ISSN 1818-0442
DOI: 10.21293/1818-0442



ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

2024 • Том 27, № 4

Доклады ТУСУР. 2024 • Том 27, № 4

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ДОКЛАДЫ ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

2024, том 27, № 4

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год **ISSN 1818-0442**

Основан в 1997 г. **DOI: 10.21293/1818-0442**

Редакционная коллегия

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

А.А. Шелупанов, д.т.н., проф., президент ТУСУРа, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник науки и техники РФ, дважды лауреат Премии Правительства РФ в области образования, дважды лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Томск, https://orcid.org/0000-0003-2393-6701 (***зам. гл. редактора***).

В.Н. Масленников, к.т.н., доцент, ТУСУР, Томск (***отв. секретарь***).

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

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

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

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

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

Д.П. Зегжда, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН, директор института кибербезопасности и защиты информации Санкт-Петербургского политехнического университета, Санкт-Петербург.

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

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

Ю.Н. Кульчин, д.ф.-м.н., академик РАН, научный руководитель, Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток.

П.С. Ложников, д.т.н., проф., зав. каф. комплексной защиты информации, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Информационная безопасность» Омского государственного технического университета, Омск.

Н.Д. Малютин, д.т.н., проф., главный научный сотрудник НИИ систем электрической связи (НИИ СЭС), профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоаппаратуры (КУДР) ТУСУРа, Томск.

В.Ш. Меликян (Vazgen Shavarsh Melikyan), д.т.н., проф., чл.-корр. НАН Республики Армения, ЗАО «Синопсис 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, зав. лабораторией плазменных источников, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, 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, https://orcid.org/0000-0002-6255-8865.

Н.А. Ратахин, д.ф.-м.н., академик РАН, советник директора, Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, Томск, 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.

А.Р. Сафин, д.ф.-м.н., доцент, рук. лаб. антиферромагнитной спинтроники, зам. директора по научной работе ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН; проф. каф. формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», Москва.

П.Е. Троян, д.т.н., проф. каф. физической электроники, ТУСУР, почётный работник высшего профессионального образования РФ, почётный работник науки и техники РФ, Томск.

И.А. Ходашинский, д.т.н., проф., каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа, заведующий лабораторией интеллектуальных систем каф. КСУП, Томск, 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, https://orcid.org/0000-0002-7883-5804.

С.М. Шандаров, д.ф.-м.н., проф., каф. электронных приборов, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, член Оптического общества Америки (OSA), член Международного НТО IEEE/LEOS инженеров по электротехнике и электронике, действительный член Оптического общества им. Д.С. Рождественского, Томск, https://orcid.org/0000-0001-9308-4458.

Ю.А. Шурыгин, д.т.н., проф., зав. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании, советник при ректорате по комплексным вопросам функционирования университета, научный руководитель НИИ АЭМ ТУСУРа, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Томск.

Адрес издателя, редакции: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. МК, каб. 310/2, тел. +7 (382-2) 70-15-82, 51-21-21. Эл. почта: journal@tusur.ru

Свидетельство о регистрации СМИ выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия: ПИ № ФС 77-19130

Учредитель: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Подписной индекс 20648 в каталоге агентства «Урал-Пресс»: газеты и журналы.

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

Подписано в печать 12.03.2025. Выход в свет 19.03.2025. Формат 60×84 1/8. Печ. л. 10,4. Тираж 500. Заказ 3. Цена 700 руб.

Editorial board

Viktor M. Rulevskiy — Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Scientific Adviser at the Research Institute of Automation and Electromechanics, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Science in Engineering.

Alexander A. Shelupanov — Deputy Editor in Chief, President of TUSUR University, Doctor of Science in 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), https://orcid.org/0000-0003-2393-6701.

Viktor N. Maslennikov — Executive Secretary of the Editor's Office, TUSUR University (Tomsk), Candidate of Sciences in Engineering.

Mikhail P. Batura — Leading Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), Doctor of Science in Engineering, Professor.

Boris A. Belyaev — Head of the Electrodynamics Department, Institute of Physics SB RAS (Krasnoyarsk), Doctor of Science in Engineering.

Ian G. Brown — PhD, Lawrence Berkeley National Laboratories, Berkeley (California, USA).

Sergei A. Gavrilov — Vice-Rector for Research, National Research University of Electronic Technology (MIET, Moscow), Doctor of Science in Engineering, Professor.

Yury P. Ekhlakov — Professor, Department of Data Processing Automation, TUSUR University, Doctor of Science in Engineering.

Dmitry P. Zegzhda — Professor, Corresponding Member of RAS, Director of the Institute of Cybersecurity and Information Protection, St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg), Doctor of Science in Engineering.

Vyacheslav M. Isaev — First Deputy Director, Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Science in Engineering, Mytishchi (Moscow region).

Anatoly M. Korikov — Professor, Department of Automated Control Systems, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Engineering.

Yury N. Kulchin — Scientific Director, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok), Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science in Physics and Mathematics.

Pavel S. Lozhnikov — Doctor of Science in Engineering, Head of Department «Complex Information Security» at Omsk State Technical University (Omsk), Professor.

Nikolay D. Malutin — Leading Researcher at the Research Institute of Electrical Communication Systems (SES), Professor of the Department of Design of Units and Components for Radioelectronic Systems, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Science in Engineering.

Vazgen Sh. Melikyan — Director, Academic Department of Synopsis Armenia (Yerevan, Armenia), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Science in Engineering, Professor.

Sergey D. Odintsov — International Member of the Norwegian Academy of Science and Letters, Professor, Institute of Space Sciences, Barcelona, Spain, Doctor of Science in Physics and Mathematics.

Yefim M. Oks — Head of the Department of Physics, TUSUR University, Doctor of Science in Engineering, Professor.

Eduard D. Pavlygin — First Deputy General Director for Research of Federal Research-and-Production Center JSC R&P Mars (Ulyanovsk), Candidate of Sciences in Engineering.

Nikolay A. Ratakhin — Director's Advisor at Institute of High Current Electronics, SB RAS, Academician of the Russian Academy of Sciences (Tomsk), Doctor of Science in 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 Science in Engineering, Professor.

Ansar R. Safin — Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Antiferromagnetic Spinelectronics Laboratory, Deputy Director for Research at Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Professor at Department of Formation and Processing of Radio Signals, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow).

Pavel E. Troyan — Professor at Department of Physical Electronics, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Science in Engineering, Professor.

Ilya A. Hodashinsky — Professor, Department of Computer Control and Design Systems, Head of the Laboratory of Intelligent Systems, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Science in Engineering.

Vladimir V. Shaidurov — Director, Institute of Computational Modeling SB RAS (Krasnoyask), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor.

Stanislav M. Shandarov — Head, Department of Electronic Devices, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor.

Yury A. Shurygin — Doctor of Science in Engineering, Professor, Head of Department of Computer Control and Design Systems, Rectorate Counsellor for University General Administration, Research Supervisor of TUSUR Research Institute of Automatics and Electromechanics, Honorary Worker of Science of the Russian Federation, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Education (Tomsk).

Содержание

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Савин А.А., Тисленко В.И., Андронов Е.В., Рощин К.Н.
Метод повышения детализации измерений группового времени запаздывания СВЧ-устройств векторными анализаторами цепей 7

Клюкин Д.В., Зайков А.О., Мочалов Д.М., Иванов А.А., Куксенко С.П.
Об использовании квадратур Гаусса в вычислении поверхностных сингулярных интегралов при решении задач рассеяния методом моментов 13

Михайленко В.Е., Заболоцкий А.М.
Обзор GaN-технологии при изготовлении монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона 23

Лакоза А.М.
Обзор современных устройств фильтрации и защиты от кондуктивных электромагнитных помех в радиоэлектронных системах 31

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Баранов В.В., Шелупанов А.А.
Методика и алгоритмы оценки деструктивного воздействия нарушителей на элементы распределенных информационных систем 49

Авсентьев О.С., Томилова Э.А.
Модели адаптивного управления защитой информации в процессе создания государственной информационной системы 61

Шабля Ю.В.
Сжатие информационных объектов с помощью методов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ 74

Василевский П.А., Булгакова Е.В.
Анализ существующих подходов к автоматизации применения стандартов CIS Controls и их ограничений 80

Сарин К.С.
Метод разделения данных для построения прогностических моделей машинного обучения 88

Емельянов А.М., Козлова Ю.М., Надеждин И.С.
Синтез нейросетевого алгоритма управления для автоматизированной системы управления каскадом центробежных экстракторов 97

Клековкин В.А., Марков Н.Г., Небаба С.Г.
Обнаружение и классификация малоразмерных летающих объектов на изображениях с использованием сверточных нейронных сетей семейства YOLOv5 103

Кривин Н.Н., Понамарев Д.Е., Шипуля М.А.
Влияние краевых эффектов среды со спиральной симметрией на резонансную частоту поглощения электромагнитных волн 111

Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Ушаков А.О.
Метод блочно-компонентных цепей и его перспективы в компьютерном моделировании химико-технологических систем 116

Кашкаров К.А., Букреев В.Г.
Моделирование литий-ионного аккумулятора с учетом деградации свойств материалов его элементов 122

Май С.З., Ходашинский И.А.
Алгоритм осьминога для моделирования движения группы беспилотных летательных аппаратов при выполнении поисковой миссии на море 127

Боровской И.Г., Матолыгин А.А., Ильин Е.П.
Нейросетевой анализ данных ультразвуковой дефектоскопии магистральных газопроводов 136

Романов А.С.
Методика семантической кластеризации для выявления признаков экстремизма в текстовой информации 141

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Осипов А.В.
Сопоставление энергетических характеристик резонансных *LLC*- и *LCC*-преобразователей постоянного напряжения 153

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

Памяти профессора И.Н. Пустынского 163

Требования 166

Contents

ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Savin A.A., Tislenko V.I., Andronov E.V., Roshchin K.N.
Detail enhancement method for group delay measurement of microwave devices using vector network analyzers 7
Klyukin D.V., Zajkov A.O., Mochalov D.M., Ivanov A.A., Kuksenko S.P.
Using Gauss Quadratures to Compute Surface Singular Integrals in the Method of Moments for Scattering Problems 13
Mikhailenko V.E., Zabolotsky A.M.
Review of technology for manufacturing monolithic integrated circuits for the microwave range 23
Lakoza A.M.
Review of modern devices for filtering and protection against conductive electromagnetic interference in radio electronic equipment 31

CONTROL, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Baranov V.V., Shelupanov A. A
Methods and algorithms to assess the destructive impact of violators on elements of distributed information systems 49
Avsentiev O.S., Tomilova E.A.
Adaptive Information Security Management Models in the Process of Developing a State Information System 61
Shablya Y.V.
Compression of information objects using combinatorial generation methods based on AND/OR trees 74
Vasilevskiy P.A., Bulgakova E.V.
Analysis of existing approaches to application automation for CIS Controls standards and their limitations 80
Sarin K.S.
Data splitting method for building machine learning models 88
Emelyanov A.M., Kozlova Yu. M., Nadezhdin I.S.
Synthesis of a neural network controller for an automated system controlling a cascade of centrifugal extractors 97
Klekovkin V.A., Markov N.G., Nebaba S.G.
Detection and classification of small-size flying objects in images using convolutional neural networks from the YOLOv5 family 103
Krivin N.N., Ponamarev D.E., Shipulia M.A.
Influence of the edge effects of medium with spiral symmetry on the resonant frequency of electromagnetic waves absorption 111
Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Ushakov A.O.
Block-component circuit method and its prospects in computer modeling of chemical-engineering systems 116
Kashkarov K.A., Bukreev V.G.
Modeling of lithium-ion battery considering the materials degradation properties of its cells 122
Mai X.D., Hodashinsky I.A.
Giant Pacific Octopus Algorithm for Modeling Unmanned Aerial Vehicle Motion in a Maritime Mission 127
Borovskoi I.G., Matolygin A.A., Ilyin E.P.
Neural network data analysis for ultrasonic non-destructive testing of main gas pipelines 136
Romanov A.S.
Semantic clustering technique to identify the signs of extremism in text information 141

ELECTRICAL ENGINEERING

Osipov A.V.
A Comparative Study of Energy Characteristics in Resonant LLC- and LCC- DC-DC-Converters 153

IN MEMORY OF THE SCIENTIST

Commemorating Prof. Ivan N. Pustynskiy 163

Manuscript requirements 166

ЭЛЕКТРОНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.317.34

А.А. Савин, В.И. Тисленко, Е.В. Андронов, К.Н. Рощин

Метод повышения детализации измерений группового времени запаздывания СВЧ-устройств векторными анализаторами цепей

Рассмотрен способ измерения группового времени запаздывания СВЧ-устройств, обеспечивающий высокую детализацию по частоте без ухудшения точности. Уменьшение шага измерений векторного анализатора цепей приводит к возрастанию случайной составляющей погрешности, которая впоследствии снижается за счет фильтрации во временной области. Приведены результаты моделирования разработанного метода.

Ключевые слова: групповое время запаздывания, СВЧ-устройство, векторный анализатор цепей, фильтрация во временной области.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-7-12

Используемые в радиотехнических системах и комплексах элементы СВЧ-тракта, например фильтры, как правило, имеют нелинейную фазочастотную характеристику (ФЧХ). Уровень вносимых ими фазовых искажений при передаче широкополосных сигналов можно оценить, зная неравномерность группового времени запаздывания (ГВЗ) в рабочей полосе частот. Таким образом, задача измерения ГВЗ и оценки его неравномерности является актуальной. ГВЗ определяется следующим выражением:

$$\tau(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}, \qquad (1)$$

где $\varphi(\omega)$ – ФЧХ коэффициента передачи (КП) устройства; ω – круговая частота. Если в пределах полосы частот сигнала ГВЗ остается постоянным (линейная ФЧХ), то неравномерность равна 0 и фазовые искажения отсутствуют.

Основным прибором для измерения параметров рассеяния СВЧ-устройств принято считать векторный анализатор цепей (ВАЦ). В данной работе рассмотрен метод получения информации о ГВЗ тестируемого устройства при помощи стандартных возможностей ВАЦ. Настройка прибора при измерении ГВЗ предполагает задание апертуры или частотного интервала расчета ГВЗ. Использование большой апертуры приводит к потере деталей неравномерности ГВЗ. При малой апертуре трасса оказывается чрезмерно зашумленной. К сожалению, не существует общего правила для выбора апертуры, необходимое значение рекомендуется подбирать эмпирически [1]. Это приводит к отсутствию в отрасли общепринятых подходов для расчета метрологических характеристик точности измерений ГВЗ.

Назначение предлагаемого метода заключается в повышении уровня детализации измерений ГВЗ по частоте без потери точности.

Краткий обзор основных методов измерения ГВЗ СВЧ-устройств при помощи векторных анализаторов цепей

Традиционный способ расчета ГВЗ по результатам измерений параметров рассеяния при помощи ВАЦ предполагает использование приращений ФЧХ устройства между соседними частотными точками (основной метод расчета ГВЗ в приборах компании Микран [2]):

$$\tau(f_1) = -\frac{1}{2\pi}\frac{\varphi(f_2)-\varphi(f_1)}{f_2-f_1},\ f_2 > f_1. \qquad (2)$$

В (2) полагаем, что полученное значение соответствует ГВЗ устройства на частоте f_1. В других вариантах применения (2) можно сопоставить полученное значение ГВЗ частоте f_2 или середине интервала между частотами f_1 и f_2. Такая неоднозначность при использовании простой разностной формулы (2) не является существенной, тем более, когда необходимо исследовать неравномерность ГВЗ. Однако если ГВЗ устройства между соседними точками измерений претерпевает существенные изменения, то расчет по (2) при любом способе задания частоты для отсчета ГВЗ может иметь большую методическую составляющую погрешности, связанную с вычислением производной разностным методом. Минимальная методическая погрешность реализуется, если результат приписывать середине интервала между частотами f_1 и f_2. Очевидно, что для дальнейшего снижения погрешности, вызванной изменчивостью истинного значения ГВЗ устройства, необходимо уменьшать шаг измерений ВАЦ $\Delta f = f_2 - f_1$.

Помимо описанной выше методической погрешности, кратко рассмотрим влияние погрешности прямых измерений ВАЦ, в данном случае речь идет об измерении аргумента КП $\varphi(f)$. Основными источниками погрешности измерений ВАЦ являются составляющие систематической погрешности и влияние шума измерений, приводящего к случайной флуктуационной погрешности. Неисключенная (остаточная после калибровки) систематическая погрешность в ряде случаев может быть медленной (коррелированной) функцией частоты, и ее влияние при нахождении разности (2) оказывается частично скомпенсированным. Однако этот вопрос требует отдельного внимательного изучения. Поэтому основной акцент в данной работе сделаем на влиянии случайной погрешности, не коррелированной между соседними по частоте точками измерений. Обозначим дисперсию случайной составляющей погреш-

ности измерений аргумента КП D_φ. Тогда дисперсия случайной погрешности при расчете ГВЗ по (2) составит

$$D_\tau = \frac{2D_\varphi}{(2\pi\Delta f)^2}. \quad (3)$$

Главный вывод, следующий из (3), заключается в том, что при фиксированном значении D_φ (определяется преимущественно полосой фильтра промежуточной частоты в приемниках ВАЦ) для снижения D_τ необходимо увеличивать Δf. Таким образом, как отмечалось ранее, для снижения методической погрешности апертуру Δf необходимо уменьшать, а для снижения случайных флуктуаций ГВЗ апертуру следует увеличивать.

Отчасти по рассмотренным выше причинам в современных ВАЦ кроме двухточечного метода (2) находят применение многоточечные алгоритмы расчета ГВЗ. Принципиальной разности между ними и формулой (2) нет. Часть подобных алгоритмов используют более сложные схемы расчета ГВЗ, привлекая для обработки множество точек в некотором поддиапазоне частот (дополнительный метод расчета в приборах компании Keysight Technologies [3]). Друга часть разделяет понятие шага по частоте измерений ФЧХ Δf и апертуру расчета ГВЗ, равную $n\Delta f$, где n – целое положительное число; $1 < n < N$; N – общее число точек измерений ФЧХ. При этом расчеты ГВЗ выполняются при помощи (2) для точек, отстоящих друг друга на $n\Delta f$ (дополнительный метод расчета в приборах компании Rohde&Schwarz [4]).

При использовании максимальной апертуры, т.е. при $n = N - 1$, можно добиться минимальной дисперсии D_τ (3). Однако фактическая точность при этом будет существенно зависеть от степени изменчивости ГВЗ устройства в полосе измерений. Для устройств с примерно постоянным ГВЗ снижение влияния флуктуационной погрешности можно обеспечить за счет усреднения результатов расчета по (2) в широкой полосе, содержащей множество точек. Корреляция вычисляемых разностей способствует эффективному подавлению шумовой составляющей. Альтернативным способом такого усреднения является анализ оценки импульсной характеристики (ИХ) устройства в полосе измерений ВАЦ, полученной в результате преобразования КП во временную область. Положение максимума модуля ИХ на оси времени соответствует средней задержке в устройстве. Очевидно, что класс устройств с неизменным по частоте ГВЗ крайне ограничен.

