнечной батареи, т.е. количество последовательно и параллельно соединенных фотопреобразователей в СБ;

- учесть в энергетическом балансе КА потери в бортовой кабельной сети, а также в элементах СЭП.

Для расчета энергетического баланса геостационарного КА используются следующие условия функционирования КА:

- 1) конец срока активного существования (САС), момент осеннего равноденствия;
- 2) конец САС, момент летнего солнцестояния;
- 3) начало САС, момент осеннего равноденствия.

В табл. 2 приведены характерные особенности приведенных условий, а также характеристики СЭП, которые должны быть определены при расчете энергетического баланса КА в данных условиях.

Качественно циклограммы нагрузки для геостационарного КА, которые должны быть использованы для расчета энергетического баланса, представлены на рис. 2.

В качестве инструмента для определения параметров СЭП и расчета энергетического баланса используется имитационная модель СЭП в статических режимах работы, определяемых мощностью нагрузки и условиями освещенности СБ [12].

Расчетные случаи для расчета энергетического баланса КА

Расчетный случай	Особенности условий функционирования КА	Определяемые характеристики СЭП
Конец САС, осеннее равноденствие	Максимальная длительность теневого участка Земли (ТУЗ). Сочетание максимальной длительности ТУЗ и минимальной освещенности при максимальной длительности ТУЗ. Максимальные требования по энергопотреблению КА с учетом возможного перехода в режим автономной солнечной ориентации	Энергоемкость и масса комплекта АБ. Требуемая в конце САС мощность СБ. Параметры межблочного силового электрического интерфейса СЭП (максимальные и минимальные значения токов и напряжений СБ, АБ и ЭПА на интерфейсе с СБ и АБ). Масса СБ. Масса БКС СБ и БКС АБ. Масса ПКЗ АБ. Значения потерь электрической энергии в элементах СЭП
Конец САС, летнее солнцестояние	Минимальная освещенность СБ на витке без ТУЗ	Требуемая в конце САС мощность СБ (подтверждение)
Начало САС, осеннее равноденствие	Сочетание максимальной длительности ТУЗ и минимальной освещенности при максимальной длительности ТУЗ в начале САС	Максимальное напряжение холостого хода СБ. Масса ЭПА в части наличия или отсутствия регулятора (ограничителя) максимального напряжения СБ

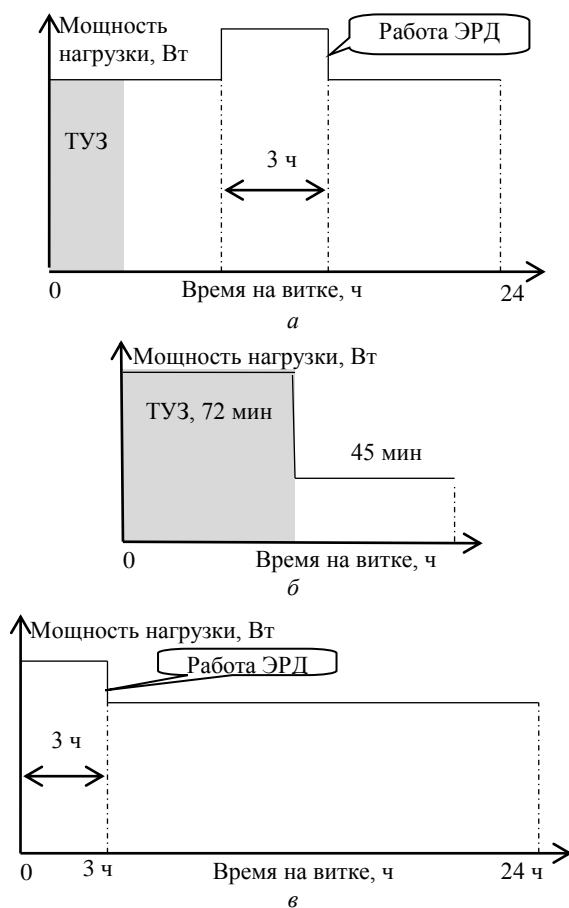


Рис. 2. Общий вид циклограмм нагрузки геостационарного КА: *a* – прохождение ТУЗ максимальной длительности в штатном режиме с последующим проведением коррекции удержания орбиты КА; *б* – прохождение ТУЗ максимальной длительности с последующим переходом в режим аппаратной солнечной ориентации (РАСО); *в* – проведение коррекции удержания орбитальной позиции КА; ЭРД – электрореактивный двигатель

Модель состоит из моделей СБ, АБ, силовой кабельной сети СЭП, энергетической модели ЭПА, включает в себя алгоритм, который реализует преимущественное использование и экстремальное регулирование мощности СБ, а также заряд АБ в режиме ограничения тока и в квазипотенциостатиче-

ском режиме. Также модель имеет в своем составе блоки задания мощности нагрузки, мощности солнечного излучения. Результат работы модели для расчетного случая функционирования КА в конце САС в период осеннего равноденствия по циклограмме нагрузки в соответствии с рис. 2, *a* представлен на рис. 3.

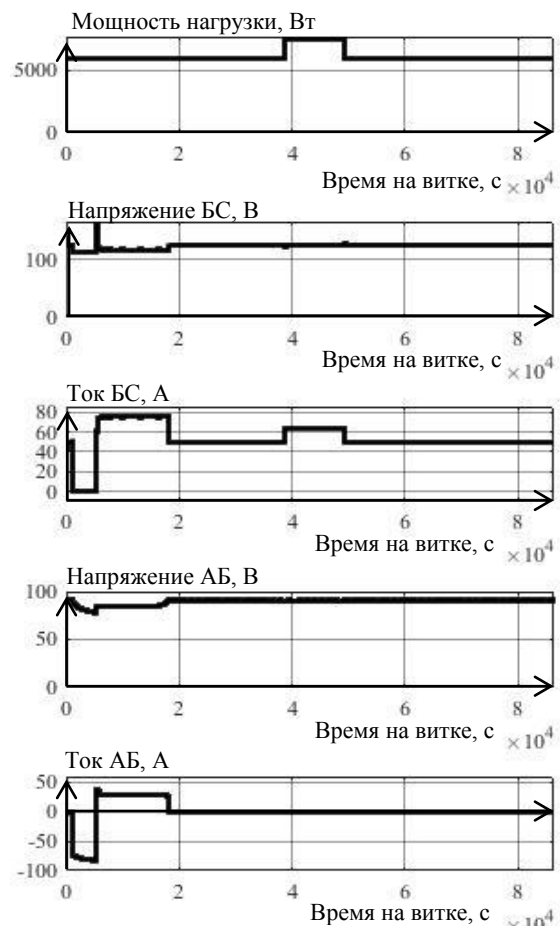


Рис. 3. Графики изменения параметров СЭП при работе по программе типового витка

Использование имитационной модели СЭП позволяет осуществить расчет энергетического баланса при заданной циклограмме нагрузки и услови-

ях освещенности и подбор минимально необходимых требований к энергоёмкости АБ и мощности СБ.

Для оптимизации энергоёмких характеристик СЭП геостационарного КА требуется осуществить перебор значений количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ из заданного диапазона при соблюдении условий положительного энергетического баланса КА. В свою очередь, соблюдение условий положительного энергетического баланса КА требует подбора значений ёмкости комплекта АБ и количества параллельно соединенных ФП в СБ при заданном количестве последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ. Таким образом, для решения задачи оптимизации энергоёмких характеристик СЭП требуется варьировать четырьмя параметрами, минимизируя массу системы как функцию этих параметров с учетом имеющихся условий функционирования и ограничений.

Данная задача может быть решена с использованием алгоритмов многомерной оптимизации (метод Нелдера–Мида, генетические алгоритмы и т.п.). Однако в этом случае необходимо сформировать достаточно сложную целевую функцию, которая должна учитывать все расчетные случаи и ограничения параметров. При этом в ходе расчета необходимо будет вычислить значительное количество расчетных случаев, при которых условия положительного энергетического баланса не выполняются, поскольку при заданном количестве последовательно соединенных ФП и аккумуляторов количество параллельно соединенных ФП и ёмкость комплекта АБ требуется варьировать в достаточно широких пределах. Кроме того, функция массы СЭП будет иметь локальные минимумы, которые обусловлены дискретным характером изменения массы некоторых составных частей системы за счет изменения количества модулей оборудования. Поэтому решение задачи оптимизации энергоёмких характеристик СЭП с использованием алгоритмов многомерной оптимизации создает риск получения недостоверного результата.

Вместе с тем существует ряд особенностей, которые позволяют сформировать алгоритм оптимизации энергоёмких характеристик СЭП, который лишен недостатков, указанных выше. Эти особенности заключаются в следующем:

- три из четырех независимых параметров (количество последовательно и параллельно соединенных ФП и количество последовательно соединенных аккумуляторов) изменяются дискретно в заданном диапазоне значений, и лишь ёмкость комплекта АБ изменяется непрерывно, т.е. применение численных методов поиска решения требуется лишь для определения ёмкости комплекта АБ, а остальные параметры могут быть найдены простым перебором в заданном диапазоне допустимых значений;

- значение ёмкости аккумулятора (или пакета аккумуляторов) для заданного количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ опреде-

ляется в единственном расчетном случае, которым является прохождение ТУЗ максимальной длительности с последующим переходом в РАСО в условиях осеннего равноденствия в конце САС. Ёмкости АБ, определенной для данного расчетного случая гарантированно будет достаточно для прохождения ТУЗ максимальной длительности;

- условие применения в составе ЭПА ЭРМ СБ обеспечивает достаточность мощности и площади СБ, определенной в условиях осеннего равноденствия в конце САС, для условий летнего солнцестояния в конце САС. Это означает, что для определения параметров СБ (мощность и площадь) достаточно провести расчеты энергетического баланса в условиях осеннего равноденствия в конце САС.

Данные особенности позволяют сформировать следующий порядок расчета параметров СЭП геостационарного КА и поиска максимума энергоёмких характеристик СЭП в заданном диапазоне изменения количества последовательно соединенных ФП и аккумуляторов.

1. Определение требуемой ёмкости комплекта АБ для каждого из заданных в области допустимых значений количества последовательно соединенных в АБ аккумуляторов (пакетов аккумуляторов) с использованием численных методов оптимизации. Расчеты осуществляются для случая прохождения ТУЗ максимальной длительности с последующим переходом в РАСО в условиях осеннего равноденствия в конце САС (см. рис. 2, б). Диапазон изменения количества последовательно соединенных в АБ аккумуляторов принимается от 10 до 59 шт. и обусловлен имеющимися ограничениями в части максимального напряжения АБ.

2. Формирование диапазона количества последовательно соединенных ФП в СБ из области допустимых значений, обусловленной имеющимися ограничениями в части максимального напряжения СБ. Диапазон изменения количества последовательно соединенных ФП в СБ принимается от 30 до 79 шт.

3. Поиск минимального количества параллельно соединенных ФП в СБ, обеспечивающих выполнение условий неотрицательного энергетического баланса для расчетного случая в соответствии с рис. 2, а (виток с прохождением ТУЗ максимальной длительности) в условиях осеннего равноденствия в конце САС.

4. Подтверждение достаточности мощности СБ для выполнения условий положительного энергетического баланса КА в условиях согласно рис. 2, в.