Описание предлагаемого метода

Можно предложить методы определения ГВЗ, не реализованные в существующих современных ВАЦ и основанные на аппроксимации ФЧХ с последующим определением производной (1). Главными преимуществами использования аппроксимации может стать снижение погрешности (при соответствующем выборе аппроксимирующих функций) и возможность нахождения ГВЗ непосредственно в точках измерений ВАЦ. Среди наиболее известных методов аппроксимации следует выделить полиномиальную аппроксимацию, использование сплайнов и т.д. Отдельно хотелось бы отметить, что для непрерывной функции ФЧХ, измеренной в дискретных точках, может быть записано ее представление рядом Котельникова. Если предположить, что образ во временной области для ФЧХ имеет ограниченную длительность, то для нахождения производной применимы развитые в работах [5, 6] подходы. Помимо прямого расчета производной ФЧХ по значениям ее отсчетов, могут быть оценены метрологические характеристики такого алгоритма определения ГВЗ [7]. В рамках данной работы рассмотрен метод, который фактически основан на гармонической аппроксимации и интерполяции [8]. Целью разработки алгоритма является повышение частотной детализации измерений ГВЗ без ухудшения точности при использовании простой формулы (2).

Итак, пусть пользователем ВАЦ, исходя из априорных данных о характере исследуемого устройства, установлен шаг измерений по частоте Δf, обеспечивающий достоверные и неискаженные при дискретизации измерения комплексного КП. Это означает, что непрерывная функция КП будет измерена в дискретных точках с шагом Δf и максимальная задержка, учитываемая во временной области, составит $1/\Delta f$ (период однозначности). Известно, что дифференцирование функции приводит к расширению образа Фурье. Таким образом, для обеспечения достоверных и неискаженных измерений ГВЗ требуется более мелкий шаг по частоте. Введем целочисленный параметр $k \geq 2$, такой, что фактический шаг измерений будет составлять $\Delta f/k$, а диапазон во временной области расширится до значения $k/\Delta f$. В предыдущем разделе показано, что снижение шага измерений по частоте приводит к увеличению случайной погрешности расчета ГВЗ по (2). Рассмотрим, как этого избежать.

Для проведения дальнейших рассуждений необходимо напомнить об используемой во всех современных ВАЦ технологии фильтрации во временной области. Кратко ее суть заключается в следующем. По измерениям в частотной области и при помощи обратного дискретного преобразования Фурье строится диаграмма во временной области. Затем на полученной диаграмме при помощи некоторой оконной функции выделяется нужный фрагмент или подавляются мешающие составляющие. И, наконец, выполняется прямое преобразование Фурье для получения частотной характеристики, свободной от мешающих составляющих. Математически фильтрация во временной области может быть записана в следующем общем виде:

$$S_{21,\mathrm{TD}}(\omega) = \mathrm{FFT}\left\{\mathrm{IFFT}[S_{21}(\omega)]\cdot W(t)\right\}, \quad (4)$$

где $S_{21}(\omega)$ – измеренная частотная характеристика КП устройства; $S_{21,\mathrm{TD}}(\omega)$ – полученная после фильтрации частотная характеристика КП устройства; $W(t)$ – оконная функция во временной области; FFT и IFFT – операторы преобразований Фурье (прямого и обратного, соответственно). В самом простом и

неоптимальном варианте используется прямоугольная оконная функция, равная 1 для полезных составляющих и 0 для мешающих. Однако, как правило, такой выбор приводит к искажениям $S_{21,\text{ТД}}(\omega)$, особенно на краях диапазона частот. Вопросы выбора оконной функции и применения других мер для снижения искажений этого типа выходят за рамки данной работы. С некоторыми методами повышения точности фильтрации во временной области можно ознакомиться по работам [9–12].

Возвращаясь к основной задаче данной статьи, заметим, что при расширении диаграммы во временной области с $1/\Delta f$ до $k/\Delta f$ информационным попрежнему является участок до $1/\Delta f$. Остальной диапазон может быть подавлен оконной функцией W, так как содержит только энергию случайных шумов измерений. Здесь нужно отметить следующее обстоятельство, дающее альтернативный подход к решению. Для повышения детализации в частотной области достаточно просто выполнить дополнение нулями исходной диаграммы во временной области.

Фактически такой подход реализует повышение детализации путем гармонической интерполяции измерений. В дальнейшем предлагаемый в настоящей работе алгоритм с фильтрацией будем обозначать алгоритмом *А*, а алгоритм с добавлением нулей – алгоритмом *Б*. Длительность ИХ вместе с нулями для обоих алгоритмов должна составлять $k/\Delta f$. Подчеркнем, что предлагаемый подход (алгоритм *А*) позволяет при необходимости точнее оценить (уточнить) действительную (истинную) длительность ИХ СВЧ-устройства, т.е. подтвердить или опровергнуть правильность изначального выбора шага по частоте Δf. И, во-вторых, за счет подавления шумов вне информативного участка диаграммы во временной области происходит снижение флуктуационной погрешности. Известно, что при увеличении частоты дискретизации в соответствии с ростом полосы увеличивается и дисперсия шума в отсчетах сигнала. В данном случае такого эффекта не происходит, измерения ВАЦ являются равноточными независимо от шага по частоте. В результате при введении k энергия шумов в частотной области распределяется на большем числе отсчетов во временной области. Однако поскольку при работе алгоритма *Б* требуется выполнить меньший объем измерений, то для снижения шумов и при сохранении общего времени измерений в этом случае может быть выбран более узкий фильтр промежуточной частоты в приемниках ВАЦ. Далее эту возможность не учитываем, полагая полученные на ВАЦ данные о КП устройства для алгоритмов *А* и *Б* равноточными.

Результаты математического моделирования алгоритмов

На простом примере анализа ГВЗ фильтра рассмотрим результаты моделирования алгоритмов *А* и *Б*. Полосовой фильтр с полосой пропускания от 2 до 3 ГГц синтезирован средствами MatLab. Детализированные значения КП фильтра для алгоритма *А* получены на частотах от 10 МГц до 5 ГГц с шагом 10 МГц (500 точек). С целью имитации реальных измерений добавлен шум со среднеквадратическим отклонением (СКО) –45 дБ в каждой частотной точке. Модуль смоделированных (далее для удобства – измеренных) значений КП и результаты расчета ГВЗ по (2) приведены на рис. 1 и 2 соответственно. График ГВЗ показан в полосе пропускания и на склонах амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра до уровня примерно –15 дБ. За счет снижения модуля КП при фиксированном уровне шума на других частотах погрешность по ГВЗ существенно возрастает.

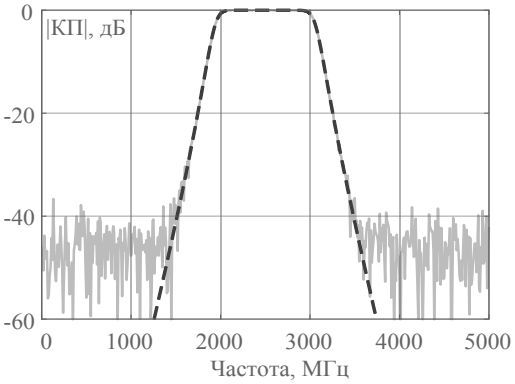


Рис. 1. Измеренные значения модуля КП фильтра (пунктирной линией приведено истинное значение)

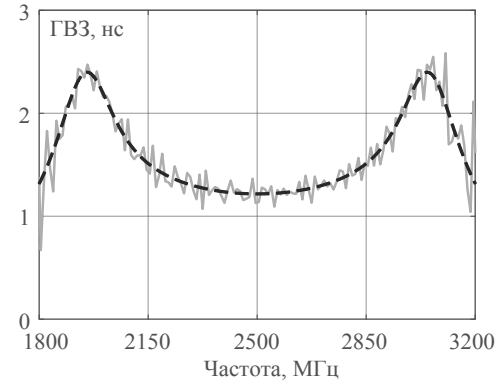


Рис. 2. Измеренные значения ГВЗ фильтра (пунктирной линией приведено истинное значение)

Далее рассмотрим ИХ фильтра – результат действия оператора IFFT над измеренным КП. На рис. 3 приведены значения модуля ИХ в зависимости от номера отсчета во временной области (всего 500 отсчетов). Видим, что информативным является участок с первыми 50 отсчетами. Остальные 450 отсчетов отражают шумы измерений и в соответствии с алгоритмом *А* должны быть обнулены. Для исследования алгоритма *Б* было выполнено прореживание 1/10 (шаг по частоте 100 МГц) и 1/20 (шаг по частоте 200 МГц). Соответствующие диаграммы также показаны на рис. 3 в двух внутренних графиках. В случае установления шага 100 МГц и $k = 10$ условия работы алгоритмов *А* и *Б* фактически идентичны (во временной области имеем 50 ненулевых отсчетов из 500). При установлении шага 200 МГц и $k = 20$ алгоритм *Б* во временной области будет рас-

полагать только 25 ненулевыми отсчетами из 500, что означает потерю половины отсчетов ИХ устройства за счет неверно выбранного шага по частоте.

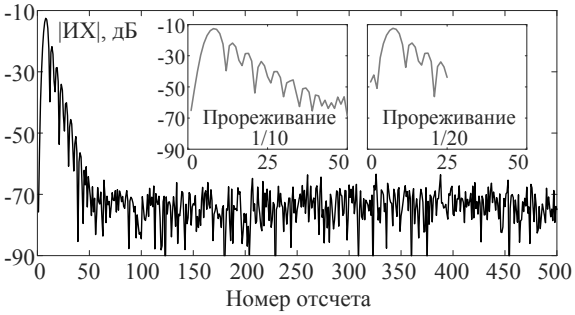


Рис. 3. Модуль ИХ фильтра

После моделирования работы алгоритмов (формула (4) для алгоритма *А* и дополнение ИХ нулями для алгоритма *Б*) и выполнения расчетов ГВЗ по (2) проведено сравнение с истинным ГВЗ и найдены погрешности разных подходов. Результаты с пояснениями даны на рис. 4 и 5.

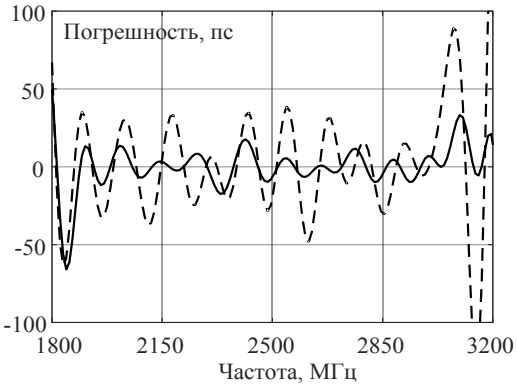


Рис. 4. Погрешности определения ГВЗ фильтра:
сплошная линия – для алгоритма *А*;
пунктирная – для алгоритма *Б* и шага по частоте 100 МГц

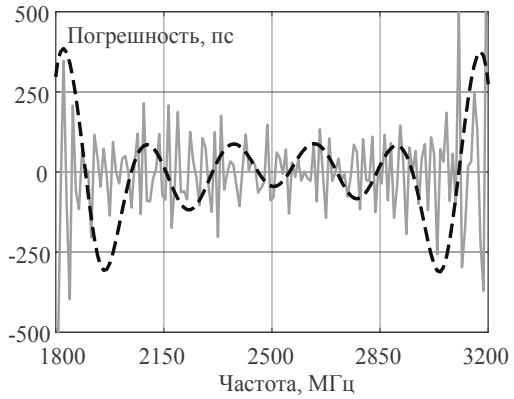


Рис. 5. Погрешности определения ГВЗ фильтра:
сплошная линия – для расчета по (2) без фильтрации во временной области;
пунктирная – для алгоритма *Б* и шага по частоте 200 МГц

Несмотря на идентичность условий алгоритма *А* и алгоритма *Б* для шага 100 МГц, первый обеспечивает более высокую точность оценок ГВЗ. Судя по графикам на рис. 4, погрешность алгоритма *А* не превышает 20 пс в полосе пропускания фильтра и 60 пс на склонах АЧХ. Погрешность алгоритма *Б* может доходить до 50 пс в полосе и 100 пс на склонах АЧХ для выбранных условий моделирования. Дело в том, что чем больше число измерений и точек по частоте, тем меньше энергии шумов попадает в область с полезными отсчетами ИХ. Шумы распределяются по прочим задержкам во временной области, частично устраняются алгоритмом (4).

Анализ результатов работы алгоритма *Б* для неверно выбранного шага по частоте (200 МГц, прореживание 1/20) показывает присутствие большой методической погрешности (ограниченная ИХ показана на рис. 3, внутренний график справа). Погрешность в этом случае, как и погрешность измерений ГВЗ без фильтрации, может достигать 300 пс и более. Тем не менее нужно отметить, что если пользователь изначально выбрал шаг 200 МГц, то за счет использования методики с введением передискретизации КП *k* можно предотвратить грубые погрешности в автоматическом режиме или в ручном режиме по рекомендациям, выдаваемым специальным программным обеспечением.

Заключение

Для снижения методической погрешности и повышения детализации измерений ГВЗ СВЧ-устройств необходимо уменьшать шаг по частоте при выполнении измерений параметров рассеяния при помощи ВАЦ. С уменьшением апертуры расчета ГВЗ увеличивается флуктуационная погрешность. Чтобы этого избежать, разработан и реализован в среде MatLab специальный алгоритм фильтрации во временной области, позволяющий повысить точность измерений ГВЗ даже при использовании простой расчетной формулы. Переход из частотной во временную область, помимо фильтрации шумов, обеспечивает возможность дополнительного анализа характеристик устройства, определение длительности импульсной характеристики и максимально допустимого шага по частоте для неискаженных измерений. Выбор оптимального шага по частоте с целью автоматизации измерений можно реализовать алгоритмически в программном обеспечении ВАЦ.

В результате введения параметра детализации *k* и применения фильтрации удается сохранить точность, но существенно повысить количество точек в диапазоне частот измерений. Выполнено моделирование. Предложенный в работе алгоритм можно применять в том числе и при тестировании устройств с преобразованием частоты.

В завершение отметим, что увеличение числа точек по частоте за счет введения параметра *k* приводит к увеличению времени измерений. Подобное увеличение времени измерений происходит при снижении полосы фильтра промежуточной частоты приемников ВАЦ, применяемое с целью снижения влияния шумов. Однако рассмотренный алгоритм, помимо снижения флуктуационной погрешности, обеспечивает также снижение методической по-

грешности. В пределе при очень малом шаге по частоте в результате измерений реализуется получение почти аналоговой зависимости от частоты для ФЧХ и, соответственно, ГВЗ. Фильтрация во временной области в современных ВАЦ применяется при необходимости подавления мешающих сигналов (обычно отраженных) или выделения полезных сигналов. Предложенный в работе алгоритм предназначен для подавления шумов измерений и может быть использован в качестве эталонного при получении референсных данных с целью последующей проверки средств измерений ГВЗ СВЧ-устройств.

Работа выполнена в рамках реализации «Программы развития Передовой инженерной школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева».

Литература

1. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. – М.: Изд. дом МЭИ, 2018. – 203 с.

2. Анализатор цепей векторный P4213/P4226. Руководство по эксплуатации. – Ч. II: Использование по назначению. – Томск: АО «НПФ «Микран», 2019. – 177 с.

3. Помощник по работе ВАЦ серии PNA Keysight Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://helpfiles.keysight.com/csg/N52xxA/Support/Configurations.htm (дата обращения: 20.09.2024).

4. Ostwald O. Group and Phase Delay Measurements with Vector Network Analyzer ZVR // Application Note 1EZ35_1E. – Rohde&Schwarz, 1998. – P. 8.

5. Булычев Ю.Г. Численно-аналитический метод дифференцирования функций с ограниченным спектром на основе формулы Котельникова / Ю.Г. Булычев, И.В. Бурлай, С.А. Погонышев // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1992. – Т. 32, № 3. – С. 396–407.

6. Булычев Ю.Г. Применение теоремы Котельникова в задаче дифференцирования функций с финитным спектром на неравномерной сетке интерполяции / Ю.Г. Булычев, И.В. Бурлай // Пробл. передачи информ. – 1996. – Т. 32, № 3. – С. 60–71.

7. Булычев Ю.Г. Метод дифференцирования функций ограниченной длительности с использованием сплайн-продолжений и разложения в ряд Котельникова / Ю.Г. Булычев, И.В. Бурлай // Пробл. передачи информ. – 1993. – Т. 29, № 4. – С. 46–57.

8. Кологривов В.А. Взаимосвязь интерполяции, аппроксимации и преобразования Фурье / В.А. Кологривов, С.В. Мелихов // Доклады ТУСУР. – 2006. – № 6. – С. 52–56.

9. Determination of Complex Residual Error Parameters of a Calibrated Vector Network Analyzer / G. Wubbeler, C. Elster, T. Reichel, R. Judaschke // 69th ARFTG Conference Digest, 8 June 2007. – USA, HI, Honolulu, 2007. – P. 1–4.

10. Chen Z. Spectrum Extension Edgeless Gating for Reduced Time Domain Gating Edge Errors / Z. Chen, Z. Xiong // European Patent, EP 3 499 382 A1, 19.06.2019.

11. Chen Z. An Adaptable Time Domain Gating Implementation with Enhanced Edge Treatment for Facilitating Vector Frequency Domain Data Analyses // 102nd ARFTG Microwave Measurement Conference, 21–24 January 2024. – USA, TX, San Antonio, 2024. – P. 1–4.

12. Delving into Time Domain Gating: An Extensive Study on Parameter Selection and Its Implications / Z. Chen, D. Lewis // 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 17–22 March 2024. – United Kingdom, Glasgow, 2024. – P. 1–5.

Савин Александр Александрович
Д-р техн. наук, инженер каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-65
Эл. почта: saasavin@mail.ru

Тисленко Владимир Ильич
Д-р техн. наук, проф. каф. РТС ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-38-98
Эл. почта: wolar1491@yandex.ru

Андронов Евгений Владимирович
Аспирант каф. РСС ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-65
Эл. почта: aev@tes-art.ru

Рощин Константин Николаевич
Аспирант каф. РСС ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-65
Эл. почта: konstantin.roshchin@gmail.com

Savin A.A., Tislenko V.I., Andronov E.V., Roshchin K.N.

Detail enhancement method for group delay measurement of microwave devices using vector network analyzers

The article discusses a method to measure the group delay of microwave devices, providing high frequency detail without compromising accuracy. Reducing the measurement step of a vector network analyzer leads to an increase in the random component of the error, that is subsequently reduced due to time-domain filtering. The modeling results for the developed method are presented.

Keywords: group delay, microwave device, vector network analyzer, time domain gating.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-7-12

References

1. Hiebel M. [Fundamentals of Vector Network Analysis]. *M.: MPEI Publishing House*, 2018, 203 p. (in Russ.).

2. Vektornii Analizator Tsepei P4213/P4226. Rukovodstvo po ekspluatacii. Chast II. Ispolzovanie po naznacheniy [Vector Network Analyzer P4213/P4226. Operation manual. Part II. Intended use]. Tomsk, *JSC «NPF Micran»*, 2019, 177 p. (in Rus.).

3. Keysight Technologies PNA Help. Available at: https://helpfiles.keysight.com/csg/N52xxA/Support/Configurations.htm (Accessed: September 20, 2024).

4. Ostwald O. Group and Phase Delay Measurements with Vector Network Analyzer ZVR // Application Note 1EZ35_1E, 1998, Rohde&Schwarz, p. 8.

5. Bulichev Y.G., Burlai I.V., Pogonishev S.A. [Numerical-analytical method for differentiating functions with a limited spectrum based on the Kotelnikov formula]. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1992, vol. 32, no. 3, pp. 396–407 (in Russ.).

6. Bulichev Y.G., Burlai I.V. [Application of Kotelnikov's theorem to the problem of differentiating functions with finite spectrum on a non-uniform interpolation grid]. *Problems of Information Transmission*, 1996, vol. 32, no. 3, pp. 60–71 (in Russ.).

7. Bulichev Y.G., Burlai I.V. [Method for differentiating functions of limited duration using spline continuations and Kotelnikov series expansion]. *Problems of Information Transmission*, 1993, vol. 29, no. 4, pp. 46–57 (in Russ.).

8. Kologrivov V.A., Melihov S.V. [Relationship between interpolation, approximation and Fourier transform]. *Proceedings of TUSUR University*, no. 6, December 2006, pp. 52–56 (in Russ.).

9. Wubbeler G., Elster C., Reichel T., Judaschke R. Determination of Complex Residual Error Parameters of a Calibrated Vector Network Analyzer // 69th ARFTG Conference Digest, 8 June 2007, Honolulu, HI, USA, pp. 1–4.

10. Chen Z., Xiong Z. Spectrum Extension Edgeless Gating for Reduced Time Domain Gating Edge Errors // European Patent, EP 3 499 382 A1, 19.06.2019.

11. Chen Z. An Adaptable Time Domain Gating Implementation with Enhanced Edge Treatment for Facilitating Vector Frequency Domain Data Analyses // 102nd ARFTG Microwave Measurement Conference, 21-24 January 2024, San Antonio, TX, USA, pp. 1–4.

12. Chen Z., Lewis D. Delving into Time Domain Gating: An Extensive Study on Parameter Selection and Its Implications // 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 17–22 March 2024, Glasgow, United Kingdom, pp. 1–5.

Aleksandr A. Savin
Doctor of Science in Engineering, Engineer,
Department of Radioelectronics and Communication Systems,
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-65
Email: saasavin@mail.ru

Vladimir I. Tislenko
Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Radio Engineering Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-38-98
Email: wolar1491@yandex.ru

Eugeny V. Andronov
Postgraduate student, Department of Radioelectronics and Communication Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-65
Email: aev@tes-art.ru

Konstantin N. Roshchin
Postgraduate student, Department of Radioelectronics and Communication Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-65
Email: konstantin.roshchin@gmail.com

УДК 519.64:621.396.67

Д.В. Клюкин, А.О. Зайков, Д.М. Мочалов, А.А. Иванов, С.П. Куксенко

Об использовании квадратур Гаусса в вычислении поверхностных сингулярных интегралов при решении задач рассеяния методом моментов

Выполнена оценка точности вычисления эффективной площади рассеяния методом моментов, используя квадратуры Гаусса для устранения сингулярности при формировании системы линейных алгебраических уравнений. Проведены вычисления бистатической эффективной площади рассеяния идеально проводящей сферы при различных комбинациях точек интегрирования. С использованием опубликованных данных выполнена оценка абсолютных и относительных отклонений полученных результатов. Используя метод выделения особенностей, выполнена оценка всех наборов данных, подтверждающая результаты анализа отклонений. Оценено число обусловленности матрицы системы линейных алгебраических уравнений. Выявлена наиболее универсальная комбинация точек интегрирования для вычисления сингулярных интегралов, которая обеспечивает наилучшее соотношение между точностью решения и вычислительными затратами. Выполнен расчет рассеяния корпуса с апертурой при помощи этой комбинации точек. Результаты показали хорошее согласование с данными, полученными в коммерческом программном обеспечении, основанном на методе конечных разностей во временной области.

Ключевые слова: численные методы, метод моментов, квадратуры Гаусса, эффективная площадь рассеяния, метод валидации выделением особенностей.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-13-22

Определение рассеивающих свойств объектов представляет большой интерес в области радиолокации [1, 2]. Исследования в этой области сопровождаются измерением эффективной площади рассеяния (ЭПР), однако эта процедура трудоемка и требует специального оборудования [3]. Поэтому в настоящее время широко применяются системы автоматизированного проектирования (САПР), основанные на численных методах электродинамики [4, 5]. Среди этих методов широкое распространение получил методов моментов (МоМ), метод конечных разностей во временной области (МКРВО) и метод конечных элементов [5–9].

При решении задач рассеяния с помощью МоМ в качестве операторного уравнения часто используется интегральное уравнение электрического поля [6]. Наличие функции Грина в этом уравнении приводит к необходимости вычисления сингулярных интегралов [10]. Поэтому используют разные способы устранения их сингулярности. Так, ранее выполнена оценка точности различных способов вычисления таких интегралов на примере типовой антенной задачи [11], среди которых способ, основанный на использовании симметричных квадратур Гаусса, показал наиболее высокую точность и универсальность. Использование различных комбинаций точек интегрирования позволяет балансировать между требуемой точностью и приемлемыми вычислительными затратами. Однако ранее выявлено, что более высокая вычислительная сложность при использовании большего числа точек интегрирования не всегда коррелирует с повышением точности [12]. Поэтому целесообразно выполнить поиск комбинации точек интегрирования, которая обеспечивает наилучшее соотношение между точностью решения и вычислительными затратами.

Цель работы – определить универсальную комбинацию точек интегрирования при решении задач рассеяния методом моментов.

Метод моментов

Метод моментов является универсальным численным методом сведения дифференциальных и интегральных (интегро-дифференциальных) уравнений к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [5]. Так, процедуру моделирования с использованием МоМ можно представить в виде следующей последовательности действий.

1. Аппроксимация неизвестной величины (плотности тока **J** на поверхности исследуемого объекта), рядом известных базисных функций. В результате искомая непрерывная функция представляется в виде ее дискретного аналога. С этой целью принято использовать разбиение криволинейных границ исследуемого объекта на треугольники, а для представления плотности тока в них – векторные базисные функции RWG, определяемых как [13]

$$\mathbf{f}_n(\mathbf{r}) = \begin{cases} \left(l_n / 2A_n^+\right)\boldsymbol{\rho}_n^+(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in T_n^+; \\ \left(l_n / 2A_n^-\right)\boldsymbol{\rho}_n^-(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in T_n^-; \\ 0, & \mathbf{r} \notin T_n^{\pm}, \end{cases} \quad (1)$$

где **r** – точка наблюдения, T_n^+ и T_n^- – два смежных треугольника с общим ребром l_n, а A_n^+ и A_n^- – площади треугольников T_n^+ и T_n^- соответственно, а

$$\boldsymbol{\rho}_n^+(\mathbf{r}) = \mathbf{r} - \mathbf{r}_n^+, \mathbf{r} \in T_n^+, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\rho}_n^-(\mathbf{r}) = \mathbf{r}_n^- - \mathbf{r}, \mathbf{r} \in T_n^-. \quad (3)$$

где $\mathbf{r}_n^+$ и $\mathbf{r}_n^-$ – векторы, направленные из начала координат в свободные вершины треугольников T_n^+ и T_n^- соответственно.

2. Подстановка полученного приближения неизвестной величины в операторное уравнение. В задаче рассеяния – это интегральное уравнение электрического поля, определяемое как

$$\mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r}) = j\omega\mathbf{A}(\mathbf{r}) + \nabla\Phi(\mathbf{r}), \quad (4)$$

где $\mathbf{E}^{\text{inc}}$ – воздействующее поле, а $\mathbf{A}$ и Φ – векторный и скалярный потенциалы соответственно, вычисляемые с помощью функции Грина, которая содержит информацию о среде, как [14]

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu\int_{S'} G(\mathbf{r},\mathbf{r}')\mathbf{J}(\mathbf{r}')dS', \quad (5)$$

$$\Phi(\mathbf{r}) = -\frac{1}{j\omega\varepsilon}\int_{S'} G(\mathbf{r},\mathbf{r}')\nabla'\cdot\mathbf{J}(\mathbf{r}')dS', \quad (6)$$

где $\mathbf{r}'$– точка источника, $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – функция Грина свободного пространства (однородная изотропная среда), выражаемая как

$$G(\mathbf{r},\mathbf{r}') = \exp(-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)/4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|. \quad (7)$$

3. Переход от функциональных уравнений к СЛАУ путем умножения левой и правой частей операторного уравнения (4) на подходящие тестовые функции и интегрирование по области их определения. Тогда СЛАУ записывается

$$\mathbf{Zi} = \mathbf{v}, \quad (8)$$

где $\mathbf{i}$ – искомый вектор коэффициентов, определяющий нормальные компоненты плотности тока $\mathbf{J}$, $\mathbf{Z}$ – матрица взаимодействий, а $\mathbf{v}$ – вектор правой части, описывающий воздействие. Элементы матрицы $\mathbf{Z}$ и вектора $\mathbf{v}$ вычисляются как [7]

$$z_{mn} = l_m\left(\frac{j\omega}{2}\left(\mathbf{A}^+_{mn}\cdot\boldsymbol{\rho}^+_m + \mathbf{A}^-_{mn}\cdot\boldsymbol{\rho}^-_m\right) + \Phi^-_{mn} - \Phi^+_{mn}\right), \quad (9)$$

$$v_m = l_m\left[\mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r})\cdot\boldsymbol{\rho}^+_m/2 + \mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r})\cdot\boldsymbol{\rho}^-_m/2\right]. \quad (10)$$

где

$$\mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r}) = \left(\mathbf{E}^{\text{inc}}_\theta\boldsymbol{\theta}_0 + \mathbf{E}^{\text{inc}}_\varphi\boldsymbol{\varphi}_0\right)\mathrm{e}^{-j\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}, \quad (11)$$

где $\boldsymbol{\theta}_0$ и $\boldsymbol{\varphi}_0$ – единичные орты, определяющие угол падения плоской электромагнитной волны (ПЭМВ) относительно сферических координат, которые совпадают с единичными векторами сферических координат только в точках на линии от 0 по направлению к $\mathbf{k}$, где $\mathbf{k}$ – волновой вектор, определяемый как

$$\mathbf{k} = k(\sin\theta_0\cos\varphi_0\mathbf{x}_0 + \sin\theta_0\sin\varphi_0\mathbf{y}_0 + \cos\theta_0\mathbf{z}_0). \quad (12)$$

Тогда компоненты вектора ПЭМВ определяются как

$$\mathbf{E}^{\text{inc}}_\theta = \sin(\alpha)\{\cos\theta\cos\varphi;\cos\theta\sin\varphi;-\sin\theta\}, \quad (13)$$

$$\mathbf{E}^{\text{inc}}_\varphi = \cos(\alpha)\{-\sin\varphi;\cos\varphi;0\}, \quad (14)$$

где α – угол поляризации.

При вычислении элементов матрицы $\mathbf{Z}$, когда базисная и тестовая RWG-функции имеют общий треугольник, возникает сингулярность, для устранения которой, в данной работе, применены симметричные квадратуры Гаусса. Данный способ предполагает замену интеграла суммой выборок подынтегрального выражения. При этом с каждой точкой выборки связан свой весовой коэффициент w [15]. Тогда

$$\int_{T_m}\int_{T_n} G(\mathbf{r},\mathbf{r}') = \sum_{q=1}^{N_q} w_q \sum_{p=1}^{N_p} w_p G\left(\mathbf{r}^q,\mathbf{r}^p\right), \quad (15)$$

где N_q и N_p – число точек интегрирования для тестовых и базисных функций соответственно.

4. Решение результирующей СЛАУ. Это дает разложение плотности поверхностных токов по базисным функциям.

5. Вычисление из поверхностных токов требуемых характеристик и их визуализация. Так, в задаче рассеяния требуемой характеристикой является ЭПР, которая вычисляется как

$$\sigma = 4\pi R^2\left|\mathbf{E}^{\text{scat}}\right|^2/\left|\mathbf{E}^{\text{inc}}\right|^2, \quad (16)$$

где $|\mathbf{E}^{\text{scat}}|$ – модуль амплитуды напряженности поля, создаваемого в точке наблюдения рассеянным полем, R – расстояние до дальней зоны [6].

Точность вычисления и вычислительные затраты

Для оценки точности вычислений проведено моделирование бистатической ЭПР идеальной проводящей сферы радиусом r = 0,5 м, являющейся типовой целью в радиолокации и часто используемой для верификации компьютерных вычислений с использованием МоМ [16–19]. В среде для генерации треугольной сетки GMSH [20] созданы пять вариантов расчетных сеток шагом дискретизации λ/4, λ/6, λ/8 на двух исследуемых частотах f = 1 и 2 ГГц (рис. 1). При этом для частоты 1 ГГц при шагах сетки λ/4, λ/6, λ/8 получено 1384, 3188, 5434 треугольников с числом RWG функций – N = 2076, 4782 и 8151, а для 2 ГГц – 5434 (N = 8151), 12120 (N = 18180), 21458 (N = 32187). Важно, что грубые сетки при λ/4 использованы исключительно для наглядности. Поскольку асимптотическая сложность формирования матрицы $\mathbf{Z}$ при использовании квадратур Гаусса составляет $O(N^2)$, вычислительные затраты могут оценены через число арифметических операций (Q), требуемых для заполнения матрицы как [11]

$$Q = 132N_qN_pN^2. \quad (17)$$

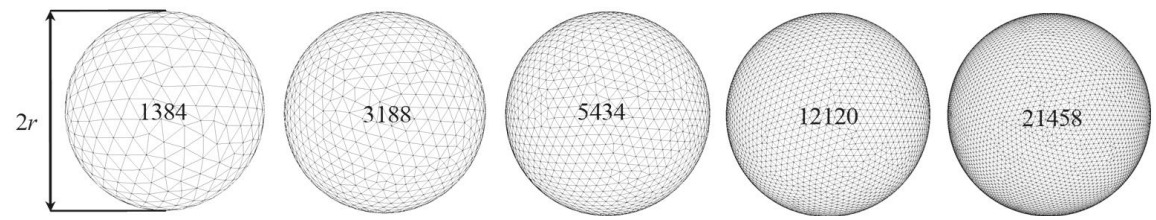


Рис. 1. Расчетные сетки модели идеально проводящей сферы (на сферах указано число треугольников)

Созданные расчетные сетки использовались для электродинамического моделирования при помощи авторской реализации МоМ (при изменении N_q и N_p), а также при помощи двух решателей на основе МоМ в стороннем программном обеспечении (ПО). Рассеянное поле фиксировалось в плоскости φ = 90º в диапазоне θ от 0 до 180º. В качестве воздействия использовалась ПЭМВ с вертикальной и горизонтальной поляризацией (α = 90 и 0º) в плоскости θ = φ = 0º, как показано на рис. 2, где $\overline{\mathbf{E}}$ и $\overline{\mathbf{H}}$ – векторы напряжённости электрического и магнитного полей ПЭМВ соответственно, а $\overline{\mathbf{E}}\times\overline{\mathbf{H}}$ – вектор Пойтинга. В качестве исследуемых комбинаций точек интегрирования (N_q, N_p) выбраны (1, 3), (1, 6), (1, 12), (3, 6), (4, 6), (3, 12), (4, 12) и (6, 12).

Результаты вычисления ЭПР сравнены с результатами, полученными при помощи аналитического подхода Ми (Mie) [21]. В табл. 1, 2 сведены средние абсолютные Δσ и относительные отклонения δσ результатов ЭПР, полученных в авторской реализации МоМ и в двух сторонних ПО (ПО 1 и ПО 2) от аналитического решения.

Дополнительно, использован метод валидации выделением особенностей FSV, который включен в стандарт IEEE STD 1597.1 [22] и позволяет оценить общую сходимость по значениям глобальной меры разности (*GDM* – global difference measure) [23]. Она обычно представляется доверительной гистограммой, в которой используются такие оценки как «Отлично», «Очень хорошо», «Хорошо», «Удовлетворительно», «Плохо» и «Очень плохо». Эти критерии качественно и в процентном соотношении позволяют отразить отклонения одного набора данных от другого. Такие гистограммы получены для всех комбинаций и представлены на рис. 3–5, где *а* – α = 90º, 1 ГГц; *б* – α = 0º, 1 ГГц; *в* – α = 90º, 2 ГГц; *г* – α = 0º, 2 ГГц. Видно, что (1, 3) и (4, 12) в среднем дают наибольшие и наименьшие отклонения соответственно, а учащение сетки позволяет уменьшить итоговые отклонения. Остальные комбинации дают промежуточные результаты. Для наглядности, результаты при λ/8 приведены на рис. 6.