5. Формирование матрицы значений количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ, каждому сочетанию значений которых соответствует значение массы СЭП.

Таким образом:

- каждому значению последовательно соединенных аккумуляторов в АБ ставится в соответствие минимально необходимое значение ёмкости комплекта АБ, удовлетворяющее условию обеспечения положительного энергетического баланса;



- каждому значению количества последовательно соединенных ФП в СБ ставится в соответствие минимально необходимое количество параллельно соединенных ФП в СБ, удовлетворяющее условию обеспечения положительного энергетического баланса;

- каждому сочетанию количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ ставится в соответствие значение массы СЭП заданной выходной мощности.

Масса СЭП геостационарного КА для выбранной выходной мощности определяется путем расчета имитационной модели СЭП при известных значениях параметров СБ и АБ исходя из действующих значений параметров СЭП в заданном расчетном случае по данным технических характеристик прототипов оборудования системы электропитания, указываемых производителями данного оборудования.

Далее приведены результаты оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарных КА мощностью 13 и 6 кВт в сравнении со значениями удельных характеристик СЭП, которые получены с использованием количества последовательных элементов в СБ и АБ известных образцов СЭП геостационарных КА. Для известных решений количество последовательно соединенных ФП в СБ составляет 54 шт., а аккумуляторов в АБ – 20 шт.

Результаты расчета оптимальных энергомассовых параметров в виде графика зависимости удельной мощности СЭП от количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ для СЭП мощностью 13 кВт представлены на рис. 4.

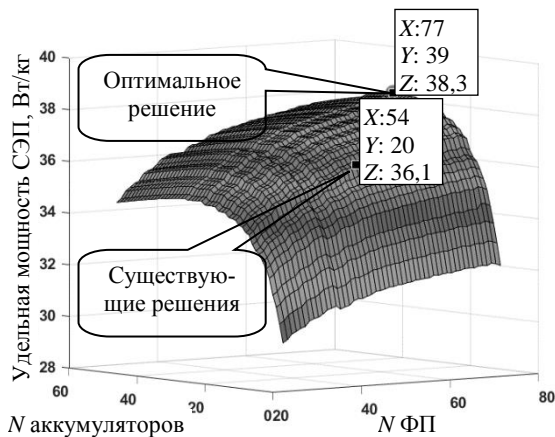


Рис. 4. График удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 13 кВт

Позиция параметров СЭП, соответствующих наибольшему значению удельной мощности, отмечена графике. Максимальное значение удельной мощности СЭП достигается при количестве последовательно соединенных ФП в СБ, равном 77 шт., и количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, равном 39 шт.

На рис. 4 и далее количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и ФП в СБ обозначены как « $N$  ФП» и « $N$  аккумуляторов» соответственно.

Таким образом, найдены параметры СЭП выходной мощностью 13 кВт рассматриваемой структуры и состава, при которых удельная мощность СЭП является максимальной для рассматриваемого диапазона изменения количества последовательно соединенных элементов в СБ и АБ.

Оптимизация энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА выходной мощностью 6 кВт показывает, что масса СЭП становится минимальной при количестве последовательно соединенных ФП в СБ, равном 78 шт., и количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, равном 34 шт.

График удельной мощности СЭП для выходной мощности 6 кВт показан на рис. 5. Значение максимальной удельной мощности СЭП при оптимальных параметрах СБ и АБ составляет 33,1 Вт/кг.

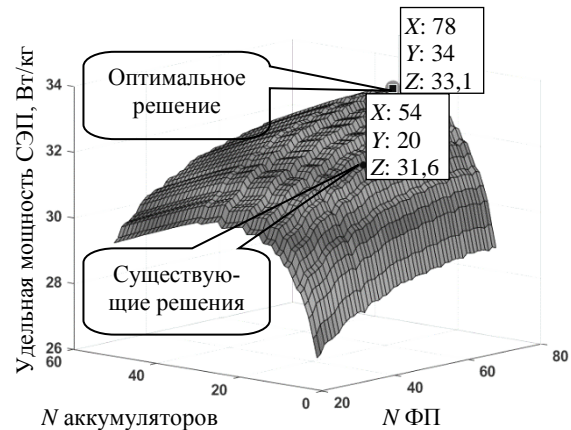


Рис. 5. График удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 6 кВт

Анализ результатов показывает, что при увеличении количества последовательно соединенных ФП в СБ удельная мощность СЭП ожидаемо растет. Поэтому повышение удельной мощности при увеличении количества последовательно соединенных ФП в СБ ограничено только максимальным значением рабочего напряжения силовых транзисторов преобразователей ЭПА.

При изменении количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ на графике удельной мощности СЭП наблюдается экстремум. Максимальное значение удельной мощности СЭП наблюдается при значении количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ 34...39 шт. для диапазона выходной мощности СЭП от 6 до 13 кВт. Экстремальный характер изменения удельной мощности СЭП при увеличении количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ обусловлен ухудшением удельной энергоемкости АБ, ростом массы ПКЗ АБ и снижением массы БКС между АБ и ЭПА. Увеличение количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, которое соответствует экстремуму энергомассовых характеристик СЭП, при росте выходной мощности СЭП обусловлено тем, что масса АБ и БКС между АБ и ЭПА пропорциональна выходной мощности, а масса ПКЗ АБ от нее не зависит. Поэтому с ростом выходной

мощности изменение параметров ПКЗ АБ, а именно количества каналов контроля и массы, оказывает меньшее влияние на результаты оптимизации. Следует ожидать, что при выходной мощности СЭП, превышающей 13 кВт, оптимальное значение количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ должно составить более 39 шт. (ориентировочно 40...42 шт.).

Повышение удельной мощности СЭП геостационарного КА в результате оптимизации ее энергомассовых характеристик относительно существующих решений в части количества последовательных элементов СБ и АБ составляет 3,4% для СЭП мощностью 6 кВт и 4,9% для СЭП мощностью 13 кВт.

### **Заключение**

Разработанная методика позволяет выполнить параметрическую оптимизацию энергомассовых характеристик СЭП и задать требования к СЭП предложенной структуры и типа силовых преобразователей ЭПА, обеспечивающие достижение максимальной удельной мощности СЭП в заданном диапазоне изменения количества последовательно соединенных фотопреобразователей в СБ и аккумуляторов в АБ. Для заданной области параметров методика позволяет определить глобальный минимум массы системы при удовлетворении требований по мощности и положительности энергобаланса.

Предварительная оценка итоговых результатов исследований показывает, что оптимизация по предложенной методике энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА мощностью 6 кВт позволяет снизить массу СЭП на 3,4%, а для СЭП мощностью 13 кВт – на 4,9% относительно известных решений в части количества последовательно соединенных элементов в СБ и АБ. По экспертной оценке указанное повышение энергомассовых характеристик СЭП для КА тяжелого класса с мощностью полезной нагрузки 13 кВт позволит установить дополнительно как минимум один транспондер полезной нагрузки. Экономический эффект от введения дополнительно одного транспондера полезной нагрузки составляет около 300...450 млн руб. для одного геостационарного КА тяжелого класса.

### *Литература*

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская изд. фирма, 1994. – 318 с.
2. Oukil S. Geostationary Communication Satellite Solar Array Optimization Using Gravitation Search Algorithm / S. Oukil, A. Boudjemai // *Journal of Aerospace Technology and Management*. – 2020. – No. 12. – 25 p.
3. Trade-off analysis of low earth orbit spacecraft power supply system by Genetic algorithm / А.М. Mohamed, F.E. Amer, R.M. Mostafa, A.A. Mahmoud // 2016 IEEE Aerospace Conference. – Big Sky, MT, USA: IEEE, 2016. – 13 p.
4. Magalhães R.O. Space Power Topology Selection and its System Level Modeling and Control / R.O. de Magalhães, H.P. Moreira // *Journal of Aerospace Technology and Management*. – 2020. – No. 12. – 18 p.

5. Madhusudhana C.S. Modeling for evaluating efficiency of spacecraft power systems / C.S. Madhusudhana, G.N.V. Prasad, C.D. Sridhara // 2014 Power and energy systems conference: towards sustainable energy. – Bangalore, India: IEEE, 2014. – 7 p.

6. Asif S. Spacecraft Power Subsystem Technology Selection / S. Asif, Y. Li // 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – Windsor, UK: IEEE, 2006. – 7 p.

7. Flath A. Mathematical Programming Approach for the Design of Satellite Power Systems: master's thesis. – Kentucky, USA: University of Kentucky Libraries, 2019. – 73 p.

8. Alsadi S. Photovoltaic Power Systems Optimization Research Status: A Review of Criteria, Constrains, Models, Techniques, and Software Tools / S. Alsadi, T. Khatib // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8, No. 10. – P. 1761.

9. Шиняков Ю.А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения автоматических космических аппаратов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 152–155.

10. Столяров А.Н. Модуль разрядного устройства на основе резонансного преобразователя с повышенным КПД в широком диапазоне входных напряжений / А.Н. Столяров, Д.И. Польшин // *Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XX науч.-техн. конф. (16–17 апр. 2020 г., Томск) АО «НПЦ «Полус»*. – Томск, 2020. – С. 37–40.

11. Нестеришин М.В. Методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов / М.В. Нестеришин, В.Г. Букреев, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // *Доклады ТУСУР*. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 112–118.

12. Simulation Model of Spacecraft Power System for Power Balance Calculation / R.V. Kozlov, V.G. Bukreev, M.V. Nesterishin, A.T. Lelekov // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk: IEEE, 2020. – 7 p.

13. Stark J. *Electrical Power Systems*. – NY: John Wiley & Sons, 2011. – 356 p.

14. Бугай Т.В. Конструктивные особенности модулей энергопреобразующей аппаратуры нового поколения / Т.В. Бугай, В.В. Быков, А.М. Гильжинский // *Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XIX науч.-техн. конф.* – Томск: АО «НПЦ «Полус», 2015. – С. 16–18.

15. Борисенко В.Ю. Энергопреобразующая аппаратура нового поколения / В.Ю. Борисенко, Р.В. Козлов, К.В. Тараканов // *Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XIX науч.-техн. конф.* – Томск: АО «НПЦ «Полус», 2015. – С. 15–16.

16. Крючков П.А. Анализ достигнутых характеристик систем электропитания платформ «Экспресс-1000Н» и «Экспресс-2000» / П.А. Крючков, Д.С. Карплюк // *Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XIX науч.-техн. конф.* – Томск: АО «НПЦ «Полус», 2015. – С. 11–13.

### **Козлов Роман Викторович**

Нач. группы отд. бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева  
 Ленина ул., 52, г. Железногорск, Россия, 692972  
 Тел.: +7 (391-9) 76-41-57  
 Эл. почта: krv@iss-reshetnev.ru

**Букреев Виктор Григорьевич**

Д-р техн. наук, профессор  
 Национальный исследовательский  
 Томский политехнический университет (НИ ТПУ)  
 Ленина пр., 30, г. Томск, Россия, 634050  
 Тел.: +7 (382-2) 56-40-45  
 Эл. Почта: [bukreev@tpu.ru](mailto:bukreev@tpu.ru)

**Лелеков Александр Тимофеевич**

Канд. техн. наук, с.н.с. лаборатории космических систем  
 и технологий Федерального исследовательского центра  
 «Красноярский научный центр  
 Сибирского отделения Российской академии наук»  
 Академгородок, 50, г. Красноярск, Россия, 660036  
 Тел.: +7 (391-2) 49-45-85  
 Эл. почта: [lelekov@iph.krasn.ru](mailto:lelekov@iph.krasn.ru)

Kozlov R.V., Bukreev V.G., Lelekov A.T.