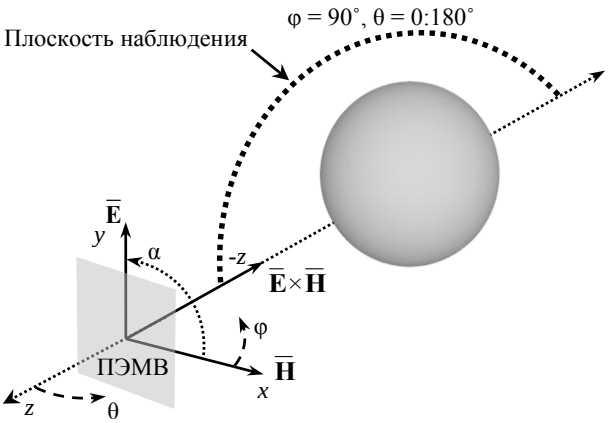


Рис. 2. Направление вертикально поляризованной ПЭМВ (α = 90º) и расположение плоскости наблюдения ЭПР

Таблица 1

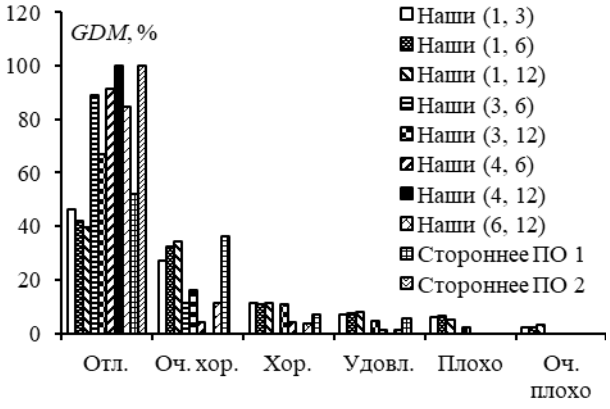
Средние абсолютные отклонения Δσ, м² результатов ЭПР по МоМ от аналитического решения Ми

Шаг сетки	*f*, ГГц	α, град	N_q = 1, N_p = 3	N_q = 1, N_p = 6	N_q = 1, N_p = 12	N_q = 3, N_p = 6	N_q = 3, N_p = 12	N_q = 4, N_p = 6	N_q = 4, N_p = 12	N_q = 6, N_p = 12	ПО 1	ПО 2
λ/4	1	90	0,68	0,75	0,76	0,06	0,11	0,10	0,17	0,11	0,61	0,09
		0	0,74	0,83	0,85	0,05	0,16	0,08	0,15	0,11	0,59	0,05
	2	90	1,30	1,42	1,44	0,14	0,16	0,55	0,25	0,15	0,65	0,03
		0	1,40	1,60	1,62	0,06	0,16	0,36	0,24	0,15	0,76	0,02
λ/6	1	90	0,34	0,34	0,35	0,14	0,02	0,87	0,07	0,02	0,25	0,03
		0	0,40	0,42	0,41	0,13	0,03	0,85	0,06	0,02	0,22	0,02
	2	90	0,68	0,74	0,75	0,05	0,05	0,09	0,11	0,05	0,24	0,01
		0	0,73	0,84	0,86	0,03	0,06	0,06	0,11	0,05	0,28	0,01
λ/8	1	90	0,56	0,19	0,19	0,05	0,01	0,08	0,04	0,02	0,12	0,02
		0	0,38	0,24	0,24	0,05	0,01	0,07	0,04	0,02	0,15	0,01
	2	90	0,39	0,43	0,44	0,04	0,02	0,06	0,06	0,02	0,23	0,01
		0	0,45	0,50	0,51	0,03	0,03	0,04	0,06	0,02	0,24	0,01

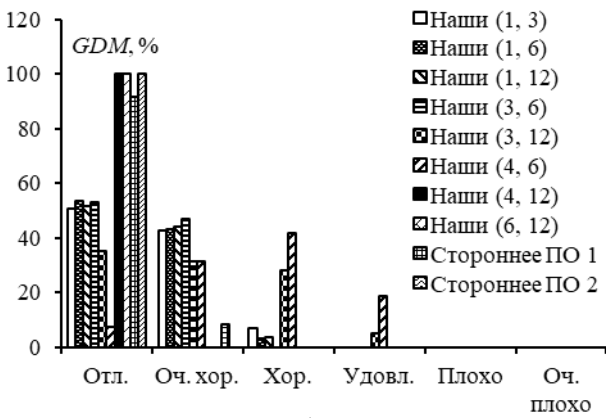
Таблица 2

Средние относительные отклонения δσ, % результатов ЭПР по МоМ от аналитического решения Ми

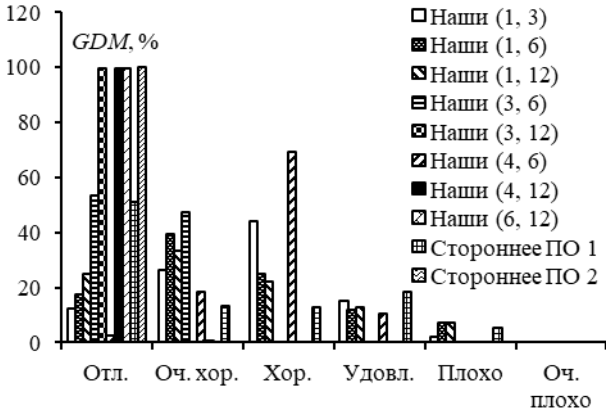
Шаг сетки	*f*, ГГц	α, град	N_q = 1, N_p = 3	N_q = 1, N_p = 6	N_q = 1, N_p = 12	N_q = 3, N_p = 6	N_q = 3, N_p = 12	N_q = 4, N_p = 6	N_q = 4, N_p = 12	N_q = 6, N_p = 12	ПО 1	ПО 2
λ/4	1	90	16,98	15,62	16,00	4,05	10,89	5,12	4,32	5,82	14,93	2,50
		0	8,07	8,40	9,16	4,40	14,49	4,52	1,10	7,27	6,60	0,77
	2	90	25,90	19,51	18,43	9,15	4,36	22,70	4,54	4,44	14,44	0,90
		0	8,23	7,47	7,00	3,41	1,00	9,46	0,60	1,22	7,06	0,60
λ/6	1	90	10,86	6,67	6,25	5,69	1,68	23,50	1,97	1,82	8,04	1,00
		0	8,82	5,80	3,69	7,86	1,24	33,19	0,43	1,70	3,54	0,35
	2	90	14,60	9,10	8,92	2,78	1,89	3,59	1,98	1,94	8,16	0,36
		0	4,74	3,05	3,02	1,04	0,48	1,43	0,18	0,56	4,64	0,22
λ/8	1	90	20,40	3,46	3,46	1,98	0,99	2,89	1,15	1,11	3,89	0,57
		0	25,50	2,59	2,13	2,06	0,63	3,40	0,22	0,82	2,50	0,23
	2	90	6,07	4,86	4,80	1,56	1,11	1,92	1,14	1,15	6,34	0,17
		0	2,14	1,78	1,77	0,72	0,35	0,92	0,10	0,41	2,60	0,09



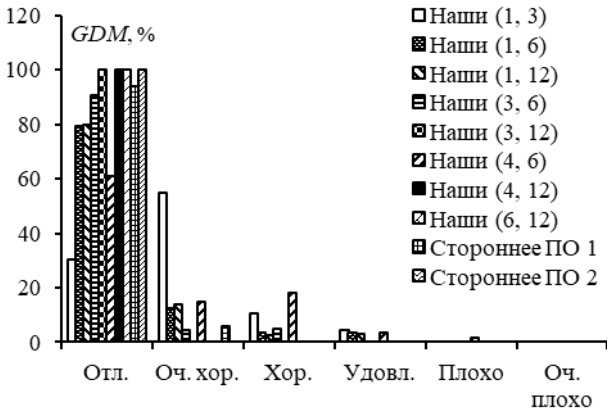
а



б

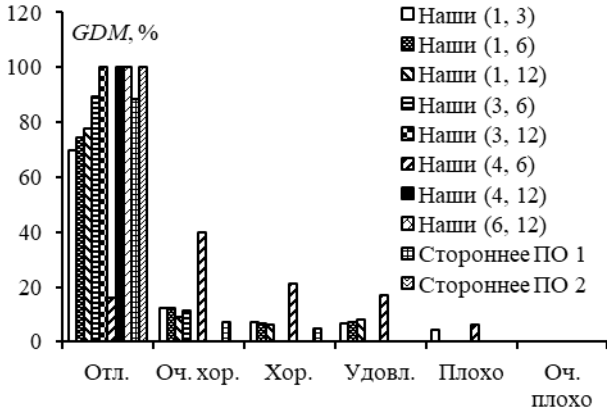


в

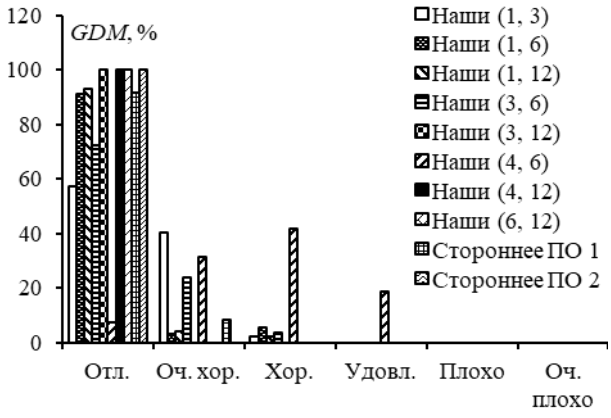


г

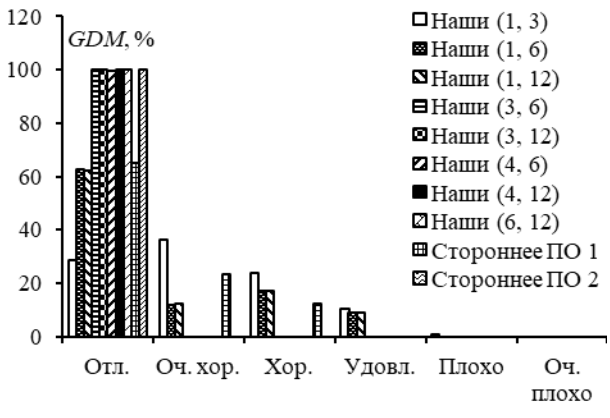
Рис. 3. Гистограмма FSV: расчетная сетка λ/4



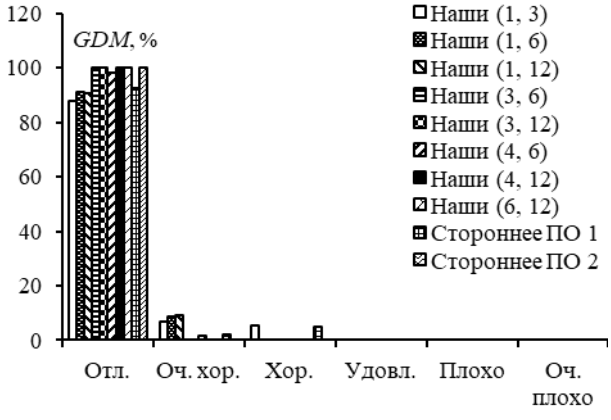
а



б



в



г

Рис. 4. Гистограмма FSV: расчетная сетка λ/6

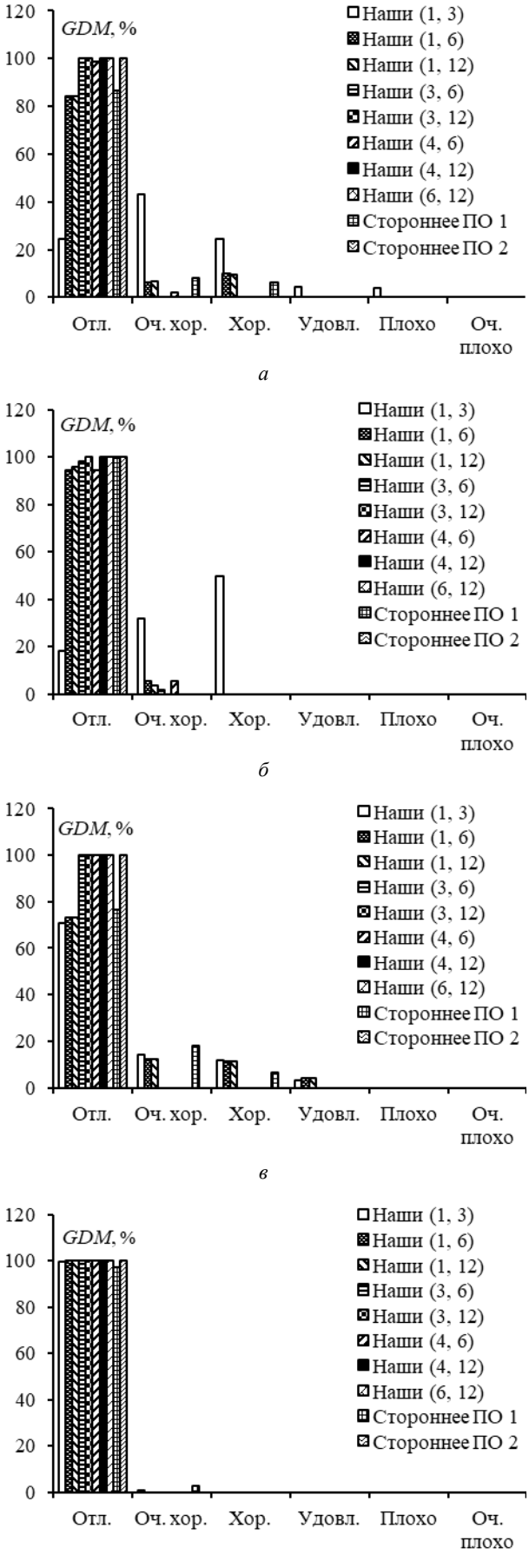


Рис. 5. Гистограмма FSV: расчетная сетка λ/8

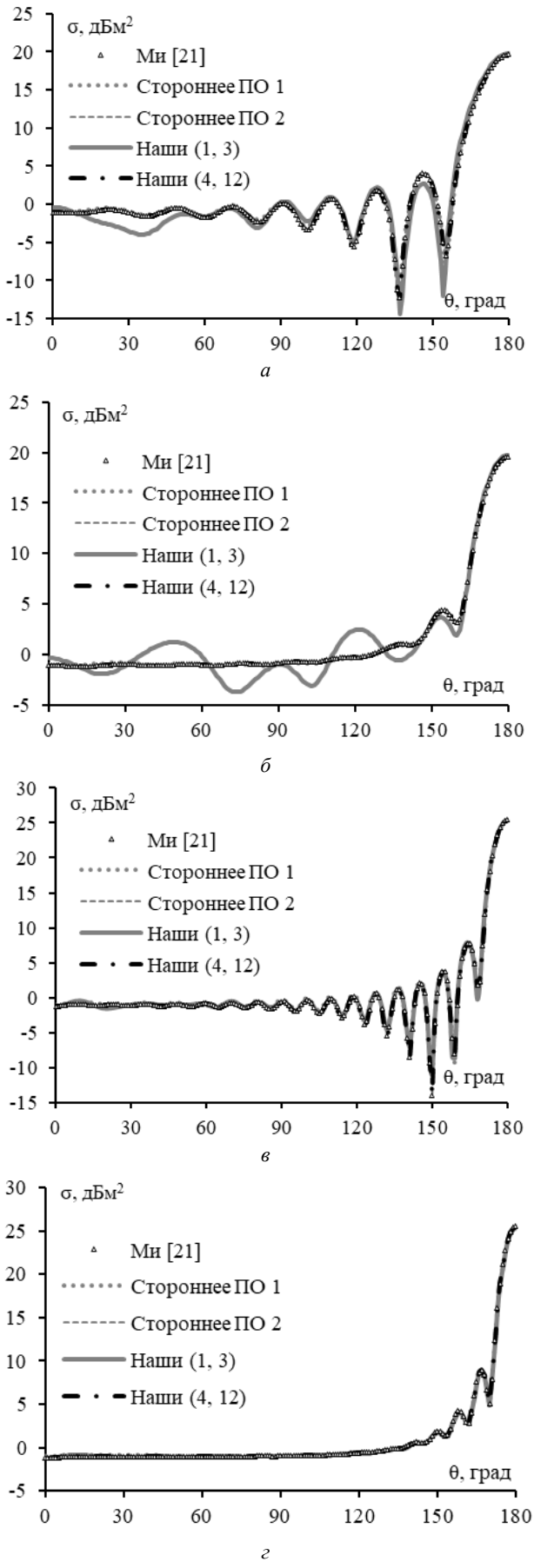


Рис. 6. Бистатическая ЭПР (сетка λ/8): *а* – α = 90º, 1 ГГц; *б* – α = 0º, 1 ГГц ; α = 90º, *в* – 2 ГГц ; *г* – α = 0º, 2 ГГц

Из табл. 1 и 2 видно, что при грубой сетке (λ/4) минимальные абсолютные отклонения от аналитического решения имеют комбинации точек интегрирования (3, 6) и (3, 12) –до 0,14 и до 0,16 соответственно. Однако эти комбинации имеют значительные относительные отклонения: до 9,15% для (3, 6) и до 14,49% для (3, 12). Наименьшие δσ имеет комбинация (4, 12) – до 4,54%. Из доверительной гистограммы по методу FSV (см. рис. 3) видно, что комбинации точек интегрирования (3, 12), (4, 12) и (6, 12) имеют высокую степень соответствия с аналитическим решением. Однако комбинация (4, 12) имеет наилучший результат («Отлично») как на 1 ГГц, так и на 2 ГГц при обоих случаев поляризации ПЭВМ. Наихудшие результаты получены на 2 ГГц при α = 0º с использованием комбинаций (1, 3) и (4, 6). Так их отклонения достигают δσ = 25,90% и 22,70% соответственно.

Для расчетной сетки с шагом λ/6 наилучшие результаты показали комбинации (3, 12), (4, 12) и (6, 12), имея Δσ до 0,06, 0,11, 0,05 и δσ до 1,89; 1,98; 1,94% соответственно, что также подтверждается доверительной гистограммы по методу FSV (см. рис. 4). Однако, для характеристики ЭПР с выраженной осцилляцией при α = 0º, комбинация (4, 12) показала наилучший результат – δσ = 0,43 и 0,18% на частотах 1 и 2 ГГц соответственно.Также стоит отметить, что комбинация (3, 12) на сетке λ/6 показала лучшие результаты, чем комбинация (4, 12) на сетке λ/4. Однако, используя сетку λ/6, комбинация (3, 12) имеет большие вычислительные затраты. Так, согласно (17), число арифметических операций при использовании комбинации (3, 12) на сетке λ/6, – 2,3e7 (1 ГГц) и 8,6e7 (2 ГГц), а комбинации (4, 12) на сетке λ/4 – 1,3e7 (1 ГГц) и 5,2e7 (2 ГГц). Наихудшие результаты получены для комбинации (4, 6) при 1 ГГц, с отклонениями, достигающими δσ = 33,19%, что говорит о нестабильности решения с использованием такой комбинации.

Рассматривая результаты, полученные на частой сетке (λ/8), видно, что только комбинация (1, 3) дает большой уровень отклонений: Δσ = 0,38–0,56 и δσ = 2,14–25,5%. Из доверительных гистограмм по методу FSV (см. рис. 5) также можно заметить, что комбинации (1, 6) и (1, 12) дают низкое согласование с аналитическим решением при горизонтальной поляризации ПЭМВ (α = 0º), имея 80 и 70% в категории «Отлично» для частот 1 и 2 ГГц соответственно. Наименьшие абсолютные отклонения получены при использовании комбинации (3, 12) – до 0,03, а относительные – (3, 12) при α = 90º и (4,12) при α = 0º. Однако использование густой сетки существенно увеличивает вычислительные затраты. Так, число арифметических операций при использовании комбинации с минимальным числом точек интегрирования, обеспечивающей приемлемую точность – (3, 6), уже больше чем при использовании комбинации (4, 12) на грубой сетке. Для комбинации (3, 6) число арифметических операций равно 1,9e7 и 7,6e7 для частот 1 и 2 ГГц соответственно, а для комбинации (4, 12) – 1,3e7 и 5,2e7.

Анализ отклонений указывает на стабильность комбинации точек интегрирования (4, 12) на всех рассмотренных частотах и расчетных сетка. Полученные результаты с использованием этой комбинации сопоставимы с результатами стороннего ПО 2. Немного худшие результаты получены при использовании комбинаций (3, 12) и (6, 12). Однако при грубой сетке (λ/4) результаты, полученные с использованием таких комбинаций, характеризуются выбросами в зависимости от частоты и поляризации, и не сопоставимы с результатами при (4, 12).

Несмотря на общее соответствие результатов при комбинации (4, 12) с аналитическим решением и сторонним ПО, остается вопрос о механизме возникновения выбросов при использовании комбинаций (4, 6), (3, 12) и (6, 12). Высокие отклонения в этих случаях могут быть вызваны не только выбором точек интегрирования, но свойствами результирующей СЛАУ. Одним из ключевых факторов, влияющих на стабильность расчетов методом моментов, является число обусловленности матрицы СЛАУ, которое определяет чувствительность решения к малым изменениям входных данных и погрешностям вычислений, возникающим из-за округлений при машинных расчетах. Поэтому для каждой частоты и расчетной сетки вычислено число обусловленности матрицы СЛАУ. Результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Число обусловленности матрицы взаимодействий

Шаг сетки	f, ГГц	$N_q = 1$, $N_p = 3$	$N_q = 1$, $N_p = 6$	$N_q = 1$, $N_p = 12$	$N_q = 3$, $N_p = 6$	$N_q = 3$, $N_p = 12$	$N_q = 4$, $N_p = 6$	$N_q = 4$, $N_p = 12$	$N_q = 6$, $N_p = 12$
λ/4	1	2225,72	2669,12	3484,35	3353,94	14892,49	4004,55	2214,66	5039,75
	2	8414,52	6460,49	5470,20	8860,07	6525,09	14216,90	5875,52	6779,63
λ/6	1	4415,86	4782,31	3785,60	5759,33	3197,89	16748,33	2799,69	3385,36
	2	8885,58	6142,68	5968,67	6771,32	6204,43	7224,33	6272,88	6297,77
λ/8	1	12150,78	3316,79	3157,51	3515,08	2996,04	3962,91	2903,68	3073,97
	2	10329,23	9079,59	8825,67	9225,74	8760,70	9595,02	9166,84	8851,70

Из табл. 3 видно, что на грубой сетке с шагом λ/4 число обусловленности матрицы СЛАУ варьируется в широком диапазоне при изменении комбинации точек интегрирования. Так, минимальное значение числа обусловленности – 2214 получено при комбинации (4, 12), тогда как максимальное – 14892 для (3, 12) при 1 ГГц и 14892 для (4, 6) при 2 ГГц. Низкое значение числа обусловленности на такой сетке не всегда коррелирует с точностью вычисления, например, комбинация (1, 3) с числом обуслов-

ленности 2225 имеет высокие отклонения Δσ до 0,74 и δσ до 16,98%. Это объясняется недостаточным числом точек интегрирования для описания поверхностного интеграла по большой площади треугольника. При этом высокое число обусловленности всегда коррелирует с высокими отклонениями. Так, комбинации (3, 12) и (6, 12), дающие высокие значения числа обусловленности СЛАУ, демонстрируют нестабильность расчетов, проявляющуюся в значительных выбросах отклонений в зависимости от частоты и поляризации. Наиболее устойчивый вариант – комбинация (4, 12), которая дает средние значения числа обусловленности и минимальные отклонения.

Для расчетной сетки с шагом дискретизации λ/6 наблюдается общий рост числа обусловленности, что связано с увеличением общей размерности матрицы СЛАУ. Наибольшее число обусловленности также демонстрирует комбинация (4, 6) – 16748, что делает ее нежелательной для вычислений. В то же время комбинации (3, 12) и (4, 12) дают средние значения числа обусловленности (3197 и 2799 соответственно) и обеспечивают низкие отклонения.

Для расчетной сетки с шагом λ/8 отмечается дальнейший рост значений числа обусловленности, но при этом отклонения ЭПР значительно снижаются. Наибольшее число обусловленности получено для комбинации (1, 3) – 12150, что также отражается и на точности расчетов. Комбинации (3, 12) и (4, 12) продолжают демонстрировать наилучший баланс между численной устойчивостью и точностью, обеспечивая минимальные значения Δσ и δσ, не превышающие 0,06 и 1,15% соответственно.

В результате комбинация (4, 12) всегда дает умеренные значения числа обусловленности и обеспечивает приемлемый уровень отклонений уже на грубой сетке с минимальными вычислительными затратами, что позволяет рекомендовать ее для использования в расчетах на различных сетках. Эти результаты подтверждаются как сторонним ПО, так и методом FSV.

Анализ рассеяния электромагнитного экрана

Используя выявленную комбинацию точек интегрирования (4, 12), рассмотрено определение резонансных частот корпуса с апертурой на основе его ЭПР. Данный подход предложен в работе [24] и основывается на том, что возбуждающиеся внутри электромагнитных экранов объемные резонансы влияют на обратно рассеиваемое поле. Это проявляется в виде флуктуации амплитуды ЭПР в области резонансных частот.

На рис. 7 представлен корпус с известной частотой резонанса – 690 МГц, рекомендованный для валидации результатов электромагнитного моделирования эффективности экранирования (ЭЭ) стандартом IEEE STD 1597.2 [25]. Глубина d и ширина a корпуса составляет 300 мм, высота b = 120 мм и толщина стенок t = 3 мм. На лицевой стенке корпуса выполнена апертура шириной w и высотой l по 100 мм. В качестве источника воздействия применялась вертикально-поляризованная ПЭМВ, падающая на лицевую стенку корпуса (со стороны апертуры).

На рис. 8 представлены частотные зависимости ЭПР и ЭЭ, вычисленные МКРВО в стороннем ПО [26], а также ЭПР в авторской версии МоМ. Расчеты проводились в диапазоне частот 100–1000 МГц.

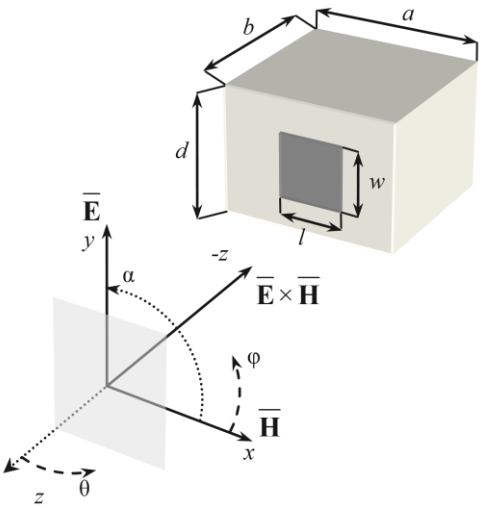


Рис. 7. Исследуемый корпус с апертурой из [27]

Из рис. 8 видно, что в области частоты резонанса корпуса (690 МГц) обе характеристики демонстрируют известный из [24] эффект: амплитуда в данной области характеризуется флуктуацией. Начиная с частоты 680 МГц, амплитуда плавно нарастает от –5 до –2 дБм². Затем, на частоте резонанса, происходит резкий скачок, в результате которого амплитуда ЭПР принимает минимальное значение, после чего возвращается к стандартному значению (–5 дБм²).

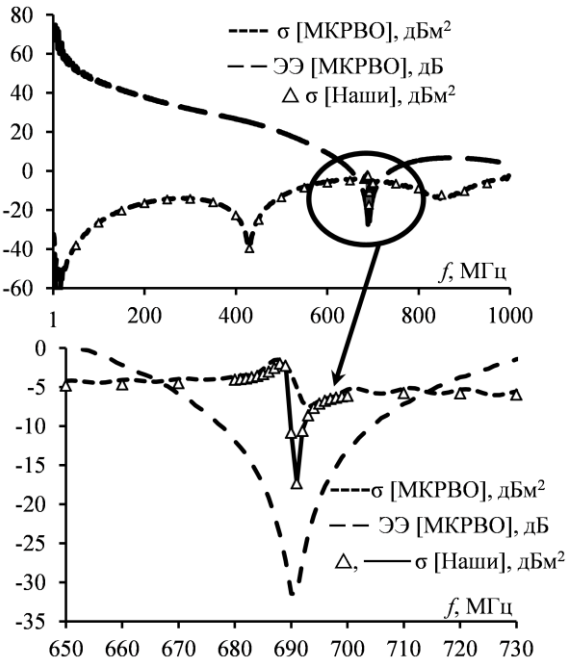


Рис. 8. Частотные зависимости ЭЭ и ЭПР корпуса с апертурой

Однако ЭПР, вычисленная МоМ с использованием комбинации точек интегрирования (4, 12), демонстрирует более ярко выраженный резонансный характер. Так, минимум наблюдается на частоте 691 МГц и равен –17 дБм^2. При этом в результатах, полученных с использованием МКРВО, минимум наблюдается на частоте 693 МГц и равен –7,5 дБм^2. Также стоит отметить, что вычисленная характеристика ЭПР совпадает с результатами, полученными МКРВО, во всем диапазоне частот.

Заключение

В данной работе рассмотрен один из способов вычисления поверхностных сингулярных интегралов, который основывается на использовании симметричных квадратур Гаусса. На примере идеально проводящей сферы проведены вычисления бистатической ЭПР с использованием различных комбинаций точек интегрирования при учащении расчетной сетки. Выполнена оценка точности результатов, в том числе методом выделения особенностей, используя сравнение с аналитическим решением и результатами стороннего ПО. Выявлена комбинация точек, дающая наиболее стабильные результаты во всех конфигурациях моделирования (поляризация ПЭМВ, частота и расчетная сетка).

Лучшая комбинация точек интегрирования (4, 12) использована для оценки ЭЭ корпуса с апертурой. Полученные в авторской реализации МоМ результаты показали хорошее согласование с результатами, полученным МКРВО в коммерческом ПО.

Другие комбинации точек интегрирования, такие как (3, 6), (3, 12), (4, 6), и (6, 12), на грубой расчетной сетке дают от 1,5 до 10 раз большие отклонения, чем комбинация (4, 12). Однако на частой расчетной сетке они дают сопоставимые с (4, 12) результаты.

В дальнейшем целесообразно провести исследование возможности применения адаптивного интегрирования для динамического изменения числа точек интегрирования в зависимости от локальных характеристик сетки и расстояния между базисными и тестовыми функциями. Такой подход повысит стабильность и точность расчетов, а также снизит общую вычислительную сложность. В связи с этим требуется дополнительное исследование для установления всех возможных причин возникновения выбросов и нестабильности при использовании различных точек интегрирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005 и Российского научного фонда по проекту № 23-79-10165, https://rscf.ru/project/23-79-10165/.

Литература

1. Ruck G.T. Radar cross section handbook / G.T. Ruck, D.J. Garber. – New York: Plenum Press, 2001. – 504 p.

2. A review of radar detection fundamentals / P.S. Diao, T. Alves, B. Poussot, S. Azarian // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2024. – Vol. 39. – P. 4–24.

3. Бердышев В.П. Радиолокационные системы: учеб. / В.П. Бердышев, Е.Н. Гарин, А.Н. Фомин. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 400 с.

4. Balanis C.A. Advanced engineering electromagnetics. – 3-nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2023. – 1136 p.

5. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2013. – 430 с.

6. Gibson W.C. The method of moments in electromagnetics. – New York: Chapman & Hall/CRC, 2021. – 510 p.

7. Makarov S.N. Antenna and EM modeling with MatLab. – New York: John Wiley & Sons Publ., 2002. – 288 p.

8. Harrington R.F. Matrix methods for field problems // Proceedings of the IEEE. – 1967. – Vol. 55, No. 2. – P. 136–149.

9. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 1966. – Vol. AP-14. – P. 302–307.

10. Characterization and integration of the singular test integrals in the method of moments implementation of the electric field integral equation / B.A Freno, W.A. Johnson, B.F Zinser, D.R. Wilton, F. Vipiana, S. Campione // Engineering analysis with boundary elements. – 2021. – Vol. 124. – P. 185–193.

11. Клюкин Д.В. О способах вычисления поверхностных сингулярных интегралов при решении антенных задач методом моментов / Д.В. Клюкин, Д.М. Мочалов, С.П. Куксенко // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 23–34.

12. Ji J., Huang P., Series expansion feasibility of singular integral in method of moments // Journal of systems engineering and electronics. – 2014. – Vol. 25, No. 3. – P. 386–392.

13. Rao S. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape / S. Rao, D. Wilton, A. Glisson // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1982. – Vol. 30, No. 3. – P. 409–418.

14. Mosig J.R. Integral equation technique / J.R. Mosig, T. Itoh // Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures. – 1989. – P. 133–213.

15. Dunavant D.A. High degree efficient symmetrical Gaussian quadrature rules for the triangle // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1985. – Vol. 21. – No.6, – P. 1129–1148.

16. Bourlier C. Scattering from quasi-planar and moderate rough surfaces: Efficient method to fill the EFIE-Galerkin MoM impedance matrix and to solve the linear system // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 69. No. 9, – P. 5761–5770.

17. Bourlier C. Characteristic Basic Function Method Accelerated by a New Physical Optics Approximation for the Scattering from a Dielectric Object // Progress In Electromagnetics Research B. – 2023. – Vol. 103. – P. 177–194.

18. Multibranch Rao–Wilton–Glisson basis functions for electromagnetic scattering problems / S. Huang, G. Xiao, Y. Hu, R. Liu, J. Mao // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2021. – Vol. 69, No. 10. – P. 6624–6634.

19. Bourlier C. Acceleration of the primary basic functions calculation from the EFIE-characteristic basis function method (CBFM) combined with a new physical optics approximation // Progress in electromagnetics research B. – 2023. – vol. 99. – P. 179–195.

20. GMSH: Официальный сайт Gmsh – A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gmsh.info/, свободный (дата обращения: 08.10.2024).

21. LUCERNHAMMER: официальный сайт lucernhammer – Electromagnetic signature / radar cross section [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lucernhammer.tripointindustries.com/benchmark_data/spheres, свободный (дата обращения: 09.10.2024).

22. IEEE STD 1597.1–2008. IEEE standard for validation of computational electromagnetics computer modeling and simulations. – New York: IEEE Inc, 2009. – 41 p.

23. Использование метода валидации выделением особенностей для сопоставления наборов экспериментальных данных или смоделированных данных / Н.Ю. Шайманов, В.П. Авраамов, А.А. Иванов, С.П. Куксенко // Программные продукты и системы (Тверь). – 2024. – № 3. – С. 310–317.

24. Зайков А.О. Анализ резонансных частот экранирующих корпусов на основе моностатической эффективной площади рассеяния // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2024»: сб. избр. статей научной сессии ТУСУР, Томск. – 2024. – Ч. 2. – С. 74–77.

25. IEEE STD 1597.2–2010. IEEE recommended practice for validation of computational electromagnetics, computer modeling and simulations. – New York: IEEE Inc, 2011. – 124 p.

Клюкин Дмитрий Владимирович
Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-0343-482X
Тел.: + 7 (382-2) 70-15-15, доб. 25-67
Эл. почта: dmitrii.v.kliukin@tusur.ru

Зайков Артем Олегович
Инж. науч.-исслед. лаб. безопасности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств
(НИЛ «БЭМС РЭС») ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0009-0000-2406-7021
Тел.: + 7 (382-2) 70-15-15, доб. 25-67
Эл. почта: artem.o.zaikov@tusur.ru

Мочалов Дмитрий Михайлович
Инж. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0009-0008-8822-0353
Тел.: + 7 (382-2) 70-15-15, доб. 25-67
Эл. почта: dmitrii.m.mochalov@tusur.ru

Иванов Антон Андреевич
Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»,
доцент каф. ТУ, ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-1867-0689
Тел.: + 7 (382-2) 70-15-15, доб. 25-42
Эл. почта: anton.ivvv@gmail.com

Куксенко Сергей Петрович
Д-р техн. наук, доцент, зав. НИЛ «БЭМС РЭС»,
проф. каф. ТУ, ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9713-458X
Тел.: + 7 (382-2) 70-15-15, доб. 25-67
Эл. почта: sergei.p.kuksenko@tusur.ru

Klyukin D.V., Zajkov A.O., Mochalov D.M.,
Ivanov A.A., Kuksenko S.P.

Using Gauss Quadratures to Compute Surface Singular Integrals in the Method of Moments for Scattering Problems

The accuracy of calculating radar cross section by the method of moments, using Gauss quadratures to eliminate singularity in the formation of the system of linear algebraic equations, has been evaluated. Calculations of the bistatic radar cross section of a perfectly conducting sphere at various combinations of integration points have been performed. Using published data, the absolute and relative deviations of the obtained results have been evaluated. Using feature selective validation method, all data sets are evaluated to confirm the results of the analysis of deviations. Evaluated the number of conditioning of the matrix of the system of linear algebraic equations. The most versatile combination of integration points for computing singular integrals is identified, that provides the best balance between solution accuracy and computational cost. The calculation of the scattering of the slit case using this combination of points is performed. The results show a good agreement with data obtained in commercial software based on the finite difference time domain method.

Keywords: numerical methods, method of moments, quadrature formulas, radar cross section, feature selective validation.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-13-22

References

1. Ruck G.T., Garber D.J. *Radar Cross Section Handbook*. New York, Plenum Press, 2001, 504 p.

2. Diao P.S., Alves T., Poussot B., Azarian S. A review of radar detection fundamentals. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2024, vol. 39, pp. 4–24.

3. Berdishev V.P, Garin E.N., Fomin A.N. *Radiolokacionnie Systemi: Uchebnik* [Radar Systems: Textbook]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2011, 400 p. (in Russ).

4. Balanis C.A. *Advanced Engineering Electromagnetics*. 3-rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2023, 1136 p.

5. Grigoryev A.D. *Metody Vychislitelnoy Electrodinamyki* [Methods of Computational Electrodynamics]. Moscow, Physical Education Publ., 2013, 430 p. (in Russ).

6. Gibson W.C. *The Method of Moments in Electromagnetics*, Boca Raton, Chapman & Hall/CRC, 2021, 510 p.

7. Makarov S.N. *Antenna and EM Modeling with MATLAB*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2002, 288 p.

8. Harrington R.F. Matrix methods for field problems. *Proceedings of the IEEE*, 1967, vol. 55, no. 2, p. 136–149.

9. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1966, vol. AP-14, pp. 302–307.

10. Freno B.A., Johnson W.A., Zinser B.F, Wilton D.R., Vipiana F., Campione S. Characterization and integration of the singular test integrals in the method□of□moments implementation of the electric□field integral equation. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2021, vol. 124, pp. 185–193.

11. Klyukin D.V., Mochalov D.M., Kuksenko S.P. [On methods of computing surface singular integrals for formulating the matrix-vector equation of the method of moments at solution of antenna problems]. *Proceedings of TUSUR University,* 2024, vol. 27, no 1, pp. 23–34 (in Russ).