**Optimization technique for energy mass characteristics of the EPS of a geostationary spacecraft**

This article determines a methodology to maximize a specific power of the electrical power system of a geostationary spacecraft, using the EPS simulation model. A typical (for GEO spacecraft) fully-regulated EPS structure is considered. The advantages of using the full-bridge quasi-resonant converters with galvanic isolation are considered. The results of the energy efficiency estimation of power converters at various ranges of input voltages, as well as the criteria and conditions for calculating the positive energy budget of a GEO spacecraft are presented. The application of the EPS simulation model is shown and the results of optimization of the proposed EPS energy and mass characteristics for 6 and 13 kW payloads are described.

**Keywords:** spacecraft electrical power system, optimization of energy and mass characteristics, simulation model, specific power of the spacecraft electrical power system.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-83-90

**References**

1. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft electrical power systems]. Novosibirsk, Nauka, 1994. 318 p. (in Russ.).
2. Oukil S., Boudjemai A. Geostationary Communication Satellite Solar Array Optimization Using Gravitation Search Algorithm. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2020, no. 12, 25 p.
3. Mohamed A.M., Amer F.E., Mostafa R.M., Mahmoud A.A. Trade-off analysis of low earth orbit spacecraft power supply system by Genetic algorithm. Proc. of 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA, IEEE, 2016, 13 p.
4. Magalhães R.O., Moreira H.P. Space Power Topology Selection and its System Level Modeling and Control. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2020, no. 12, pp. 12–18.
5. Madhusudhana C.S., Prasad G.N.V., Sridhara C.D. Modeling for evaluating efficiency of spacecraft power systems. Proceedings of 2014 Power and Energy Systems: towards sustainable energy, Bangalore, India, IEEE, 2014, 7 p.
6. Asif S., Li Y. Spacecraft Power Subsystem Technology Selection. Proc. of 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Windsor, UK, IEEE, 2006, 7 p.
7. Flath A. *Mathematical Programming Approach for the Design of Satellite Power Systems*. Master's thesis. Kentucky, USA, University of Kentucky Libraries, 2019, 73 p.

8. Alsadi S., Khatib T. Photovoltaic Power Systems Optimization Research Status: A Review of Criteria, Constrains, Models, Techniques, and Software Tools. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 10, p. 1761.

9. Shinyakov Yu.A. [Energy analysis of structural diagrams of spacecraft electrical power systems] *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2006, vol. 309, no. 8, pp. 152–155 (in Russ.).

10. Stolyarov A.N., Polyn D.I. [Resonant converter based discharge module with increased efficiency in a wide range of input voltages] *Proceedings of the XX<sup>th</sup> Conference in Electronical and Electromechanical Systems and Devices*, Tomsk, AO «NPC «Polyus», 2020, pp. 37–40 (in Russ.).

11. Nesterishin M.V., Bukreev V.G., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. [Method to Estimate the Energy Efficiency of Power Conditioning Units in Spacecrafts Electric Power Systems] *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no.1, pp. 112–118 (in Russ.).

12. Kozlov R.V., Bukreev V.G., Nesterishin M.V., Lelekov A.T. [Simulation Model of Spacecraft Power System for Power Balance Calculation] *Proc. of 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Novosibirsk, IEEE, 2020, 6 p.

13. Stark J. *Electrical Power Systems*, NY, John Wiley & Sons, 2011, 356 p.

14. Bugaj T.V., Bykov V.V., Gil'zhinskij A.M. [Design features of new generation power conditioning units] *Proceedings of the XIX<sup>th</sup> Conference in Electronical and Electromechanical Systems and Devices*, Tomsk, AO «NPC «Polyus», 2020, pp. 16–18 (in Russ.).

15. Borisenko V.YU., Kozlov R.V., Tarakanov K.V. [New generation power conditioning units] *Proceedings of the XIX<sup>th</sup> Conference in Electronical and Electromechanical Systems and Devices*, Tomsk, AO «NPC «Polyus», 2020, pp. 15–16 (in Russ.).

16. Kryuchkov P.A., Karplyuk D.S. [Analysis of the achieved characteristics of the electrical power systems of the «Express-1000H» and «Express-2000» platforms] *Proceedings of the XIX<sup>th</sup> Conference in Electronical and Electromechanical Systems and Devices*, Tomsk, AO «NPC «Polyus», 2020, pp. 16–18 (in Russ.).

**Roman V. Kozlov**

Head of Spacecraft On-board Power Systems Sector,  
 Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev  
 «Information Satellite Systems»  
 52, Lenin st., Zheleznogorsk, Russia, 692972  
 Phone: +7 (391-9) 76-41-57  
 Email: [krv@iss-reshetnev.ru](mailto:krv@iss-reshetnev.ru)

**Victor G. Bukreev**

Doctor of Science in Engineering, Professor  
 Tomsk Polytechnic University  
 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
 Phone: +7 (382-2) 56-40-45  
 Email: [bukreev@tpu.ru](mailto:bukreev@tpu.ru)

**Alexander T. Lelekov**

Candidate of Science in Engineering, Researcher of Space  
 Systems and Technologies Laboratory,  
 Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch  
 of the Russian Academy of Sciences  
 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036  
 Phone: +7 (391-2) 49-45-85  
 Email: [lelekov@iph.krasn.ru](mailto:lelekov@iph.krasn.ru)

УДК 621.314.2 38, 62-83-52 (075)

В.Н. Крысанов, В.Л. Бурковский, И.А. Хайченко

## Аппаратные решения для энергосберегающих технологий управления объектами распределительных сетей на базе силовых полупроводниковых устройств

Рассмотрены актуальные вопросы развития энергосберегающих технологий оптимального управления распределительных сетей по критерию минимума потерь электроэнергии за счет внедрения новых аппаратных средств управления их режимами на основе статических устройств. На основе анализа существующих аппаратных средств управления режимами распределительных сетей предложены разработанные схмотехнические решения силовой части и системы управления многофункционального тиристорного трансформаторного регулятора напряжения и гибридной тиристорной конденсаторной установки. Определены их основные технические характеристики и возможности по снижению асимметрии напряжения, ограничению токов короткого замыкания и регулированию реактивной мощности. Рекомендовано применение разработанных программных и аппаратных решений для широкого круга задач энергосбережения как в сфере электроэнергетики, так и на уровне промышленных объектов.

**Ключевые слова:** энергосбережение, распределительные сети, оптимизация управления, статические силовые регуляторы напряжения и реактивной мощности.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-91-96

Распределительные сети электроснабжения (СЭС) являются важнейшим звеном любой электроэнергетической системы (ЭЭС). Они представляют собой сложную многоуровневую структуру с большим количеством распределенных объектов с самыми разнообразными техническими и энергетическими характеристиками. Для полноценного и эффективного функционирования такой структуры необходимо обеспечение требуемого баланса выработки и потребления потоков энергетических мощностей. Последнее невозможно без оптимального управления режимами работы распределительных сетей электроснабжения по ряду критериев, таких как энергоэффективность, энергосбережение, качество ЭЭ, надежность энергоснабжения потребителей.

В соответствии с генеральной энергетической доктриной нашей страны, подобная модернизация распределительного электросетевого комплекса ЭЭС предусматривает создание «Интеллектуальных сетей» (Smart Grid) на основе комплекса аппаратных и программных средств, позволяющих оперативно и оптимально менять характеристики электрической сети [1].

В части аппаратной модернизации общепризнанным является направление, базирующееся на реализации технологической платформы FACTS [2–4].

Большинство предлагаемых аппаратных средств управления режимами распределительных сетей лежат в плоскости применения статических преобразователей регулирования напряжения и реактивной мощности.

Основные варианты аппаратной реализации этой платформы обладают многофункциональностью, имеют высокую эффективность, но весьма дороги.

В основу решения вышеуказанной задачи был положен выбор аппаратных средств управления режимами распределительных сетей СЭС, способных

реализовать заданные функции регулирования напряжения и реактивной мощности, при использовании минимального количества силовых полупроводниковых элементов (например, тиристоров).

В современной электроэнергетике основные аппаратные средства реализации технологической платформы FACTS представлены статическими и электромашинными устройствами [5–10].

К статическим устройствам относятся:

- батареи статических конденсаторов (БСК), шунтирующие реакторы (ШР), реакторные группы, коммутируемые вакуумными выключателями (ВРГ), обеспечивающие ступенчатое регулирование реактивной мощности [11];

- управляемые шунтирующие реакторы (УШР);

- статические тиристорные компенсаторы (СТК);

- статические компенсаторы реактивной мощности, выполненные на базе преобразователей напряжения на современных мощных IGBT-транзисторах – СТАТКОМ [12–14].

К электромашинным устройствам относятся:

- трансформаторные регуляторы напряжения (ТРН) [15,16];

- синхронные компенсаторы (СК);

- асинхронизированные компенсаторы (АСК).

Наиболее распространенными электромашинными аппаратами в технологии передачи электроэнергии на переменном токе, являются трансформаторы / автотрансформаторы. Но, как правило, трансформаторные устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) не отвечают современным требованиям концепции Smart Grid, так как используют электромеханические коммутаторы.

Поэтому видится целесообразность замены последних на полупроводниковые силовые ключи (например, тиристоры) и широкого использования тиристорно-трансформаторных регуляторов напряжения (ТТРН). Однофазная структурная схема ТТРН приведена на рис. 1 [17].

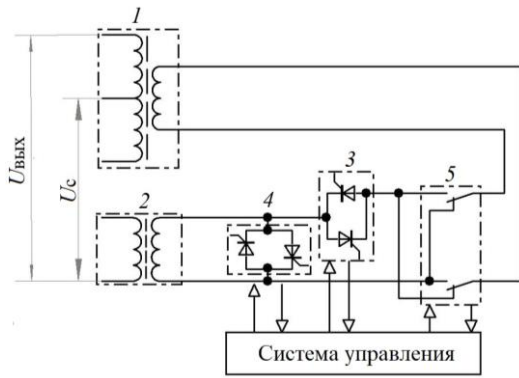


Рис. 1. Структурная схема ТТРН

Силовая часть ТТРН состоит из автотрансформатора (АТ) – 1, вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) – 2 и тиристорного регулятора, содержащего 2 группы тиристоров (3 и 4).

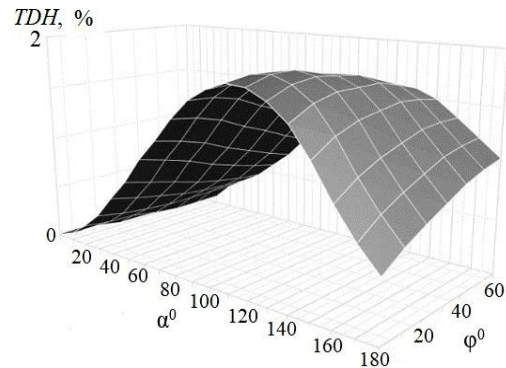
Применение ТТРН вместо устройств РПН, наряду с повышением надежности, позволяет реализовать плавное, быстродействующее регулирование напряжения.

Эти качества позволяют увеличить пропускную способность линий электропередач за счет повышения запасов статической и динамической устойчивости рассматриваемых систем. Разработаны алгоритмы для системы управления тиристорных групп (3 и 4), которые обеспечивают повышение диапазона регулирования, надежности, снижение весогабаритных показателей и многофункциональное применение ТТРН (например, снижение асимметрии напряжения, регулирование потребления реактивной мощности и ограничение токов КЗ в аварийных режимах работы ЛЭП) [18, 19]. Проведено имитационное моделирование ТТРН в среде Matlab Simulink для анализа основных характеристик, а именно: диапазона регулирования, гармонического состава выходного напряжения, дополнительных потерь в силовом оборудовании от высших гармоник. Расчеты, проведенные с учетом влияния магнитопровода силового трансформатора (использовались программы «Fast fourier transform», «LabVIEW», «LTSpice», «powergui», «Hysteresis design tool»), показали, что коэффициент гармонических искажений ( $TDH$ ) фазного напряжения не превышает 8,5–10%, а линейного – 0,5–2% [20].

Установлено, что для обеспечения допустимых по ГОСТ-32144–2013 пределов нелинейных искажений напряжения (для фазного  $TDH=5-7\%$ ), целесообразно выбрать принцип двухзонного регулирования, реализуемый реверсивным переключателем 5. На рис. 2 показана зависимость  $TDH$  (%) линейного напряжения имитационной модели ТТРН от изменения угла регулирования  $\alpha$  и угла нагрузки  $\varphi$ .

Проведенный анализ дополнительных потерь в силовых полупроводниковых ключах и от высших гармоник (раздельно, в стали и меди обмоток трансформатора и ВДТ) показал, что по первой позиции они не превышают 2–3% от потребляемой мощности. По второй позиции, в зависимости от

режима работы ТТРН, суммарные потери могут достигать до 8%, что требует учета дополнительных потерь от высших гармоник в ТТРН [21].

Рис. 2. Зависимости  $TDH$  линейного напряжения от  $\alpha^\circ$ ,  $\varphi^\circ$ 

Проведенное имитационное моделирование позволяет дать следующую количественную оценку дополнительных (кроме регулирования напряжения) функциональных возможностей предлагаемого аппаратного решения.

В режиме работы ТТРН «симметрирование», максимальные значения токов обратной и нулевой последовательностей, которые могут быть компенсированы, составляют соответственно 7 и 11% при принятом 10%-м диапазоне регулирования выходного напряжения [21].

В режиме работы ТТРН «ограничение токов короткого замыкания» СУ реализуется алгоритм управления тиристорными ключами, обеспечивающий его перевод в режим управляемого увеличения индуктивного сопротивления АТ и ВДТ (вплоть до дроссельного режима ВДТ). При этом возможно снижение токов КЗ до 23% и перенапряжений до 40% в аварийных режимах распределительных сетей СЭС.

В режиме работы ТТРН «регулирование реактивной мощности», силовой автотрансформатор способен увеличить потребление реактивной мощности с 0,3...0,5 до 20...30% от  $S_n$  [17, 21]. При этом потери активной мощности в АТ дополнительно увеличиваются до 1,5% от  $S_n$ . Однако, учитывая тепловую перегрузочную способность трансформатора, целесообразно осуществлять режим регулирования потребления реактивной мощности при загрузке АТ до 0,7  $P_n$ , что ограничивает возможность полного отказа от шунтирующих реакторов.

Более того, необходимость генерации добавочной реактивной мощности индуктивного характера ограничена, как правило, начальным периодом эксплуатации линий электропередач и их малой нагрузкой. Гораздо более востребована генерации добавочной реактивной мощности емкостного характера.

Поэтому от большинства устройств регулирования реактивной мощности требуется выполнение именно этой функции. Как было отмечено выше, варианты ее аппаратной реализации в настоящее время весьма разнообразны, хорошо исследованы и широко применяются на практике. В свете реализации концепции Smart Grid, весьма перспективны

статические тиристорные компенсаторы СТАТКОМ и тиристорные конденсаторные установки (при необходимости динамической компенсации). С учетом их высокой стоимости в основном сейчас применяются управляемые и неуправляемые батареи статических конденсаторов БСК. Последние, обладая невысокой удельной стоимостью, простотой и надежностью, способны решать многие задачи компенсации. Однако все возрастающие требования по энергосбережению, параметрам управляемости (например, быстродействие, наработка на отказ) и высокий современный уровень силовой преобразовательной техники требуют создания новых силовых устройств компенсации реактивной мощности по критерию «цена–качество». В качестве такого аппаратного решения предложена гибридная тиристорная конденсаторная установка (ТКУ) [11]. Последняя, сохраняя все положительные качества регулируемой БСК, способна обеспечить эти устройства повышенной надежностью и новыми функциональными возможностями в случае, когда необходимо осуществлять компенсацию реактивной мощности нагрузки с частотой подключения до 100 циклов в сутки. Особенно их можно рекомендовать для высоковольтных сетей, где нет жесткой необходимости частых переключений БСК. Силовая часть такого ТКУ содержит две группы встречно-параллельно управляемых вентилях 3, 4 для подключения трехфазной конденсаторной батареи 1 (вариант односекционной БСК приведен на рис. 3).

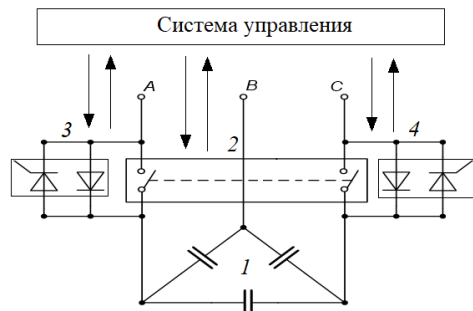


Рис. 3. Структурная схема гибридной ТКУ

Разработанная СУ обеспечивает безбросковое (по току) подключение батареи к сети [16]. С целью снижения установленной мощности (а соответственно и стоимости) и повышения ресурса работы тиристорных ключей в данном устройстве используется контактор (выключатель) 2, причем его силовые контакты подключены параллельно вентильным ключам и шунтируют их в установившемся режиме. После коммутации тиристоры и достижения установившегося состояния тока в сети тиристоры закорачиваются контактором. Используя свойства тиристора кратковременно выдерживать токовые перегрузки, последний выбирается не по номинальному току, а по току перегрузки (зависящего от шунтирования его контактором). В этом случае стоимость силового тиристорного блока значительно снижается. Эффективность применения такой гибридной ТКУ растет с увеличением числа секций БСК. Одна-

ко экономически целесообразно ограничить число секций БСК до 2–4. Данный вывод сделан на основании проведенных оптимизационных расчетов (критерий – минимальные затраты на компенсацию реактивной мощности) по определению двух основных параметров БСК – их реактивной мощности и требуемой дискретности регулирования при варьировании параметров напряжения и реактивной мощности в узлах нагрузки [22].

Результаты расчетов, для наглядности и удобства анализа, приведены в виде трехмерных графических зависимостей суммарных затрат  $C$  (руб.) на компенсацию реактивной мощности от напряжения  $U$  (В) (у конечного потребителя 190–260 В) в контрольной точке рассматриваемого узла нагрузки и количества ступеней  $n$  (1–4) гибридной ТКУ (рис. 4).

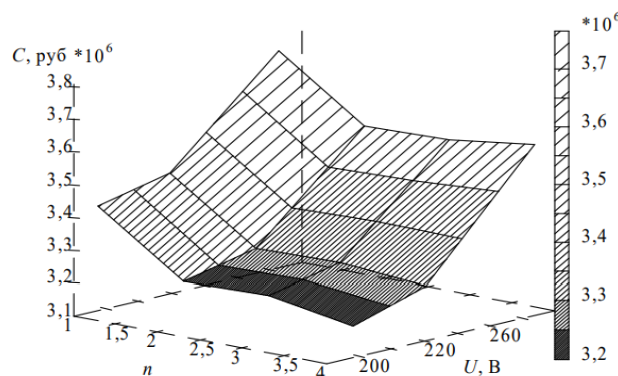


Рис. 4. Зависимость суммарных затрат на компенсацию реактивной мощности в узле нагрузки от параметров гибридной ТКУ

Все основные схмотехнические решения силовой части и системы управления разработанных ТТРН и гибридной ТКУ были апробированы на физических низковольтных моделях. Получено подтверждение работоспособности последних при их работе с типовыми нагрузками СЭС (асинхронный ЭП, системы ПЧ–АД, тепловые пункты) [23].

#### Заключение

1. Для успешной реализации концепции Smart Grid в отечественной электроэнергетике требуется совершенствование технологий энергосбережения для распределительных сетей электроснабжения в аппаратном направлении.

2. В основе технологий энергосбережения распределительных сетей электроснабжения должны лежать принципы оптимизации режима управления ими по критерию минимума потерь электроэнергии, а в узлах нагрузки с учетом энергоэкономических характеристик основных потребителей электроэнергии данных объектов.

3. Целесообразно применение новых аппаратных решений силовой части и алгоритмов для системы управления тиристорно-трансформаторных регуляторов напряжения и гибридных тиристорных конденсаторных установок в распределительных сетях электроснабжения.

4. Программа ЭВМ по определению оптимальных параметров (мощности отдельных секций, ко-

личество секций) батарей тиристорных конденсаторных установок компенсации реактивной мощности и алгоритмов работы их системы управления (время включения, уставки включения) позволяет минимизировать потери электроэнергии в узлах нагрузки с учетом конкретных типов нагрузки в каждом узле.

5. Работоспособность предложенных аппаратных решений ТТРН и гибридной ТКУ подтверждены в рамках проведенных исследований на физических моделях.

#### Литература

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью / Ю.Г. Шакарян, Ю.И. Моржин, В.В. Дорофеев, В.Е. Фортов. – М., 2015. – 238 с.

2. Hua H. Towards intelligent energy control and optimization in energy internet: a review / H. Hua, J. Cao // International conference on energy internet (ICEI). – 2019. – P. 573–578.

3. Cheng L. Energy internet: concept and practice exploration / L. Cheng, N. Qi, F. Zhang, H. Kong, X. Huang // IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). – 2017. – P. 1–5.

4. Narain G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems / G. Narain, Hingorani, Gyugyi Laszlo. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p.

5. Interline power flow controller (IPFC) characterization in power systems / N.A. Hussein, A.A. Eisa, H.M. Mahmoud, S.A. Shehata, A. Othman // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – No. 7(3). – P. 1656–1665.

6. Kumbhare P.P. Application of Distributed Static Series Compensator for Improvement of Power System Stability // Silicon Photonics & High Performance Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 718. – P. 27–34.

7. Наумов В.А. От автоматизированной электроэнергетики к интернету энергии / В.А. Наумов, В.А. Матисон // Энергия единой сети. – 2019. – № 2(44). – С. 36–44.

8. Степанов В.Н. Использование силовых устройств с управляемыми полупроводниковыми преобразователями на объектах электроэнергетики // Электроэнергетика: сегодня и завтра. – 2013. – № 2. – С. 65–68.

9. Постолатий В.М. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова // Электричество. – 2010. – № 2. – С. 7–14.