12. Ji J., Huang P., Series expansion feasibility of singular integral in method of moments. *Journal of Systems Engineering and electronics*, 2014, vol. 25, no. 3, pp. 386–392.

13. Rao S., Wilton D, Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* 1982, vol. 30, no. 3, pp. 409–418.

14. Mosig J.R., Itoh T. Integral equation technique. *Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-wave passive Structures*, 1989, pp. 133–213.

15. Dunavant D.A. High degree efficient symmetrical Gaussian quadrature rules for the triangle. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1985, vol. 21, no. 6, pp. 1129–1148.

16. Bourlier C. Scattering from quasi-planar and moderate rough surfaces: Efficient method to fill the EFIE-Galerkin MoM impedance matrix and to solve the linear system. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021. vol. 69, no. 9, pp. 5761–5770.

17. Bourlier C. Characteristic Basic Function Method Accelerated by a New Physical Optics Approximation for the Scattering from a Dielectric Object. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2023. vol. 103, pp. 177–194.

18. Huang S., Xiao G., Hu Y., Liu R, Mao J. Multibranch Rao–Wilton–Glisson basis functions for electromagnetic scattering problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* 2021, vol. 69, no. 10, pp. 6624–6634.

19. Bourlier C. Acceleration of the primary basic functions calculation from the EFIE-characteristic basis function method (CBFM) combined with a new physical optics approximation. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2023, vol. 99, pp. 179–195.

20. GMSH [web]: Official website: Gmsh – A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. Available at: https://gmsh.info, free (accessed: October 08, 2024).

21. LUCERNHAMMER [web]: Official website: lucernhammer – Electromagnetic signature / radar cross section URL: https://lucernhammer.tripointindustries.com/-benchmark_.data/spheres, free (accessed: October 09, 2024).

22. IEEE STD 1597.1 – 2008. *IEEE Standard for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations*. New York, IEEE Inc, 2009, 41 p.

23. Shaymanov N.Yu, Avraamov V.P, Ivanov A.A, Kuksenko S.P. Applying the feature selective validation method to compare experimental or simulated datasets. *Software & Systems*, 2024. vol 3. pp. 310–317 (in Russ.).

24. Zajkov A.O. Analysis of resonant frequencies of shielding enclosures based on monostatic radar cross section. *International scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists «TUSUR Scientific session 2024»: Proceedings*, 2024, 2024. vol 2, pp. 74–77 (in Russ.).

25. IEEE STD 1597.2–2010. *IEEE Recommended Practice for Validation of Computational Electromagnetics, Computer Modeling and Simulation*s. New York, IEEE Inc, 2011, 124 p.

Dmitry V. Klyukin
Postgraduate student, Department of Television and Control,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050.
ORCID: 0000-0002-0343-482X
Phone: + 7 (382-2) 70-15-15, ext. 25-67
Email: dmitrii.v.kliukin@tusur.ru

Artem O. Zajkov
Engineer, Research Laboratory «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities», TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0009-0000-2406-7021
Phone: + 7 (382-2) 70-15-15, ext. 25-67
Email: artem.o.zaikov@tusur.ru

Dmitry M. Mochalov
Engineer, Research Laboratory «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities», TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0009-0008-8822-0353
Phone: + 7 (382-2) 70-15-15, ext. 25-67
Email: dmitrii.m.mochalov@tusur.ru

Anton A. Ivanov
Candidate of Sciences in Engineering, Senior Researcher, Research Laboratory «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities», TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-1867-0689
Phone: + 7 (382-2) 70-15-15, доб. 25-42
Email: anton.ivvv@gmail.com

Sergey P. Kuksenko
Doctor of Science in Engineering, Assistant Professor,
Head of Research Laboratory «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities», TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-9713-458X
Phone: + 7 (382-2) 70-15-15, ext. 25-67
Email: sergei.p.kuksenko@tusur.ru

УДК 621.38

В.Е. Михайленко, А.М. Заболоцкий

Обзор GaN-технологий при изготовлении монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона

Современная СВЧ-техника выдвигает серьезные требования к электронной компонентной базе. В изготовлении монолитных интегральных схем (МИС) используют большое количество разновидностей проводников, которые, в свою очередь, обладают своими граничными параметрами и размерами. В связи с этими ограничениями возникает задача выбора технологии (материала), которая обеспечит выполнение технических задач при разработке МИС СВЧ. На данный момент ведущими в отрасли СВЧ-техники при изготовлении МИС СВЧ являются технологии, которые используют полупроводники из арсенида галия (GaAs) и нитрида галия (GaN). В работе проведен обзор и сравнительный анализ изготовления МИС СВЧ отечественными и зарубежными производителями на примере дискретных транзисторов, выполненных по GaN-технологии. Представлены таблицы с характеристиками технологических процессов в области разработки дискретных транзисторов на базе разных компаний. Данный материал может быть использован при проектировании МИС СВЧ и помочь в обеспечении выполнения ТЗ.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, малошумящий усилитель, технология, топология, транзистор, мощность СВЧ.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-23-30

В последние годы наблюдается интенсивное развитие в области СВЧ-техники, особенно в сфере МИС СВЧ. Растущие требования к качеству приема и передачи сигналов, чувствительности и разрешающей способности радаров, а также точности и надежности радиоизмерительного оборудования требуют создания компактных, экономичных и широкополосных элементов управления СВЧ-мощностью на основе МИС СВЧ. Это направление является важным для обеспечения эффективной работы современной радиотехники в СВЧ-диапазоне [1].

МИС СВЧ представляют собой высокоинтегрированные устройства, которые объединяют множество функций на одной подложке. Они могут включать в себя сотни или даже тысячи компонентов, таких как транзисторы, конденсаторы, резисторы, диоды и многое другое. И это большое количество элементов будет размещены на одной подложке, размеры которой очень малы. Кроме того, на сегодняшний день существуют МИС СВЧ, которые объединяют многие функции в единую микросхему, такие как фильтры, усилители, смесители, переключатели, умножители, фазовращатели и т.д. [2].

Целью работы является обзор развития и реализации изготовления МИС СВЧ отечественными и зарубежными производителями на примере дискретных транзисторов, выполненных по GaN-технологии.

Развитие технологии и реализации изготовления МИС СВЧ

В настоящее время очень продуктивно используется технология изготовления МИС на основе GaAs. По данной технологии изготавливается огромное количество видов МИС, а в последующем они помещаются в отдельные блоки или же приборы, что упрощает и уменьшает габаритные размеры изделия. В настоящее время человечество дошло до предела технологических возможностей использования GaAs, вследствие чего возникают ограничения в характеристиках готовых изделий. По этой причине возникла потребность в освоении выходных параметров при использовании материала GaN. Одной из основных преимуществ технологии на основе GaN является возможность создания более мощных и эффективных устройств по сравнению с GaAs. GaN обладает высокой электронной подвижностью и высоким напряжением пробоя, что позволяет создавать устройства с большей мощностью и эффективностью.

В данной статье будут описаны возможности использования GaN-технологий. Будут представлены сравнения изготовления двух технологий. Одним из успешных примеров использования технологии на основе GaN является разработанный малошумящий усилитель (МШУ) с использованием GaN-транзис-торов. Такой усилитель обладает высокой мощностью, высокой эффективностью и низким уровнем шума, что делает его привлекательным для применения в радиосвязи, радарах, медицинских приборах и других приложениях, где требуется высокая точность и чувствительность.

Все компоненты интегральной схемы (ИС) «выращиваются» на специальной основе – подложке. Подложки изготавливаются из различных материалов, наиболее распространенные среди них – кремний (Si), арсенид галлия (GaAs), германий (Ge), сапфир (Al2O3), карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN) и многие другие. От свойств выбранного материала зависят производительность, надежность и стоимость ИС [3, 4].

Перспективами разработки последующего поколения СВЧ-техники являются прогресс в развитии СВЧ-транзисторов и освоение более новых и сложных реализаций МИС СВЧ на основе GaN и SiC-технологий [5].

Основными преимуществами данных материалов являются:

– более высокая проводимость канала (плотность электронов до 1×10^4 см$^{-2}$, чем у конкурента (GaAs));

– большая пробивная напряжённость поля относительно GaAs;

– большая теплопроводимость по поверхности микросхемы, что позволяет приборам работать на высоких мощностях и температурах. Также большая теплопроводность позволяет увеличить время работы устройства и снизить требования к системе охлаждения [6];

– меньшая чувствительность к температуре, вследствие чего сигнал при большой температуре не подвергается искажениям (помехам).

При изготовлении материала GaAs широко используются технологии компланарных и микрополосковых структур, что способствует оптимизации электрических свойств. С другой стороны, пластины из GaN строятся исключительно с применением компланарной технологии, что подчеркивает ее важность в производственном процессе [7].

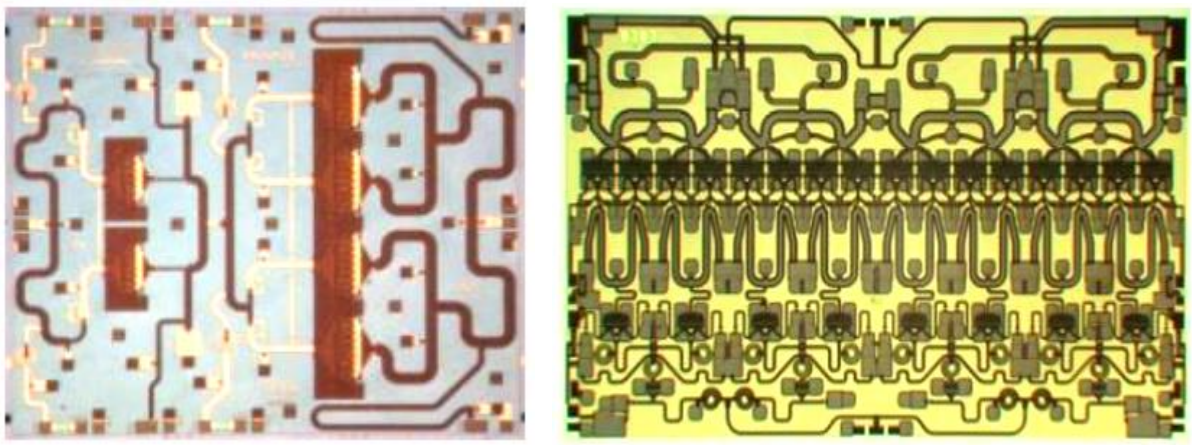
Одной из особенностей GaAs является его высокая «податливость» к утончению и травлению, что обеспечивает большую гибкость в формировании желаемых структур. С другой стороны, в случае структур нитрида галия применяются прочные подложки, такие как сапфир и карбид кремния. Этот подход способствует созданию более стойких и долговечных структур, необходимых для эффективных электронных устройств [8].

Поэтому, несмотря на прогресс в изготовлении GaN, остаются проблемы, связанные с производством, которые играют ключевую роль в развитии микросхем на основе этого материала. Решение этих проблем может существенно повлиять на эффективность и надежность GaN-устройств, открывая новые перспективы в области полупроводниковой технологии.

В диапазоне сантиметровой волны мощность выходного сигнала МИС достигла своего предела приблизительно до 10–20 Вт. Этот предел связан с ограничением максимальной рабочей площади кристалла, которая составляет 25–30 мм^2. Если толщина кристалла составляет 50–100 мкм, он становится предельно хрупким. Кристаллы МИС миллиметрового диапазона имеют площадь от 12 до 16 мм^2, что позволяет увеличить выходную мощность до 5–10 Вт.

Дальнейшее увеличение мощности связано с развитием и последующей реализацией новых материалов с широкой запрещенной зоной, таких как GaN, которые обеспечивают значительно большие плотности мощности и более компактные размеры кристаллов МИС. Эти инновации открывают путь к дополнительному повышению эффективности и производительности полупроводниковых устройств в миллиметровом диапазоне.

Для наглядного примера на рис. 1 представлены два усилителя мощности (УМ) X-диапазона, выполненные по GaN- и GaAs-технологиям [9]. Для конструктивного сравнения взяли GaAs-усилитель (P_{out} = 20 Вт, S = 41 мм^2) мощности и GaN-усилитель (P_{out} = 40 Вт, S = 18 мм^2) мощности [10]. Из данных видно, что GaN-усилитель обладает большей выходной мощностью при меньших геометрических размерах. Из рисунка видно, что конструкция GaN усилителя существенно проще и имеет в 2–3 раза меньшие размеры, что дает хорошие шансы на увеличение выходной мощности GaN МИС в X-диапазоне еще в 2–4 раза.



а *б*

Рис. 1. Микрофотографии МИС усилителя мощности, выполненные по GaN- (*а*) и GaAs-технологиям (*б*)

На II семинаре-совещании специалистов радиоэлектронной промышленности на тему «Актуальные вопросы разработки и применения СВЧ-компонентов и приборов на основе технологии нитрида галлия (GaN–2022)» выступил Начальник отделения АО «НПП «Пульсар» А.В. Редька, который представил результаты изготовления, испытаний и опытной эксплуатации СВЧ-усилителя X-диапазона с выходной мощностью 360 Вт и воздушным охлаждением на GaN-HEMT. Характеристики усилителя: длительность импульса от 0,5 до 1100 мкс, минимальная скважность Q = 5, подавление выходного сигнала в паузе между импульсами не менее 130 дБ. Докладчик отметил, что преимущества новой промышленной технологии GaN-СВЧ-приборов особенно ярко проявляются при обеспечении выполнения специ-

альных требований, предъявляемых при использовании СВЧ-приборов в различных типах современных РЭС [11].

В мире есть большое количество технологий для изготовления МИС, помимо двух тех, что были рассмотрены ранее. На рис. 2 представлен сравнительный анализ частотно-мощностных параметров существующих на данный момент технологий изготовления СВЧ МИС и возможность применения в приборах. Как можно видеть из рис. 2, каждая технология обладает своими границами по мощности и по частоте, вследствие чего при разработке необходимо выбрать подходящий под ТЗ материал, из которого в последующем будет изготовлено устройство.



Рис. 2. График зависимости мощности от частоты для различных технологий изготовления СВЧ МИС и применяемость в приборах

На данный момент уже имеются публикации, когда значения, которые представлены на рис. 2, становятся границами (барьерами), которые пройти нет возможности за счет использования материала при изготовлении МИС [12]

Успехи развития МИС СВЧ зарубежом

При поиске зарубежных компаний, которые занимаются GaN-технологией СВЧ МИС, оказалось, что их не так много [13]. Несколько компаний в США и Японии, одна в Канаде, две-три в Европе, крупная тайваньская компания WIN Semiconductors и две китайские компании – Chengdu HiWafer Semiconductor Co. и Xiamen San'an Integrated Circuit Co. В табл. 1 представлены технологические процессы некоторых зарубежных компаний и их характеристики, такие как: l – длина затвора транзистора, V – напряжение питания, V_b – напряжение пробоя, W – удельная плотность мощности, f_{max} – максимальная частота генерации, f_t – предельная частота по усилению, FP (field plate) – полевой электрод, D – диаметр пластины.

За последнюю пару лет наблюдается заметное увеличение числа патентов из Китая, получаемых новыми компаниями. В 2020–2024 гг. китайские компании уже представляли более 40% от общего числа подающих на патенты (при этом у компаний США – 23%, Японии – 10%, Европы – 3%) [14]. Далее рассмотрим основные задачи, достижения и перспективы некоторых из зарубежных предприятий.

Таблица 1

Характеристики технологических процессов зарубежных компаний

Тип процесса	l, мкм	V, В	V_b, В	W, Вт/мм	f_{max}, ГГц	КПД, %	FP	D, мм	Тип подложки
BAE Systems (США)									
0,2 μm FP	0,2	40	≥100	6	40 (f_t)	60 (10 ГГц)	Есть	100	SiC
0,18 μm NFP	0,18	30	140	3	57 (f_t)	45 (30 ГГц)	Нет	100	SiC
Fraunhofer IAF (Германия)									
GaN50	0,5	50	150	6	6	65 (3 ГГц)	Есть	100	SiC
CaN25	0,25	28	100	5	20	55 (10 ГГц)	Есть	100	SiC
CaN10	0,1	15	30	2	94	40 (30 ГГц)	Нет	100	SiC
National Research Council (Канада)									
CaN500	0,5	40	180	5	13 (f_t)		Есть	75	SiC
CaN150	0,15	30	120	7	35 (f_t)	33 (18 ГГц)	Опция	75	SiC
E-GaN (разработка)	0,15	30	180		20 (f_t)		Опция	75	SiC
United Monolithic Semiconductors (Франция)									
GH50	0,5	50	≥ 200	≥ 5	7	≥65 (2 ГГц)	Есть	100	SiC
GH25	0,25	30	≥ 100	≥ 4	20	50 (10 ГГц)	Есть	100	SiC
WIN Semiconductors (Тайвань)									
NP45	0,45	50	≥ 160	≥ 6,5	12 (f_t)	≥60 (2,7 ГГц)	Есть	100	SiC
NP25	0,25	28	120	4,2	25 (f_t)	50(6 ГГц)	Есть	100	SiC

Компания WIN Semiconductors [15]. Помимо того, что компания WIN является крупнейшим производителем GaAs-приборов, она располагает также двумя GaN-процессами. Коммерческий GaN-рынок компании связан с разработкой мощных усилителей для инфраструктуры беспроводной связи. Для военного сегмента разрабатываются мощные и малошумящие усилители, используемые в РЛС. Оба действующих GaN HEMT-процесса выполняются на SiC-подложках диаметром 100 мм. В технологическом процессе NP25 создаются транзисторы с напряжением 28 В и затвором 0,25 мкм, соединенным полевым электродом с истоком. Приборы, получаемые в этом процессе, имеют линейное усиление 16 дБ и плотность мощности 6,5 Вт/мм при КПД 60%.

На данный момент компания расширила свой ассортимент технологий, выпустив бета-версию вы-

сокопрочного GaN на основе SiC. Основой этой платформы является технология GaN-HEMT с радиочастотным затвором толщиной 0,12 мкм, включающая множество усовершенствований для повышения прочности на постоянном токе и ВЧ-диапазоне и повышения влагостойкости матрицы на высоком уровне. Позволяет заказчикам разрабатывать компактные импульсные усилители мощности или усилители мощности с постоянным напряжением для приложений с частотой до 50 ГГц. Этот процесс рассчитан на работу при напряжении 28 В и в диапазоне 29 ГГц обеспечивает выходную мощность насыщения 4,5 Вт/мм с линейным усилением 12 дБ и более чем 40%-ной эффективностью при увеличении мощности.

Компания BAE Systems [16]. Компания работает с GaN-технологией МИС с 2000 г. и ориентирована в основном на поставку продукции для военного применения. В 2024 г. BAE Systems продемонстрировала возможность производства мощных МИС-усилителей на пластинах 150 мм с помощью своего процесса с затвором 0,2 мкм, сегодня является промышленным стандартом и обеспечивает параметры, широко востребованные рынком. Данный процесс отличается хорошими параметрами при умеренной стоимости, позволяет получать приборы с высокими мощностью, усилением и КПД в диапазонах частот до 50 ГГц.

Использование пластин толщиной 0,025 мм дает возможность установить небольшое смещение под стоком каждого транзистора для снижения индуктивности заземления. В комбинации с уменьшенной выходной емкостью приборов это гарантирует широкополосность усилителей при хороших усилении и КПД. Высокое пробивное напряжение (140 В) транзисторов обеспечивает устойчивость как усилителей мощности при мгновенных колебаниях напряжения, так и малошумящих усилителей при резких изменениях мощности на входе.

Компания Fraunhofer IAF [17]. Выпускаемые компанией приборы используются в научных исследованиях, базовых станциях, системах РЭБ, радиолиниях связи точка-точка и радарах.

Компания предлагает три технологических процесса производства приборов, перекрывающих диапазоны от 0 до 100 ГГц:

• до 6 ГГц на транзисторах с длиной затвора 0,5 мкм и напряжением 50 В;

• до 20 ГГц на транзисторах с 0,25 мкм затвором с напряжением 20 В;

• до 94 ГГц с затвором 0,1 мкм и напряжением 15 В.

Процесс с затвором 0,5 мкм обеспечивает КПД приборов 65% и плотность мощности 6 Вт/мм. Процессы на 0,5 и 0,25 мкм проводятся на пластинах толщиной 0,1 мкм с отверстиями для питания 50 мкм, а процесс с затвором 0,1 мкм – на пластинах толщиной 0,075 мкм и отверстиями питания 30 мкм.

Компания Semiconductor Manufacturing International Corporation [18]. Является пятой в мире по объёмам выручки среди компаний мира. Ежегодный доход составляет 5,44 млрд долл. по данным в 2021 г. Компания заявила об увеличении объёмов продукции в два раза до 2025 г. [19].

Основным «микроэлектронным» событием Китая на 2023 год является новая разработка четырехкаскадного МШУ с использованием GaN-технологии. Данная технология позволяет уменьшить длину затвора транзистора до 0,1 мкм, что способствует укреплению своих позиций на мировом рынке (рис. 3). Показатели нового МШУ являются лучшими среди аналогов на мировом рынке. Так, в диапазоне частот 18–31 ГГц его средний коэффициент шума составил 1,43 дБ, а самый минимальный коэффициент шума (NF) составил 1,27 дБ на частоте 23,2 ГГц. Размеры данного образца составляют 2,3×1,0 мм^2 и работают при напряжении 3,5 В с источником питания постоянного тока 280 мА [20].

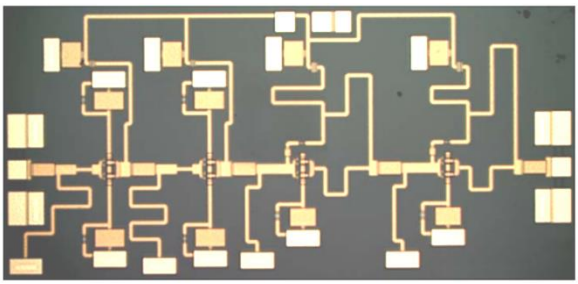


Рис. 3. Микрофотография топологии четырехкаскадного МШУ, изготовленного по GaN-технологии

Успехи развития МИС СВЧ в России

В Российской Федерации исследования и разработки эпитаксиальных структур GaN и транзисторов на их основе проводят ряд предприятий и научно-исследовательских институтов. Среди них можно выделить: АО «Светлана-Рост», АО «ОКБ-Планета», АО «Светлана-Электронприбор», АО «НИИЭТ», ИСВЧПЭ РАН, АО «НИИПП», ЗАО «Элма-Малахит», ИФП РАН, АО НПФ «Микран» и АО «НПП «Пульсар».

На состоявшемся в Москве 10–11 ноября 2022 г. II семинаре-совещании специалистов радиоэлектронной промышленности на тему «Актуальные вопросы разработки и применения СВЧ-компонентов и приборов на основе технологии нитрида галлия (GaN–2022)» были обсуждены 36 докладов специалистов, представлявших 30 российских и белорусских предприятий и организаций. Всего в мероприятии принял участие 181 специалист из 82 предприятий и организаций. Далее выделим основные результаты разработки GaN-технологии [21].

С.Д. Федотов, ведущий научный сотрудник АО «Эпиэл», представил совместный доклад с АО «Эпиэл», НТЦ Микроэлектроники РАН и АО «НПП «Салют» (Нижний Новгород), в котором ознакомил участников с результатами разработки технологии выращивания гетероструктур Ga(Al)N/Si диаметром 100–150 мм на МОГФЭ-установке Dragon-125, разработанной в НТЦ Микроэлектроники РАН совместно с ООО «Софт-Импакт». На разработанных структурах в АО «НПП «Салют» были

получены тестовые GaN-HEMT-СВЧ-транзисторы с максимальным током стока насыщения 1200 мА/мм, крутизной транзисторов не менее 300 мСм/мм, напряжением обратного пробоя более 50 В и граничной частотой около 80 ГГц.

М.Л. Занавескин, начальник отдела ККНБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт», рассказал, что в 2022 г. на предприятии начались подготовительные работы по организации мелкосерийного foundry производства монолитных ИС по технологии GaN/Si на пластинах диаметром 100 мм с проектными нормами 0,15 и 0,1 мкм. Основными особенностями технологии являются использование структур GaN-on-Si с барьерным слоем AlN и in-situ-пассивацией SiN на подложках диаметром 100 мм, а также применение технологии эпитаксиальных доращиваемых контактов с низким сопротивлением контакта к двумерному электронному газу.

Технологические маршруты изготовления МИС были разработаны в отделе ККНБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт». При участии ООО «50ом Технолоджиз» были созданы тестовые структуры для измерения характеристик элементов СВЧ МИС и параметрические модули. Транзисторы с периферией затвора 2×60 мкм, созданные по разработанной технологии, обладают выходной мощностью свыше 2,5 Вт/мм на частоте 30 ГГц.

Старший научный сотрудник А.Б. Пашковский из АО «НПП «Исток им. А.И. Шокина» представил конструкцию GaN-полевого транзистора на кремниевой подложке с эффективным теплоотводом из области тепловыделения по слоям полиалмаза, сформированным на стенках заземляющих отверстий. По оценкам (3D-расчетам), в результате введения такого теплоотвода при одинаковом среднем расстоянии между секциями затворов максимальная температура в канале GaN-транзистора на Si-подложке существенно уменьшается и становится сравнимой с максимальной температурой в канале GaN-транзистора на SiC-подложке.

В.А. Беляков, ведущий научный сотрудник АО «НПП «Салют» (Нижний Новгород), представил результаты изготовления HEMT-транзистора с длиной затвора $W_з$ = 130 нм на основе гетероструктур AlGaN/GaN на подложке SiC, продемонстрировавшего следующие параметры: максимальная удельная крутизна S = 350 мСм/мм, пробивное напряжение $U_{си.проб}$ > 60 В, предельная частота усиления по току f_t = ≥70 ГГц, выходная мощность $P_{вых.уд}$ ≥ 2,5 Вт/мм на частоте $f_{изм}$ = 33 ГГц.

Начальник лаборатории АО «НПП «Пульсар» Б.В. Емельянов представил результаты совместной с АО «Светлана-Рост» работы по созданию серийного производства предсогласованных транзисторов диапазона 2,7–3,1 ГГц (рис. 4). За основу были взяты кристаллы мощных GaN-транзисторов с $W_з$ = 0,5 мкм, изготовленные в АО «Светлана-Рост» в ходе полного производственного цикла – от роста эпитаксиальной гетероструктуры до разделения пластины на отдельные кристаллы. Транзистор обеспечивает $P_{вых}$ = 75 Вт при U_{cb} = 50 В и КПД ≥ 59%.



Рис. 4. Микрофотография 75-Вт GaN-транзистора S-диапазона

Доклад Л.Э. Великовского, главного специалиста АО «НПФ «Микран» (г. Томск), был посвящен разработанной на предприятии технологии мощных СВЧ МИС на основе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN на подложках SiC, на базе которой были изготовлены образцы дискретных GaN-транзисторов. На образцах, созданных по технологии 0,25 мкм AlGaN/GaN-HEMT, была получена удельная мощность более 5 Вт / мм и КПД 45% на частоте 10 ГГц при напряжении стока 30 В. Ведутся разработки технологий составных частей электронной библиотеки элементов с длиной затвора 0,1 и 0,15 мкм на основе вышеперечисленных гетероструктур.

Была обсуждена совместная разработка компаниями АО «НИИЭТ» и АО «Светлана-Рост» серии из двух полностью отечественных мощных СВЧ-GaN-транзисторов [22].

Транзисторы предназначены для работы в S-диапазоне частот и характеризуются выходной мощностью в 14 и 90 Вт при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ при напряжении питания 40 В в диапазоне частот 2,9–3,2 ГГц и изготавливаются в металлокерамических корпусах (рис. 5).

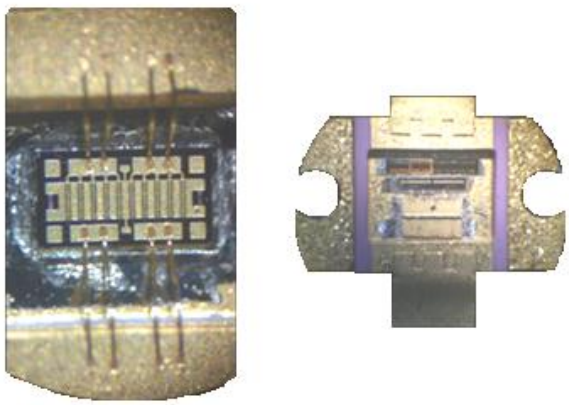


Рис. 5. Микрофотографии транзисторов, изготовленных по GaN-технологи

Разработанные приборы выполнены на основе новейших транзисторных кристаллов производства АО «Светлана-Рост», которые изготавливаются по инновационной HEMT-технологии нитрида галлия на карбиде кремния и соответствуют современному

мировому уровню. Ключевой особенностью разработанных транзисторов является то, что цикл их производства начинается от выращивания SiC-подложки с эпитаксиальными слоями до герметизации корпуса. Данные процессы проходят на территории Российской Федерации. Этот аспект означает полную независимость от комплектующих иностранного производства и позволяет потребителю быть уверенным в сроках и возможности поставки.

Разработка данных приборов позволяет не только заменить транзисторы многих зарубежных производителей, но и в перспективе создать широкую номенклатуру отечественных СВЧ-GaN-транзисторов, способную удовлетворить все потребности российской промышленности в приборах данного типа.

Анализируя компании, занимающиеся разработкой GaN-транзисторов, выделим две основные. В табл. 2 представлены технологические решения изготовления СВЧ-транзисторов российских компаний и их характеристики, такие как f – диапазон рабочих частот, $P_{вых}$ – выходная мощность, V – напряжение питания, $K_у$ – усиление в линейном режиме, E – длина затвора.

Таблица 2

Характеристики технологических решений изготовления СВЧ-транзисторов российских компаний

Тип процесса	f, ГГц	P_{3dB}, Вт	V, В	$K_у$, дБ	КПД, %	E, мкм	Тип подложки
АО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург) [23]							
SVC901 (GaN)	0–6	5–9	28–45	15	65 (3 ГГц)	0,5	SiC
SVC902 (GaN)	0–6	14–22	28–45	15	68 (3 ГГц)	0,5	SiC
SVC903 (GaN)	0–6	25–37	28–45	15	61 (3 ГГц)	0,5	SiC
«НИИЭТ» (г. Москва) [24]							
ПП9137А (GaN)	0–4	10	28–50	12	50 (4 ГГц)	0,25	SiC
ПП9138А (GaN)	0–4	15	28–50	11	50 (4 ГГц)	0,25	SiC
6П9143А3 (GaN)	7,7–8,7	30	28–50	12	35 (8,7 ГГц	0,25	SiC

В заключение хотелось бы отметить, что развитие данной технологии начинает набирать быстрые темпы развития в России. И для ускоренного развития потребуется не только финансовая помощь страны, но и обеспечения государством возможности отечественной промышленности в изготовлении по GaN-технологии. Также хотелось бы отметить, что в данной статье приведено сравнение GaAs-технологии и GaN-технологии, вследствие чего видны перспективы и безграничные возможности в изучении и познании данных технологий. Что касается применения GaN-технологии в разных странах, то оно кардинально отличаются друг от друга.

Литература

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 488 с.

2. Дзехцер Г.Б. P-I-N-диоды в широкополосных устройствах СВЧ / Г.Б. Дзехцер, О.С. Орлов. – М.: Советское радио, 1970. – 200 с.

3. Матвеенко О.С. Монолитные интегральные схемы на основе нитрида галлия для радиолокации ближнего действия и средств связи в диапазоне частот 22–25 ГГц / О.С. Матвеенко, Д.Л. Гнатюк, А.С. Бугаева, А.Ю. Павлова, С.А. Гамкрелидзеа // Микроэлектроника. – 2022. – Т. 51, № 3. – С. 195–201.

4. Федоров Ю. Широкозонные гетероструктуры (Al,Ga,In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // Электроника. – 2011. – № 2. – С. 92–107.

5. Hek A.P. de. Design, Realization and Test of GaAs-based Monolithic Integrated X-band High Power Amplifiers. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002. – 322 p.

6. Балакирев А. Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике / А. Балакирев, А. Туркин // Современная электроника. – 2015. – № 42. – С. 64–69.

7. Добуш И.М. Исследование копланарных элементов монолитных интегральных схем / И.М. Добуш, А.А. Коколов, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2. – С. 46–50.

8. Iulian Rosu Microstrip, Stripline, and CPW Design [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.qsl.net/va3iul, свободный (дата обращения: 20.05.2024).

9. Кищинский А.А. Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития // 19-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009): матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 1. – С. 11–16.

10. Piotrowicz S. State of the Art 58W, 38% PAE X-Band AlGaN/GaN-HEMTs-microstrip MMIC Amplifiers // 2008 IEEE, 2008. – P. 117–126.

11. Нитридная мощная СВЧ-электроника в России: наука перехода от технологии к бизнесу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/9/article_9550_928, свободный (дата обращения: 06.06.2024).

12. Micovic M. W-band GaN MMIC with 842 mW output power at 88 GHz / M. Micovic, A. Kurdoghlian, K. Shinohara // 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – Anaheim: IEEE, 2010. – P. 237–239.

13. Patrick Hindle et al. Get your GaN here: RF GaN Foundry Survey // Microwave Journal. – 2016. – Vol. 59, June. – P. 16.

14. Викулов И. GaN-технология: новый этап развития СВЧ-микросхем / И. Викулов, Н. Кичаева // Электроника: НТБ. – 2007. – № 4. – С. 80–85.

15. WIN Semiconductors – Leading Global Communication [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.winfoundry.com/en-US, свободный (дата обращения: 09.06.2024).

16. BAE Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.baesystems.com/en/what-we-do, свободный (дата обращения: 09.06.2024).

17. Homepage – Fraunhofer IAF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.iaf.fraunhofer.de/en.html, свободный (дата обращения: 09.06.2024).

18. SMIC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.smics.com/en/site/about_summary, свободный (дата обращения: 09.06.2024).

19. Notice of System Maintenance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hkex.com.hk/eng/invest/company/profilepage_e.asp?WidCoID=0981&WidCoAbbName=&Month=&langcode=e, свободный (дата обращения: 09.06.2024).

20. Delgado P. CD3couples T-cell receptor signalling to ERK activation and thymocyte positive selection / P. Delgado, E. Fernandez, V. Dave, K. Dietmar, B. Alarcon // Nature. – 2000. – P. 426–430.

21. СВЧ-компоненты на основе технологии нитрида галлия: что изменилось за два года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.electronics.ru/journal/article/9701, свободный (дата обращения: 10.06.2024).

22. АО «НИИЭТ» в сотрудничестве с АО «Светлана-Рост» завершило разработку серии из двух полностью отечественных мощных СВЧ-GaN-транзисторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://niiet.ru/26_01_2023, свободный (дата обращения: 19.06.2024).

23. АО «Светлана-Рост» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.svetlana-rost.ru/?page=main, свободный (дата обращения: 12.01.2025).

24. НИИЭТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://niiet.ru, свободный (дата обращения: 12.01.2025).

Михайленко Вячеслав Евгеньевич
Инженер департамента ИИС ЗАО «НПФ «Микран»
Кирова пр-т, 51д, г. Томск, Россия, 634041
Тел.: +7-913-823-81-34
Эл. почта: mikhailenko.ve@micran.ru

Заболоцкий Александр Михайлович
Д-р техн. наук, проф., зав. каф. СВЧиКР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-36-43
Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru

Mikhailenko V.E., Zabolotsky A.M.

Review of technology for manufacturing monolithic integrated circuits for the microwave range

Modern microwave technology places serious requirements on the electronic component base. When manufacturing monolithic integrated circuits (MIC), a large number of types of conductors are used, that have their own boundary parameters and dimensions. Taking into account these limitations, the task arises to choose a technology (material) that will ensure the fulfillment of technical tasks during the development of microwave MIC. At the moment, when creating microwave integrated circuits, the leading ones are the technologies that use semiconductors made from galium arsenide (GaAs) and galium nitride (GaN). The work provides a review and a comparative analysis of the fabrication of MMICs using GaAs and GaN technologies in Russia and abroad. This material can be used in the design of microwave MIC and contribute to the implementation of technical specifications.

Keywords: monolithic integrated circuit, low-noise amplifier, technology, topology, transistor, microwave power.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-23-30

References

1. Stepanenko I.P. [Fundamentals of microelectronics: textbook. manual for universities. 2nd edition revised and augmented]. *Laboratory of Basic Knowledge*, 2001, pp. 488 (in Russ.).

2. Dzekhtser G.B., Orlov O.S. [P-I-N-diodes in broadband microwave devices]. *Soviet Radio,* 1970, pp. 200 (in Russ.).

3. Matveenko O.S., Gnatyuk D.L., Bugaeva A.S., Pavlova A.Y., Gamkrelidzea S.A. [Monolithic integrated circuits based on gallium nitride for short-range radar and communications equipment in the frequency range of 22–25 GHz] *Microelectronics,* 2022. vol. 51, no. 3, pp. 195–201 (in Russ).

4. Fyodorov Y. [Wide-band heterostructures (Al,Ga,In)N and devices based on them for the millimeter wavelength range]. *Electronics,* 2011, no. 2, pp. 92–107. (in Russ.).

5. Hek A.P. de. Design, Realization and Test of GaAs-based Monolithic Integrated X-band High Power Amplifiers. *Technische Universitait Eindhoven*, 2002, pp. 322.