10. Sakib N. A Qualitative Study on the United States Internet of Energy: A Step Towards Computational Sustainability / N. Sakib, E. Hossain, S.I. Ahamed // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 69003–69037.

11. Крысанов В.Н. Эффективность использования тиристорных конденсаторных установок в промышленных системах электроснабжения // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 3. – С. 15–20.

12. Милютин А.Ю. Компенсация реактивной мощности с помощью Статком / А.Ю. Милютин, Е.А. Темников, П.А. Готфрид // Научный форум «Технические и физико-математические науки»: сб. статей по матер. X междунар. науч.-практ. конф. – М.: МЦНО, 2017. – С. 122–129.

13. Обязуев А.П. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности для электрических сетей и

линий электропередачи / А.П. Обязуев, В.Н. Кочкин. – М.: ВНИИЭ, 2002. – 15 с.

14. Okon T. WLS State Estimation in Polar and Rectangular Coordinate Systems for Power System with UPFC: Significance of Types of Measurements / T. Okon, K. Wilkosz // Acta Energetica. – 2013. – Vol. 1, No. 14. – P. 114–119.

15. Pat. 3621374. Voltage regulator with zero static switching between taps for a regulator transformer / Kestler Clarence J. (USA). – 1971.

16. Pullawar P.V. Notice of removal: real time voltage sag mitigation: new topologie / P.V. Pullawar, S.R. Paraskar, S.S. Jadhao // International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. – 2015. – Vol. 2 (6). – P. 164–168.

17. Пат. 2612621, С2 РФ, МКП G 05F 5/04. Регулятор переменного напряжения / В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов (РФ). – № 2014145372; заявл. 11.11.2014; опубл. 09.03.2017, Бюл. № 7. – 9 с.

18. Krysanov V.N. Reduction of Active Power Loss at 110/220 kV Node Substations Using Fuzzy Controller / V.N. Krysanov, V.L. Burkovsky, A.D. Danilov // Problemele energeticii regionale. – 2019. – Vol. 1 (39). – P. 57–69.

19. Пат. №2713739, С1, РФ, МКП G 05F 1/30. Регулятор переменного напряжения / В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов, К.В. Иванов (РФ). – № 2019113982; заявл. 06.05.2019; опубл. 07.02.2020, Бюл. № 4. – 9 с.

20. Крысанов В.Н. Аппаратно-программное управление режимами узлов нагрузки региональных сетей электроснабжения с помощью статических устройств. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – 244 с

21. Крысанов В.Н. Программно-аппаратное обеспечение систем управления ЭЭС на базе технологии FACTS. – Воронеж: ВГТУ, 2016. – 232 с.

22. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ №2017618141. Определение оптимальных параметров конденсаторной установки для компенсации реактивной мощности по критерию минимума затрат / В.Н. Крысанов, В.Л. Бурковский, К.В. Иванов. – Заявка №2017615096. Дата поступления 31 апреля 2017 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 24 июля 2017.

23. Physical model of Power Electronic Devices Based on Static Voltage Transducers / V.L. Burkovskii, A.D. Danilov, A.M. Litvinenko, V.N. Krysanov, A.L. Rutskov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – № 89(6). – P. 381–384.

#### Крысанов Валерий Николаевич

Канд. техн. наук, ст. н.с., директор  
ООО ПКФ «Современные технологии»  
Хользунова ул., 10-б, д. 86, г. Воронеж, Россия, 394068  
Тел.: +7-920-228-56-06  
Эл. почта: sovteh2000@mail.ru

#### Бурковский Виктор Леонидович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. электропривода,  
автоматики и управления в технических системах  
(ЭАУТС) Воронежского государственного технического  
университета (ВГТУ)  
Московский пр-т, 14, г. Воронеж, Россия, 394026  
Тел.: +7 (473-2) 55-77-25  
Эл. почта: bvl@vorstu.ru

#### Хайченко Илья Александрович

Аспирант каф. ЭАУТС ВГТУ  
Московский пр-т, 14, г. Воронеж, Россия, 394026  
Тел. +7-952-433-26-05  
Эл. почта: li740@yandex.ru

Krysanov V.N., Burkovskii V.L., Khaychenko I.A.  
**Hardware solutions for energy-efficient control technologies of distribution network objects based on power semiconductor devices**

The article considers topical issues in development of energy-saving technologies to optimize the control of distribution networks according to the criterion of minimum power losses. The technology consists in introducing new hardware to control the modes based on static devices. Based on the analysis of the existing hardware created to control the modes of distribution networks, the developed circuitry solutions of the power part and the control system of the multifunctional thyristor voltage transformer and hybrid thyristor capacitor are proposed. Their main technical characteristics and ways to reduce voltage asymmetry, limiting short-circuit currents and regulating reactive power are determined. The use of software and hardware solutions was recommended for a wide range of energy conservation tasks, both in the electric power sector and at the level of industrial facilities.

**Keywords:** power saving, distribution networks, control optimization, static power regulators of voltage and reactive power.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-91-96

### References

- Shakaryan Yu.G., Morzhin Yu.I., Dorofeev V.V., Fortov V.E. *Kontseptsiya intellektualnoi elektroenergeticheskoi sistemy s aktivno-adaptivnoi setyu* [Concept for intelligent energy system with active-adaptive network]. M., 2015. 238 p. (in Russ.).
- Hua H., Cao J. Towards intelligent energy control and optimization in energy internet: a review. *International Conference on Energy Internet (ICEI)*, 2019, pp. 573–578.
- Cheng L., Qi N., Zhang F., Kong H., Huang X. Energy internet: concept and practice exploration. *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2017, pp. 1–5.
- Hingorani, Narain G., Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York, IEEE Press, 2000. 432 p.
- Hussein N.A., Eisa A.A., Mahmoud H.M., Shehata S.A., Othman A. Interline power flow controller (IPFC) characterization in power systems. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7(3), pp. 1656–1665.
- Kumbhare P.P. Application of Distributed Static Series Compensator for Improvement of Power System Stability // *Silicon Photonics & High Performance Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 718, pp. 27–34.
- Naumov V.A., Matison V.A. [From Automated Electricity to Internet Energy]. *Energiya edinnoi seti*, 2019, vol. 2(44), pp. 36–44 (in Russ.).
- Stepanov V.N. [Use of power devices with controlled semi-conductor converters at electric power facilities]. *Elektroenergetika: segodnya i zavtra*. 2013, vol. 2, pp. 65–68 (in Russ.).
- Postolatii V.M., Bykova E.V. [Efficiency of application of controlled self-compensating high-voltage power transmission lines and transformer-type fa-control devices]. *Elektrichestvo*, 2010, vol. 2, pp. 7–14 (in Russ.).
- Sakib N., Hossain E., Ahamed S.I. A Qualitative Study on the United States Internet of Energy: A Step Towards Computational Sustainability. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 69003–69037.
- Krysanov V.N. [Thyristor switched capacitor in energy efficient industrial power systems]. *Energobezopasnost' i energosberezhe-nie*, 2017, vol. 3, pp. 15–20 (in Russ.).
- Milyutin A.Yu., Temnikov E.A., Gotfrid P.A. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti s pomoshch'yu Statkom* [Reactive power compensation with Statcom]. *Nauchnyy forum tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki: Sbornik statej po materialam X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Scientific Forum of Technical and Physiological Sciences: Collection of Articles on Materials of the X International Scientific and Practical Conference]. Moscow, MTsNO, 2017, pp. 122–129 (in Russ.).
- Obyazuev A.P., Kochkin V.N. *Sticheskie tiristornye kom-pensatory reaktivnoi moshchnosti dlya elektricheskikh setei i linii elektroperedachi* [Static reactivity thyristor compensators for electrical networks and transmission lines]. Moscow, VNIIE, 2002. 15 p. (in Russ.).
- Okon T., Wilkosz K. WLS State Estimation in Polar and Rectangular Coordinate Systems for Power System with UPFC: Significance of Types of Measurements. *Acta Energetica*, 2013, vol. 1(14), pp. 114–119.
- Kestler Clarence J. Voltage regulator with zero static switching between taps for a regulator transformer. Patent US 362137, 1971.
- Pullawar P.V., Paraskar S.R., Jadhao S.S. Notice of removal: real time voltage sag mitigation: new topology. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 2015, vol. 2 (6), pp. 164–168.
- Krysanov V.N., Sharapov Yu.V. *Regulyator peremennogo napryazheniya* [AC voltage controller] Patent RF, no. 2014145372, 2014 (in Russ.).
- Krysanov V. N., Burkovskiy V.L., Danilov A.D. Reduction of Active Power Loss at 110/220 kV Node Substations Using Fuzzy Controller. *Problemele energeticii regionale*, 2019, pp. 57–69.
- Krysanov V.N., Sharapov Yu.V., Ivanov K.V. *Regulyator peremennogo napryazheniya* [AC voltage controller]. Patent RF, no. 2713739, 2019 (in Russ.).
- Krysanov V.N. *Apparatno-programmnoe upravlenie rezhimami uzlov nagruzki regional'nykh setei elektro-snabzheniya s pomo-shch'yu staticheskikh ustroystv* [Hardware and software control of load node modes of regional power supply networks using static devices]. Voronezh, VGTU, 2017. 244 p. (in Russ.).
- Krysanov V.N. *Programmno-apparatnoe obespechenie sistem upravleniya EES na baze tekhnologii FACTS* [Software and hardware of EPS control systems based on FACTS technology]. Voronezh, VGTU, 2016. 232 p. (in Russ.).
- Krysanov V.N., Burkovskii V.L., Ivanov K.V. *Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM no. 2017618141. Opredelenie optimalnykh parametrov kondensatornoi ustanovki dlya kompensatsii reaktivnoi moshchnosti po kriteriyu minimuma zatrat* [Certificate of state registration of computer program no. 2017618141. Determination of the optimal parameters of the capacitor unit for compensation of the core power by the minimum cost criterion]. no. 2017618141, 2017 (in Russ.).
- Burkovskii V.L., Danilov A.D., Litvinenko A.M., Krysanov V.N., Rutskov A.L. Physical model of Power Electronic Devices Based on Static Voltage Transducers. *Russian Electrical Engineering*, 2018, no. 89(6), pp. 381–384.

### Valerii N. Krysanov

Candidate of Science in Engineering, Senior Researcher,  
 Director of PKF Modern Technologies LLC  
 10-b, Holzunova st., 86, Voronezh, Russia, 394068  
 Phone: +7-920-228-56-06  
 Email: sovteh2000@mail.ru



**Viktor L. Burkovskii**

Doctor of Science in Engineering, Professor,  
Department of Electric Drive, Automation and Control in  
Technical Systems, Voronezh State Technical University  
14, Moskovskiy pr., Voronezh, Russia, 394026  
Phone: +7 (473-2) 55-77-25  
Email: bvl@vorstu.ru

**Ilya A. Khaychenko**

Postgraduate Student, Department of Electric Drive,  
Automation and Control in Technical Systems,  
Voronezh State Technical University  
14, Moskovskiy pr., Voronezh, Russia, 394026  
Phone: +7-952-433-26-05  
Email: li740@yandex.ru

**ПАМЯТИ ФЕЛИКСА ИВАНОВИЧА ПЕРЕГУДОВА,  
К 90-ЛЕТИЮ**



УДК 658.012:338.984

**А.М. Кориков**

## От радиолокации метеорных следов до системной организации науки, высшего образования и производства: к 90-летию Феликса Ивановича Перегудова

*Посвящается Феликсу Ивановичу Перегудову (20.01.1931 – 30.12.1990)*

Ф.И. Перегудов окончил Томский политехнический институт по специальности «Радиотехника» в 1953 г., затем учился в аспирантуре ТГУ и работал в ТПИ: был одним из организаторов и руководителей первых НИР по радиолокации. В 1961 г. он организовал Томское КБ «Проект», в 1966–1970 гг. – директор Томского радиотехнического завода, в 1970–1981 гг. – заместитель директора и директор НИИ автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ) при ТИАСУРе, в 1981–1984 гг. – ректор ТИАСУРа. В 1984–1985 гг. – заместитель министра высшего и среднего специального образования РСФСР, в 1985–1990 гг. – министр СССР, заместитель председателя Государственного комитета СССР по высшему образованию. Ф.И. Перегудов применял системный подход во всех сферах своей деятельности. В период руководства ТКБ «Проект» Ф.И. Перегудов организовал разработку пассивных радиолокационных средств. Работая директором Томского радиотехнического завода, он создал одну из первых в стране автоматизированных систем управления (АСУ) производством. В период работы в НИИ АЭМ по инициативе Ф.И. Перегудова начинается создание одной из первых в стране территориальных АСУ. В 1973 г. НИИ АЭМ был определен головной организацией по разработке АСУ хозяйством Томской области (АСУ ТО), а Ф.И. Перегудов становится главным конструктором АСУ ТО. Он привлек к созданию АСУ ТО многих ведущих ученых г. Томска, по его инициативе был организован вычислительный центр коллективного пользования Томского облстатуправления – неотъемлемая часть АСУ ТО. В период работы в Москве Феликс Иванович поддерживал постоянную связь с Томском. В 1990 г. по его инициативе в Томске был открыт первый в России технопарк.

**Ключевые слова:** Ф.И. Перегудов, пассивная радиолокация, директор, главный конструктор, ректор, министр СССР, автоматизированные системы управления, вычислительный центр коллективного пользования, технопарк.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-99-105



Перегудов Феликс Иванович,  
почетный гражданин Томской области

Современные молодые люди, студенты и школьники, как правило, мало или почти ничего не знают о выдающихся ученых прошлого века. Юбилей знаменитого ученого, организатора науки, высшего образования и производства – отличный повод напомнить молодому подрастающему поколению о замечательном ученом, человеке и его жизненном пути. Наша статья посвящена Феликсу Ивановичу Перегудову. В ТУСУРе память о Ф.И. Перегудове увековечена в именной стипендии, аудитории его

имени, мемориальной доске и др. В Томске в ноябре 1996 г. был создан фонд поддержки образования, науки и производства имени Феликса Ивановича Перегудова (фонд Перегудова) [1].

Перегудов Феликс Иванович доброжелательно, внимательно и с улыбкой смотрит на нас с мемориальной доски, установленной на главном корпусе ТУСУРа. 20 января 2021 г. Феликсу Ивановичу исполнилось бы 90 лет. Ф.И. Перегудов внезапно ушел из жизни 30 декабря 1990 г. в поезде Ленинград–Москва, возвращаясь в Москву из служебной командировки. Жизненный путь Перегудова Ф.И. представлен на сайте ТУСУРа [2]. Там же в одном предложении дана его предельно четкая характеристика: *«Вряд ли найдётся в стране ещё один такой человек, которому удалось бы успешно управлять столь разными и сложными объектами (завод, НИИ и вуз) и отвечать за развитие такой важной для России отрасли, как высшая школа»*. Биография Ф.И. Перегудова представлена в книгах [3–6]. О нем интересно и увлекательно вспоминают его студенческие друзья, ученики и коллеги [7, 8].

В истории ТУСУРа Ф.И. Перегудов – третий ректор вуза (1981 г. – начало 1984 г. – три года его ректорства), но именно с его именем необходимо соединить подъем ТИАСУРа (так кратко именовался наш вуз в те годы) до уровня ведущего вуза страны. Официально ТИАСУР получил статус ведущего вуза СССР в 1987 г. по Постановлению ЦК КПСС и СМ СССР № 386 от 13 марта 1987 г. при И.Н. Пустынском – четвертом ректоре вуза (1984–1999 гг. ректорства И.Н. Пустынского), но вклад Ф.И. Перегудова в признание на союзном уровне заслуг

ТИАСУРа по подготовке кадров высшей квалификации и развитию научных исследований по важнейшей тематике трудно переоценить. В тот период статус ведущего вуза СССР был чрезвычайно престижным, и таких вузов в СССР до 1987 г. было всего 25 [3, с. 44].

Движение Ф.И. Перегудова по служебной иерархии в Москве было стремительным: в начале 1984 г. ректора ТИАСУРа переводят в Москву в министерство высшего и среднего специального образования РСФСР на должность заместителя министра, а затем он становится первым заместителем министра ВиССО РСФСР. В 1985 г. Ф.И. Перегудов переводится в Министерство высшего и среднего специального образования СССР на должность первого заместителя министра. С апреля 1988 г. Ф.И. Перегудов – первый заместитель председателя Государственного комитета СССР по народному образованию, в ранге министра СССР в 1988–1989 гг.

Внимание к нашему вузу со стороны Ф.И. Перегудова было особенным, и это чувствовалось в общении с ним: в те годы (1984–1991) автор данной статьи работал в ТИАСУРе проректором по научной работе и часто общался, находясь в служебных командировках в Москве, с Ф.И. Перегудовым по вопросам выполнения целевых комплексных научных программ, головным исполнителем которых был в те годы ТИАСУР. Чтобы корректно оценивать эти факты, необходимо помнить о бурных событиях, которые происходили в политической, общественной и экономической жизни страны в упоминаемые годы.

В историю нашей страны те годы вошли как годы реформ, перестройки и ускорения, а наш вуз в те же времена получил право на формирование в качестве головной организации крупных научно-технических программ: региональной межвузовской научно-технической программы «Автоматизация» и отраслевой научно-технической программы технического перевооружения ПО «Контур». Эти программы обеспечили развитие научных исследований не только в нашем вузе, но и в других томских вузах-соисполнителях программ, так как все вузы получили не только дополнительные объемы НИОКР, но и дополнительные лимиты по фонду оплаты труда, а это в условиях того времени было чрезвычайно важным фактором развития и науки, и высшего образования в Томске. Поэтому поддержку Феликсом Ивановичем томских вузов в описываемых событиях трудно переоценить и она очевидна.

Ф.И. Перегудов поддерживал томичей не только по упомянутым глобальным вопросам, но и по многим частным вопросам. В этой связи мне вспоминается 1984 г. и мой переход из СФТИ в ТИАСУР: в СФТИ под моим научным руководством выполнялось несколько НИР, в том числе по спецтематике. Практически все НИР успешно завершались, но одна спецтема «Черногорка – РВО» имела специальное госбюджетное финансирование и соответствующие лимиты по фонду оплаты труда. Сложилась проблемная ситуация: документы и финансы по

спецтеме находились в СФТИ, а научный руководитель и исполнители темы – в ТИАСУРе. Работать по этой теме предстояло еще несколько лет. Мои письма по специальным каналам в хозрасчётное научное объединение (ХНО) МВиССО РСФСР и мои личные визиты в спецотдел ХНО нужного результата не давали: в стране плановая экономика и плановая наука, план «спущен» в СФТИ, поэтому СФТИ и должен выполнить эту тему. Пришлось мне обратиться к Ф.И. Перегудову, первому заместителю министра ВиССО РСФСР, и обозначенная мною проблемная ситуация благополучно разрешилась: госбюджетное финансирование и лимиты по фонду оплаты труда были переданы в ТИАСУР, а тема через несколько лет успешно завершена.

В 1990 г. по инициативе Ф.И. Перегудова в Томске был открыт первый в России технопарк [4]. Открытие первого в стране научно-технологического парка – знаковое событие, существенно укрепившее престиж Томска в стране как наукограда. Строительство технопарка было сопряжено с преодолением многих трудностей. Приведем цитату из воспоминаний И.Н. Пустынского [4, с. 31–32]: «Феликс Иванович Перегудов, будучи ректором ТУСУРа, возглавлял комиссию по развитию межвузовской кооперации в совете ректоров вузов г. Томска. К тому же он был главным конструктором по разработке автоматизированной системы управления хозяйством Томской области. Для создания межвузовского опытного производства необходимо было построить соответствующее здание.

С помощью объединения «Томскнефть» и первого секретаря Томского обкома партии Е.К. Лигачёва в 1983 г. ТИАСУРу удалось приобрести за 800 тыс. руб. комплект строительных конструкций для двух модулей болгарского производства ангарного типа площадью по 2000 м<sup>2</sup> каждый. Один модуль предназначался для межвузовского опытного производства, а во втором планировалось создать спортивный манеж ТИАСУРа. Оба модуля решено было разместить рядом с корпусом ФЭТ. Однако из-за отсутствия соответствующих лимитов сборка модулей и строительные работы не выполнялись до конца 1985 г. К этому времени за счёт средств хозрасчётного научного объединения МВиССО РСФСР Красноярским филиалом Гипровуза были выполнены проектные работы по нулевому циклу. В 1985 г. удалось начать строительные работы благодаря активной поддержке Ф.И. Перегудова, который тогда уже работал заместителем министра ВиССО РСФСР, и поддержке местных директивных органов, которая была оказана в виде выделения лимитов УКСа облисполкома в объёме 1 млн руб. только после согласия ТИАСУРа использовать второй модуль как учебно-информационно-выставочный центр областной программы «Ускорение». Генеральным подрядчиком был определён трест «Томскстрой». Проектные и строительные работы по начинке модулей велись почти одновременно. К строительству привлекались сотрудники всех вузов.

*Почти ежедневно собирался штаб строительства, на котором часто бывали и руководители области». Автор данной статьи как проректор по научной работе ТИАСУРа в годы строительства технопарка также участвовал в заседаниях штаба этого строительства. Приведенная цитата излагает не только хронологию знакового события – открытие первого в стране научно-технологического парка, но и движущие «пружины» подобных событий во времена Ф.И. Перегудова.*

Заслуги Ф.И. Перегудова признаны как в нашей стране, так и за её пределами. В 1990 г. Феликс Иванович становится одним из основателей Инженерной академии СССР и её академиком. Он награжден орденом Трудового Красного Знамени, двумя орденами «Знак Почета», медалями, удостоен премии Совета Министров СССР. К 400-летию юбилею Томска Феликсу Ивановичу Перегудову посмертно присвоено звание «Почетный гражданин Томской области».

#### **Его жизнь была подобна метеору**

Именно так назвали свои воспоминания о Феликсе Ивановиче Перегудове его студенческие друзья [7]. Сегодня благодаря Интернету в сети можно найти много интересного практически о любом человеке и, конечно, найдется интересная информация о Феликсе Ивановиче, но цитируемая статья создает читателю яркое и объемное представление о Ф.И. Перегудове. Эта статья представляет интерес и для старшего поколения, в том числе тех, кто лично знал и общался с Ф.И. Перегудовым в годы его жизни, и для молодого поколения, особенно для нашей студенческой молодежи. Каждый найдет в этой статье что-то очень важное для себя. Приведу цитату из [7, с. 25]: *«Феликс Иванович начал свою научную деятельность с изучения метеоров – маленьких небесных тел, которые, врываясь с огромной скоростью в атмосферу Земли, быстро сгорают, оставляя за собой яркий ионизированный след. Его жизнь подобна метеору».*

Ф.И. Перегудов окончил радиотехнический факультет Томского политехнического института в 1953 г. Его дипломный проект был посвящен разработке передатчика для радиолокационной станции (РЛС). Опытный образец РЛС разрабатывался и изготавливался в ТПИ на кафедре радиотехнической аппаратуры (РТА, в 1956 г. кафедра РТА была переименована в кафедру конструирования и технологии производства радиотехнической аппаратуры (КТПРА) [9, с. 75]) по договору с Институтом физики атмосферы АН СССР. В то время АН СССР готовилась к освоению космоса и к международному геофизическому году (МГГ), который объявлялся на период с 1 июля 1957 г. по 31 декабря 1958 г. [4, с. 10], поэтому данные об атмосфере, полученные с помощью радиолокации метеорных ионизированных следов, представляли несомненный научный интерес. Работы по радиолокационным методам исследования метеорных следов выполнялись в ТПИ под научным руководством заведующего кафедрой КТПРА

Е.И. Фиалко. Функцию ответственного исполнителя этих работ выполнял Г.С. Зубарев [4, с. 10], Ф.И. Перегудов был одним из основных авторов разработки комплекса радиолокационной аппаратуры для исследования метеорных ионизированных следов в диапазоне длин волн 10 м (РЛС ТПИ-1 и ТПИ-2). РЛС были установлены в Мурманске и Томске и, как отмечает Г.С. Зубарев [4, с. 10–11], они были единственными в СССР, так как остальные участники МГГ использовали переоборудованные армейские РЛС П-2М в диапазоне длин волн 4 м, который был менее эффективным по изучению отражений от метеорных следов [4, с. 11], что укрепляло и повышало научный престиж ТПИ как в СССР, так и за рубежом. Для Ф.И. Перегудова описываемый период был связан с обучением в аспирантуре ТГУ и работой в ТПИ на кафедре РТА (затем КТПРА). Своей аспирантуры по радиотехнике в ТПИ тогда не было, поэтому научным руководителем Ф.И. Перегудова стал профессор, заведующий кафедрой радиофизики ТГУ В.Н. Кессених. В 1959 г. Ф.И. Перегудов защищает кандидатскую диссертацию по радиолокации метеорных следов, а в 1960 г. через издательство ТГУ публикует монографию «Характеристика метеора как радиолокационной цели» [7, с. 21].

Финансирование метеорных исследований было связано с МГГ, а этот период заканчивался, заканчивались также финансы, и заведующий кафедрой КТПРА Е.И. Фиалко заключает договор с ГРАУ на разработку пассивной радиолокационной системы сантиметрового диапазона. Феликс Иванович назначается ответственным исполнителем этой работы [7, с. 21].

Е.И. Фиалко в тот период в основном был занят своей докторской диссертацией по метеорной тематике, поэтому Ф.И. Перегудов фактически руководил упомянутой договорной работой. Как отмечается в [7, с. 21], именно в этот период складывается вокруг Ф.И. Перегудова коллектив разработчиков по важнейшей оборонной тематике из выпускников радиотехнического факультета ТПИ, который будет работать вместе с ним и в Томском КБ «Проект», и на Томском радиотехническом заводе.

История этого удивительного коллектива увлекательно изложена в [7]. Отметим лишь хронологию: в 1961 г. Ф.И. Перегудов организовал Томское КБ «Проект» и работал в этом КБ до 1966 г., в этот период Ф.И. Перегудов организовал и координировал разработку пассивных радиолокационных средств оборонного назначения; в 1966 г. Ф.И. Перегудов принял предложение возглавить Томский радиотехнический завод, он был директором этого завода с 1966 по 1970 г. Вместе с ним на Томский радиотехнический завод перешли многие из выпускников радиотехнического факультета ТПИ, которые работали с ним по радиолокационной тематике в политехническом институте. В описываемый период произошло становление Ф.И. Перегудова не только как ученого-системотехника, разработчика и конструктора сложных радиотехнических систем спе-

циального назначения, но и как хозяйственного руководителя – убежденного сторонника системного подхода к решению проблем управления сложными объектами любой природы. Как отмечается в [7, с. 23], «книга Гуда и Макола «Системотехника» становится одной из его настольных».

В период работы директором Томского радиотехнического завода Ф.И. Перегудов создает на этом заводе одну из первых в стране автоматизированных систем управления предприятием (АСУП). В [7, с. 27] отмечается, что Ф.И. Перегудов делится своими убеждениями по возможностям АСУП с директорами других томских заводов, и на вычислительном центре радиотехнического завода Ф.И. Перегудов проводит городские семинары по АСУП. Проводятся также специальные семинары для членов бюро Томского обкома КПСС. Опыт радиотехнического завода изучают и приступают к созданию АСУП на подшипниковом, электротехническом и других томских заводах. Что дает АСУП заводу и его директору? Ответ на этот вопрос имеется в [7, с. 27]: «Я теперь знаю, что может завод», – говорил тогда Феликс Иванович».

Благодаря АСУП директор завода знает о возможностях завода, но министерские чиновники, к сожалению, этого не знают, а именно они «спускали» планы на заводы в те времена [7, с. 27]: в 1968 г. на радиотехническом заводе было собрано всего 3 тыс. магнитофонов «Комета», а плановое задание министерства заводу на следующий год было спущено уже в количестве 48 тыс. магнитофонов! Этот план был невыполним, но «план – это закон». Ф.И. Перегудов от этого плана отказался и обосновал своё решение расчетами на основе АСУП.

Для разбора ситуации в Томск прибыл первый заместитель министра, и основной разговор по создавшейся проблемной ситуации состоялся у Е.К. Лигачева – первого секретаря Томского обкома КПСС. Е.К. Лигачев был сторонником обоснованных планов, и в итоге радиотехническому заводу был утвержден реальный план. Но Ф.И. Перегудов после этой истории для министерских чиновников стал «неудобным» директором, и его заводская директорская карьера стала приближаться к завершению. Вскоре ему предложили должность в одном из московских НИИ, но Е.К. Лигачев с этим предложением министра не согласился (в советские времена коммунист не мог быть переведен на другое место работы без согласия партийной организации, а Ф.И. Перегудов стал убежденным коммунистом еще в студенческие годы), и Ф.И. Перегудов назначается в 1970 г. заместителем директора, а затем и директором НИИ автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ). После описываемых событий открываются новые страницы его биографии. Эти страницы тесно связаны с ТУСУРом и подробно изложены в книгах [3–6]. Далее вспомним менее известные события, которые не отмечаются в официальной биографии Ф.И. Перегудова, но они важны для многих сотрудников и студентов ТУСУРа: вспомним историю создания кафедры АСУ.

### Из истории кафедры АСУ

В 1971 г. Томский институт радиоэлектроники и электронной техники (ТИРиЭТ) был переименован в Томский институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники (ТИАСУР), единственный вуз в СССР, имевший в своем названии аббревиатуру «АСУ», но не имевший в тот момент в своей структуре кафедры АСУ. В ТИАСУРе в том же 1971 г. В.П. Тарасенко [10] была создана кафедра ОАСУ, которая обеспечивала подготовку инженеров по специальности «Автоматизированные системы управления», но, несмотря на название, созвучное термину «АСУ», она была все-таки кафедрой оптимальных и адаптивных систем управления (ОАСУ), а по кадровому и научному потенциалу в большей степени соответствовала специализации АСУ технологическими процессами (АСУ ТП).

Оригинальность ситуации, сложившейся в ТИАСУРе тех лет, можно подчеркнуть также тем, что во многих вузах страны уже были созданы кафедры АСУ. Итак, в начале 1970-х годов имелись все необходимые предпосылки для создания в ТИАСУРе кафедры АСУ. В этой ситуации решающее слово было за инициатором и организатором работ по созданию АСУ народным хозяйством Томской области (АСУ ТО) директором НИИ АЭМ при ТИАСУРе – головной организации по разработке АСУ ТО Ф.И. Перегудовым. Он дал согласие на заведование новой кафедрой, и 6 июня 1974 г. в Минвузе РСФСР был подписан приказ об организации в ТИАСУРе кафедры АСУ. Так появилась кафедра АСУ. Фактически она была создана на базе НИИ АЭМ, а директор НИИ АЭМ Ф.И. Перегудов стал ее первым заведующим на общественных началах.

Автор статьи в 1972 г. по приглашению В.П. Тарасенко перешел на работу из ТГУ на кафедру ОАСУ ТИАСУРа и был очевидцем становления кафедры АСУ. В то время мне пришлось обеспечивать на кафедре ОАСУ дисциплину «Основы построения АСУ», и когда появилась кафедра АСУ, то эта дисциплина была передана мною на кафедру АСУ ст. преподавателю В.С. Таланкину. Штатных сотрудников на кафедре АСУ сначала было мало: кроме упомянутого выше В.С. Таланкина было еще трое, и среди них доцент Н.П. Фефелов, который был заместителем заведующего кафедрой АСУ Ф.И. Перегудова и из-за чрезвычайной занятости Феликса Ивановича выполнял на кафедре практически всю учебно-организационную и учебно-методическую работу. Ядро кадрового, научного и технического потенциала кафедры АСУ находилось вне ее пределов. В учебный процесс кафедры АСУ Ф.И. Перегудовым было вовлечено все второе отделение НИИ АЭМ, а учебно-лабораторной базой кафедры были вычислительный центр (ВЦ) ТИАСУР, ВЦ коллективного пользования (ВЦ КП) и другие объекты АСУ ТО.

Приведем выдержки из воспоминаний доцента Н.П. Фефелова [3, с. 255]: «Кафедра АСУ помещалась в одной маленькой комнате малого корпуса ТИАСУРа и начала учебный процесс с 1975/76 учеб-

ного года. На специальность АСУ в тот год было принято 5 групп, причем выпускающими были три кафедры:

- АСУ – по специализации «АСУ организационного типа»;
- ОАСУ – по специализации «АСУ технологическими процессами»;
- ТУ – по специализации «Технические средства АСУ».

...В 1975 г. на кафедре было четыре штатных преподавателя: доцент Н.П. Фефелов, ст. преподаватели В.С. Таланкин и Р.Г. Батенко; ассистент Е.Л. Дьяченко (Жукова).

Совместно с кафедрой ОАСУ был разработан учебный план, существенно отличающийся от типового по специальности «Автоматизированные системы управления»...

Усилиями Ф.И. Перегудова в Томске был организован вычислительный центр коллективного пользования (ВЦ КП), который сначала располагался в корпусе РТК (восточное крыло первого этажа), а затем был переведен в высотное здание на нынешней Новособорной площади. Работа по внедрению ВЦ КП в ряде городов России была удостоена в 1983 г. премии Совета Министров СССР и первый заведующий кафедрой АСУ стал ее лауреатом. В тот год кафедра АСУ заняла первое место в соревновании кафедр вуза».

Из цитируемых воспоминаний доцента Н.П. Фефелова следует, что, несмотря на занятость Ф.И. Перегудова, становление и развитие кафедры АСУ проходило вполне успешно, и кафедра даже бывала лидером в соцсоревновании кафедр ТИАСУРа. Конечно было некоторое несоответствие собственных (особенно кадровых) ресурсов кафедры и масштабов проводимой ею учебной и учебно-методической работы, но при Ф.И. Перегудове это несоответствие не проявлялось. Постоянно возникающие вопросы успешно разрешались его заместителями (вначале зам. зав. кафедрой был доцент Н.П. Фефелов, а затем доцент Э.И. Герман) при авторитетной поддержке Ф.И. Перегудова, не только как главного конструктора АСУ ТО, но с 1981 г. и как ректора ТИАСУРа. Мое участие в истории кафедры АСУ началось в марте 1984 г. [10], когда состоялась моя встреча с ректором ТИАСУРа И.Н. Пустынским с предложением возглавить одну из кафедр ТИАСУРа. В апреле 1984 г. я приступил к заведованию кафедрой АСУ ТИАСУРа (вначале на условиях внешнего совместителя, так как моим основным местом работы до июня 1984 г. был СФТИ).

Ф.И. Перегудов на кафедре АСУ уделял большое внимание воспитанию студентов: например, им была заложена традиция проведения «Дня специальности кафедры» ежегодно в мае на борту теплохода «Москва». Утром студенты и преподаватели кафедры совершали посадку на речном вокзале на арендованный вузом, но оплачиваемый кафедрой теплоход и плыли на нем вниз по течению Томи. На теплоходе было весело: были студенческие представления групп, и, конечно, были завтраки и обеды

за счет кафедры. На теплоходе плыли до береговой стоянки с просторной поляной или лугом. На этой поляне проводились спортивные соревнования между группами студентов с участием преподавателей. Фото этих мгновений студенческой жизни можно увидеть на с. 260 в [3]. К вечеру теплоход возвращался в Томск на речной вокзал. Студентам подобные речные круизы нравились, поэтому традиция, заложенная Ф.И. Перегудовым, поддерживалась на кафедре АСУ и после его отъезда в Москву вплоть до 1990-х годов до распада СССР: если в советское время у кафедры находились средства для оплаты аренды теплохода, то в новое капиталистическое время это стало невозможно. Дни специальности на кафедре проводились, но уже в ином формате.

### Заключение

Феликс Иванович Перегудов был многогранной личностью, и его друзья среди многих увлечений отмечают его страсть к альпинизму [7, с. 24]: в 1964 г. Ф.И. Перегудов участвовал в высотной экспедиции на пик Ленина, в 1965 – на пик Е. Корженевской.



Возложение вымпела о восхождении на пик Томских студентов (рядом с в. Белуха, Алтай) в память о 90-летию со дня рождения Ф.И. Перегудова

К 90-летию со дня рождения Ф.И. Перегудова томские альпинисты А.В. Дьячук, С.Е. Корнелик, Д.Г. Сальников и Д.В. Семенов совершили 31 июля 2020 г. восхождение на пик Томских студентов (район вершины Белуха, Алтай) и укрепили на этой горной вершине памятный вымпел в честь Ф.И. Перегудова как альпиниста. 31 августа 2020 г. представители от команды томских альпинистов и представители от ТУСУРа во главе с ректором В.М. Рулевским закрепили аналог этого памятного вымпела на мемориальной доске на главном корпусе ТУСУРа.

Ученый и организатор науки, производства и высшего образования, талантливый человек Феликс Иванович Перегудов продолжает жить в своих делах, монографиях, учебниках, научных статьях и памяти его соратников, учеников, многих других



людей, которые его знали. Среди его учебников отметим [11], первое издание этого учебника вышло в издательстве «Высшая школа» (Москва) в 1989 г. и называлось «Введение в системный анализ». Первое издание мгновенно разошлось, и поэтому фонд Перегудова выпустил в свет второе издание учебника [11]. По этим книгам преподается курс системного анализа во многих вузах России.

#### Литература

1. Фонд Перегудова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Фонд Перегудова (archive.org), свободный (дата обращения: 10.03.2021).

2. Ректоры ТУСУРа. Жизненный путь Ф.И. Перегудова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tusur.ru/ru/o-tusure/istoriya-universiteta>, свободный (дата обращения: 10.03.2021).

3. 50 лет Томскому государственному университету систем управления и радиоэлектроники / сост. В.В. Подлипенский, Г.С. Шарыгин; под общ. ред. Ю.А. Шурыгина. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 520 с.

4. Кто есть кто в истории ТУСУРа / сост. В.В. Подлипенский, Г.С. Шарыгин; под общ. ред. Ю.А. Шурыгина. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2009. – 216 с.

5. Профессора Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники / сост. В.В. Подлипенский, Г.С. Шарыгин. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2017. – 200 с.

6. Томск от А до Я: Краткая энциклопедия города / под ред. д-ра ист. наук Н.М. Дмитриенко. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 440 с.

7. Денисов В.П. Его жизнь была подобна метеору. Воспоминания о Феликсе Ивановиче Перегудове / В.П. Денисов, М.М. Райзман, Л.П. Серафинович // Томский политехник. – 2000. – Вып. 6. – С. 20–29 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/34180>, свободный (дата обращения: 10.03.2021).

8. Ехлаков Ю.П. Наставник с большой буквы! Феликс Иванович Перегудов в судьбе коллег и учеников / Ю.П. Ехлаков, А.А. Фрицлер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [unitomsk.ru](http://unitomsk.ru) свободный (дата обращения: 10.03.2021).

9. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники 1962–2002 годы. Исторический очерк. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2002. – 175 с.

10. Кориков А.М. Покоритель вершин науки и техники: к 85-летию Владимира Петровича Тарасенко // Доклады ТУСУРа. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 119–124.

11. Перегудов Ф.И. Основы системного анализа: учеб. / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – 2-е изд., доп. – Томск: Изд-во НТЛ, 1997. – 396 с.

#### Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа, вед. науч. сотр. Томского ф-ла Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий СО РАН Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79  
Эл. почта: [korikov@asu.tusur.ru](mailto:korikov@asu.tusur.ru)

Korikov A.M.

#### From radiolocation of meteor trails to the systemic organization of science, higher education and production: dedication to the 90th anniversary of Felix Ivanovich Peregudov

*The article is dedicated to Felix Ivanovich Peregudov (01/20/1931 – 12/30/1990)*

F.I. Peregudov graduated from Tomsk Polytechnic Institute with a degree in Radio Engineering in 1953, then done his postgraduate studies at Tomsk State University and worked at Tomsk Polytechnic University: he was one of the organizers and leaders of the first research projects in the field of radiolocation. In 1961 he organized the Tomsk Design Bureau «Project», in 1966–1970 became Director of the Tomsk Radio Engineering Plant, in 1970–1981 took the position of Deputy Director and Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics at Tomsk Institute of Automated Control and Radioelectronics (TIASUR), in 1981–1984 took the lead as Rector of TIASUR. In 1984–1985 he continued his career as Deputy Minister of Higher and Secondary Specialized Education of the Russian Soviet Federative Socialist Republic (RSFSR), in 1985–1990 was appointed the USSR Minister and Deputy Chairman of the USSR State Committee for Higher Education. F.I. Peregudov applied a systematic approach in all areas of his activity. During the times he headed Tomsk Design Bureau «Project» F.I. Peregudov organized the development of passive radar equipment. Working as director of the Tomsk Radio Engineering Plant, he created one of the country's first automated control systems (ACS) for production. During his work at the Research Institute of AEM, he initiated the creation of one of the first territory automated control systems in the country. In 1973, the Research Institute of Automation and Electromechanics was designated as the head organization for the development of Tomsk region automated control system, and F.I. Peregudov becomes its chief designer. He made an appeal to many leading scientists from Tomsk to create the Tomsk region automated control system, on his initiative, a computing center for collective use of the Tomsk regional statistics department was established as an integral part of the Tomsk region automated control system. During his work in Moscow, Felix Ivanovich maintained constant contact with Tomsk. In 1990, he contributed to the opening in Tomsk of the first Science Park in Russia.

**Keywords:** Felix Peregudov, passive radar, director, chief designer, rector, minister of the USSR, automated control systems, shared computing center, science park.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-99-105

#### References

1. *Fond Peregudova* [Peregudov foundation]. Available at: <https://web.archive.org/web/20120604101409/http://www.peregudov.ru/>, free (Accessed: March 10, 2021) (in Russ.).

2. *Rektory TUSURa. Zhiznennyj put F.I. Peregudova* [TUSUR Rectors. Life Journey of F.I. Peregudov] Available at: <https://tusur.ru/ru/o-tusure/istoriya-universiteta>, free (Accessed: March 10, 2021) (in Russ.).

3. *50 let Tomskomu gosudarstvennomu universitetu sistem upravleniya i radioelektroniki* [50 years of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. Tomsk: Publishing office of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2012. 520 p. (in Russ.).

4. *Kto est kto v istorii TUSURa* [Who is who in TUSUR University history]. Tomsk: Publishing office of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2009. 216 p. (in Russ.).

5. *Professora Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Professors of Tomsk

State University of Control Systems and Radioelectronics] V.V. Podlipenskij, G.S. Sharygin. Tomsk: Publishing office of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2017. 200 p. (in Russ.).

6. *Tomsk ot A do Ya: Kratkaya enciklopediya goroda* [Tomsk: A-Z] / N.M. Dmitrienko. Tomsk: NTL Publishing office, 2004, 440 p. (in Russ.).

7. Denisov V.P. *Ego zhizn byla podobna meteoru. Vospominaniya o Felikse Ivanoviche Peregudove* [His Life was like a Meteor. Memories about Felix Peregudov] / V.P. Denisov, M.M. Rajzman, L.P. Serafinovich // Publishing office «Tomskij politehnik». 2000. vol. 6, pp. 20–29. Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/34180>, free (Accessed: March 10, 2021) (in Russ.).

8. Ekhlakov Yu.P. *Nastavnik s bolshoj bukvy! Feliks Ivanovich Peregudov v sudbe kolleg i uchenikov* [Advisor with the capital «A»! Felix Peregudov about the life journey of its colleagues and students]. Yu.P. Ekhlakov, A.A. Friczler. Available at: [unitomsk.ru](http://unitomsk.ru), free. (Accessed: March 10, 2021) (in Russ.).

9. *Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki 1962-2002 gody. Istoricheskij ocherk*. [Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics from 19962 to 2002. Historical Sketch] – Tomsk: Publishing office of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2002, 175 p. (in Russ.).

10. Korikov A.M. *Pokoritel' vershin nauki i texniki: k 85-letiyu Vladimira Petrovicha Tarasenko* [Corypheus of science and technology: 85 years of Vladimir Petrovich Tarasenko] // Proceedings of TUSUR University, 2019, vol. 22, № 4, pp. 119–124 (in Russ.).

11. Peregudov F.I. *Osnovy` sistemnogo analiza: Ucheb.* [Basics Principles of System Analysis: Coursebook], vol 2. F.I. Peregudov, F.P. Tarasenko. Tomsk: NTL Publishing office, 1997, 396 p. (in Russ.).

---

**Anatoly M. Korikov**

Doctor of Science in Engineering, Professor,  
Professor, Department of Automated Control Systems  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR),  
Leading Researcher at Tomsk Branch of the Institute  
of Computing Technologies of the Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-42-79  
Email: korikov@asu.tusur.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 неперидических 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