6. Balakirev A., Turkin A. [Development of gallium nitride tech-nology and prospects for its application in microwave electronics]. *Modern Electronics,* 2015, no. 42, pp. 64–69 (in Russ.).

7. Dobush I.M., Kokolov A.A., Babak L.I. [Study of coplanar elements of monolithic integrated circuits]. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, no. 2, pp. 46–50 (in Russ.).

8. Iulian Rosu [Microstrip, Stripline, and CPW Design]. Available at: www.qsl.net/va3iul, free (Accessed: March 20, 2024).

9. Kishchinsky A.A. [Solid-state microwave power amplifiers based on gallium nitride - status and development prospects]. *The 19th International Crimean conference "Microwave Technology and Telecommunication Technologies" (KryMiKo'2009): material. conf. Sevastopol: Weber*, 2009, vol. 1, pp. 11–16 (in Russ).

10. Piotrowicz S. State of the Art 58W, 38% PAE X-Band AlGaN/GaN HEMTs microstrip MMIC Amplifiers // *2008 IEEE*, 2008, pp. 117–126.

11. [Nitride high-power microwave electronics in Russia: the science of transition from technology to business]. Available at: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/9/article_9550_928, free. (Accessed: June 06, 2024).

12. Micovic M., Kurdoghlian A., Shinohara K. W-band GaN MMIC with 842 mW output power. *Microwave Symposium Digest (MTT), 2010 IEEE MTT-S International,* 23–28 May, 2010, pp. 237–239.

13. Patrick Hindle et al. Get your GaN here: RF GaN Foundry Survey. *Microwave Journal*, 2016, vol. 59, June, pp. 16.

14. Vikulov I., Kichaeva N. [GaN-technology: a new stage in the development of microwave chips] *Electronics: NTB.* 2007, no. 4, pp. 80–85 (in Russ.).

15. [WIN Semiconductors – Leading Global Communication] Available at: https://www.winfoundry.com/en-US, free (Accessed: June 09, 2024).

16. [BAE Systems] Available at: https://www.baesystems.com/en/what-we-do, free. (Accessed: June 09, 2024).

17. [Homepage – Fraunhofer IAF] Available at: https://www.iaf.fraunhofer.de/en.html, free (Accessed: June 09, 2024).

18. [SMIC] Available at: https://www.smics.com/en/site/about_summary, free (Accessed: June 09, 2024).

19. [Notice of System Maintenance] Available at: https://www.hkex.com.hk/eng/invest/company/profilep-age_e.asp?WidCoID=0981&WidCoAbbName=&Month=&langcode=e, free (Accessed: June 09, 2024).

20. Delgado P., Fernandez E., Dave V., Dietmar K., Alarcon B. CD3couples T-cell receptor signalling to ERK activation and thymocyte positive selection, *Nature*, 2000, pp. 426–430.

21. [Microwave components based on gallium nitride technology: what has changed in two years]. Available at: www.qsl.net/va3iul, free (Accessed: June 10, 2024).

22. [JSC NIIET, in collaboration with JSC Svetlana-Rost, has completed the development of a series of two completely domestic high-power microwave GaN transistors] (In Russ.). Available at: https://niiet.ru/ 26.01.2023, free (Accessed: June 19, 2024).

23. [JSC «Svetlana-Rost»] (in Russ.). Available at: http://www.svetlana-rost.ru/?page=main, free (Accessed: January 12, 2025).

24. [JSC «NIIET»] (in Russ.). Available at: https://niiet.ru, free (Accessed: January 12, 2025).

Vyacheslav E. Mikhailenko
Engineer of the IIS Department, JSC «NPF Micran»
51d, Kirova pr., Tomsk, Russia, 634041
Phone: +7-913-823-81-34
Email: mikhailenko.ve@micran.ru

Alexander M. Zabolotsky
Doctor of Science in Engineering, Professor,
Head of the Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-36-43
Email: zabolotsky_am@mail.ru

УДК 621.391.825

А.М. Лакоза

Обзор современных устройств фильтрации и защиты от кондуктивных электромагнитных помех в радиоэлектронных системах

Выполнен обзор и сравнительный анализ актуальных устройств фильтрации и подавления электромагнитных кондуктивных помех, предназначенных для защиты современных радиоэлектронных систем (РЭС). Кратко изложены преимущества и недостатки рассмотренных устройств и прототипов. Указаны основные элементы и особенности применения, а также приведены примеры экспериментальной и практической реализации.
Ключевые слова: устройства защиты, дифференциальный режим, синфазный режим, электромагнитные помехи, кондуктивные помехи, электромагнитная совместимость.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-31-46

В современных радиоэлектронных средствах (РЭС) благодаря значительным коммутационным токам, напряжениям, а также возрастающей частоте их переключений генерируются высокочастотные электромагнитные помехи (ЭМП) [1–8]. Подобные генерируемые шумовые токи называются кондуктивными ЭМП: они, проходя по входным линиям питания устройства, могут вызывать помехи в других электронных системах, включая вспомогательные цепи [9]. Любое оборудование, предназначенное для использования в гражданской и военной промышленности, а также критических областях деятельности человека, должно соответствовать ужесточающимся из года в год стандартам электромагнитной совместимости (ЭМС) [10–13].

Минимизация влияния ЭМП для соответствия подобным стандартам ЭМС даже на этапах разработки требует значительных затрат, кратно увеличивающихся на следующих этапах проекта [14]. На текущий момент существует множество различных систематических методов, процедур проектирования и устройств защиты, направленных на снижение влияния кондуктивных ЭМП [15, 16].

Тематические обзорные материалы по конструкторским и схемотехническим решениям предлагают недостаточное количество примеров, ограниченное конкретными производителями [17–22] или разновидностями устройств защиты (гибридные [23], для импульсных источников питания [24], пассивные [25]), поэтому проведение сравнительного обзора, затрагивающего широкий перечень устройств защиты, является актуальной задачей.

Целью данной статьи является обзор и сравнение современных и актуальных устройств фильтрации и подавления электромагнитных кондуктивных помех, предназначенных для защиты радиоэлектронных систем (РЭС).

Устройства защиты на основе активных элементов

В [26] исследуется устройство, представляющее собой активный фильтр синфазных помех по постоянному току. Данный фильтр предназначен для компенсации синфазных помех на выходе полезной нагрузки и снижения высокочастотных токов утечки. В данном фильтре используется система обнаружения напряжения синфазной помехи, образованная при помощи трех конденсаторов C_d, соединенных «звездой», величина каждого из них составляет 1 нФ, величина дополнительной разделительной ёмкости C_r – 3 нФ (рис. 1).

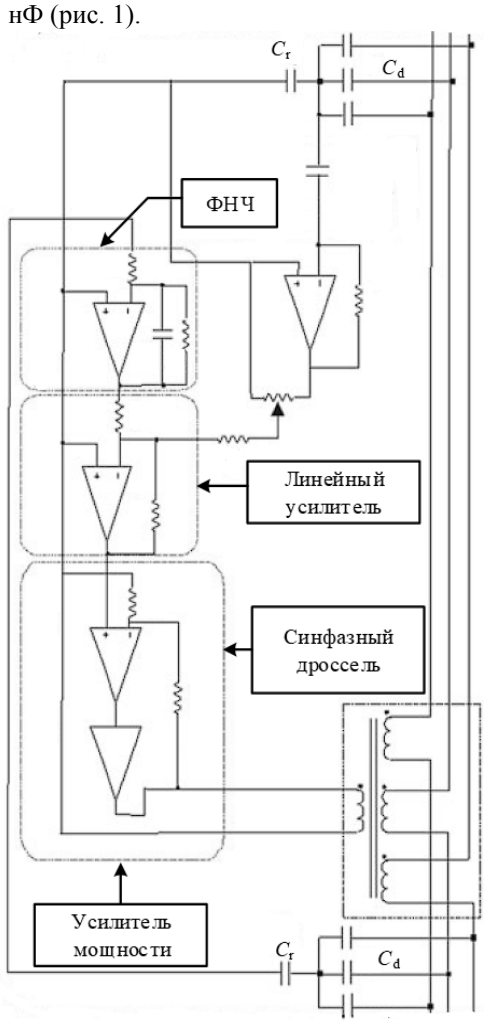


Рис. 1. Схема синфазного активного фильтра

Это связано с тем, что детектируемое напряжение делится на коэффициент $k = 2$, а значит, активный

фильтр работает при напряжении, вдвое меньшем, чем напряжение питания (около 18 В). Используемый усилитель мощности – LME 49600. В конструкции синфазного дросселя применен сердечник из нанокристаллического материала с высоким значением магнитной проницаемости (VITROPERM W523). Дроссель обладает коэффициентом трансформации 1:2 (на 10 витков вторичной обмотки приходится 5 витков первичной обмотки). Полоса пропускания дросселя составляет около 10 МГц. Для линейного усилителя и фильтра нижних частот используется микросхема LM6172 (для последнего – в инвертирующей конфигурации исполнения). Реализованное устройство изображено на рис. 2.

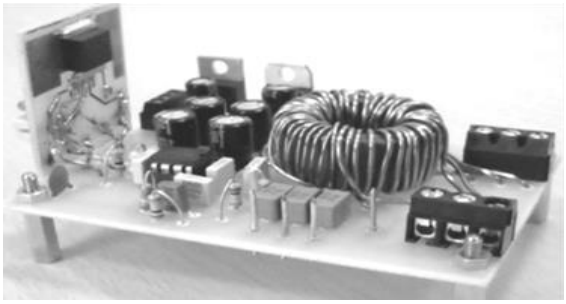


Рис. 2. Синфазный активный фильтр

На рис. 3 приведены экспериментальные временные осциллограммы напряжений на полезной нагрузке без фильтра и с предлагаемым фильтром при отсутствии (см. рис. 3, *а*) и при наличии (см. рис. 3, *б*) сигнала обратной связи (ОС) по напряжению.

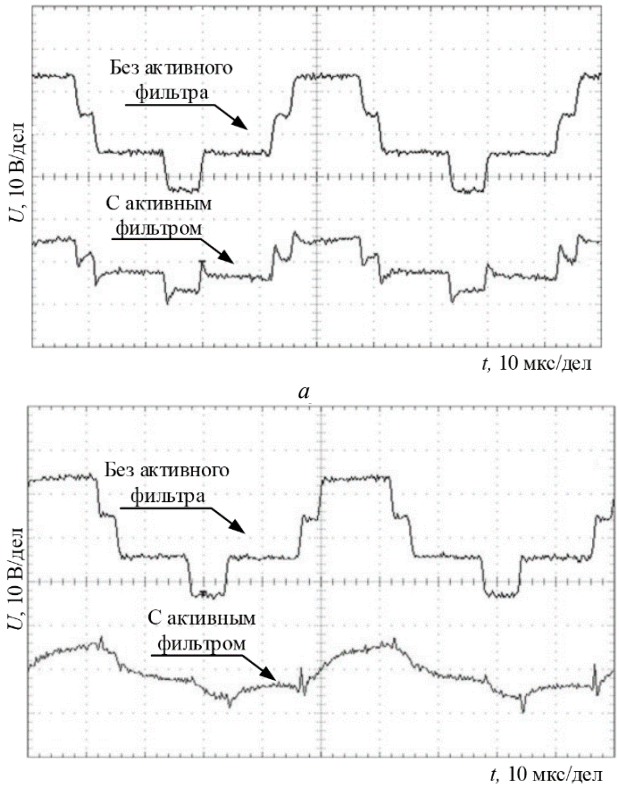


Рис. 3. Временные осциллограммы сигналов: при отсутствии (*а*) и при наличии ОС по напряжению (*б*)

По результатам измерений отмечено, что использование активного фильтра позволяет уменьшить амплитуду синфазных помеховых напряжений до 50%, а наличие ОС по напряжению приводит к дополнительному сглаживанию фронтов. Это связано с тем, что сигнал ОС правильно воспроизводит быстрые фронты и тем самым способствует улучшенной компенсации напряжений в синфазном режиме.

Существуют портативные модульные фильтры ЭМП производства компании SynQor со стандартным расположением выводных контактов [27]. Отличительной особенностью данных фильтров является отсутствие электролитических конденсаторов в составе устройств, что положительно влияет на ресурс, снижает энергетические потери и расширяет температурный рабочий диапазон. Заявленные модульные фильтры имеют встроенную защиту от короткого замыкания (КЗ), плавный старт, функционал отключения активных частей фильтра с целью снижения энергопотребления при отключенной полезной нагрузке, а также функцию повторителя сигнала управляющего сигнала нагрузки (подключение / отключение) (рис. 4).

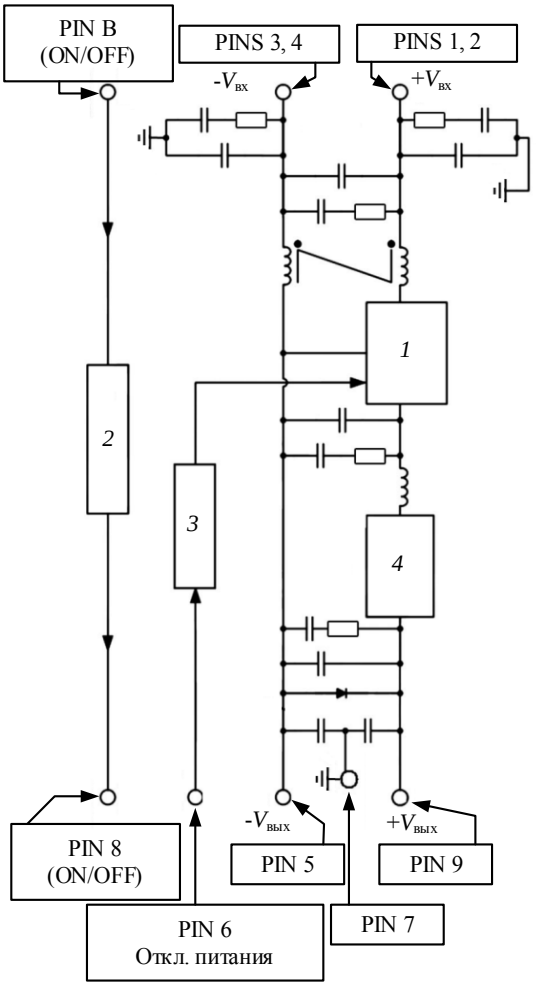


Рис. 4. Структура модульного ЭМП-фильтра модели MCOTS-F-28-T-HT: узел защиты, контроля напряжения и мягкого старта (*1*), повторитель (*2*), согласующая схема (*3*), синхронный выпрямитель и схема контроля (*4*)

Фильтры предлагаются в двух вариантах исполнения: Mil-COTS и Hi-Rel (рис. 5). Mil-COTS имеют упрощенную конструкцию: пластиковый сборный корпус, пластиковая вставка для фиксации и изоляции печатной платы (ПП), наличие алюминиевой пластины для отвода тепла, а также заполнение внутреннего пространства органическим клеем повышенной теплопроводности на основе кремния. Hi-Rel отличается улучшенным качеством и отличительными конструктивными особенностями: использование многослойной ПП для увеличения плотности монтажа, исключения проблемы локальных перегревов компонентов и снижения габаритов; ПП закреплена за счет изолирующих планок и не имеет прямого контакта с корпусом; изготовление в более компактных цельнометаллических корпусах (алюминий, с защитным покрытием из никеля и гальванически осажденным золотом), заполнение внутреннего пространства теплопроводным полимерным компаундом; отсутствие в составе устройства электролитических и танталовых конденсаторов (заменены керамическими).

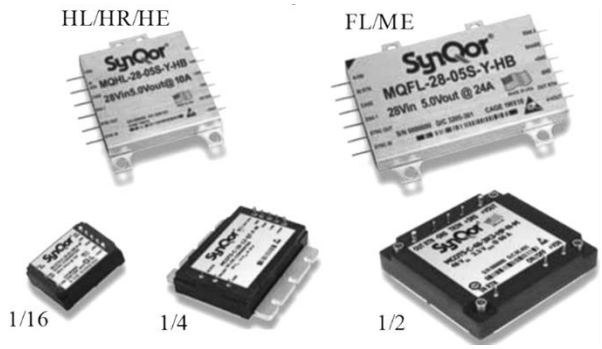


Рис. 5. Конструктивное исполнение ЭМП-фильтра: модели Mil-COTS (сверху) и Hi-Rel (снизу) с различными вариантами корпусов

В [28] описано модульное устройство защиты MTF50 компании XP Power, предназначенный для помехоподавления в цепях питания РЭА. В зависимости от конструктивного исполнения, данный контакт может оставаться как не подключенным, так и соединяться с выводом $-V_{вх}$ или корпусом (рис. 6). Герметизированный полимерным компаундом корпус размерами 40×26×12,7 мм обеспечивает отвод тепла от компонентов модуля, защищает от агрессивных факторов внешней среды.



Рис. 6. Внешний вид модульного фильтра MTF50

В составе модуля MTF50 применены блок управления включением/выключением *1*, фильтр *2* на основе четырех встроенных сглаживающих конденсаторов *Y*-типа, имеющих индивидуальный контактный штырь, а также блок активной защиты от импульсных выбросов напряжения *3* (рис. 7). Экспериментальные спектрограммы уровней напряжения на модульном фильтре MTF50 изображены на рис. 8. Отмечено, что на выходных клеммах устройства уровни напряжений находятся гораздо ниже значений, регламентированных стандартом MIL-STD-461E, что говорит о высокой эффективности устройства [29].

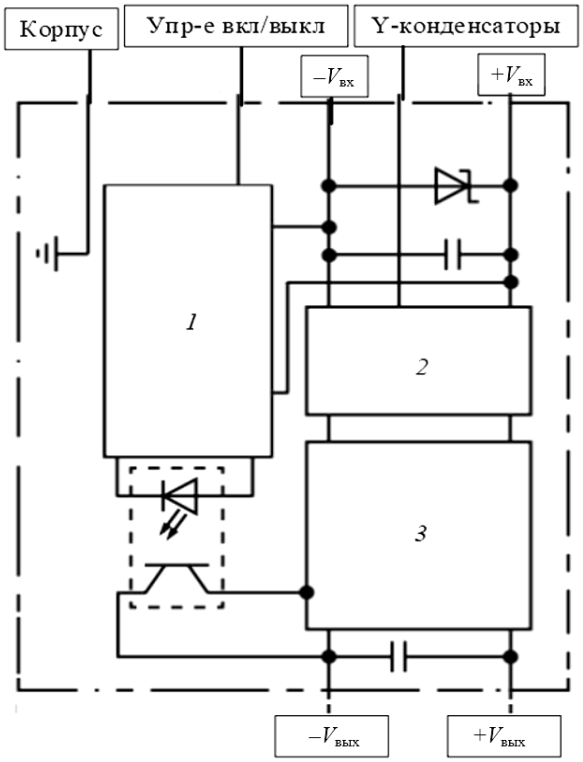


Рис. 7. Структурная схема модульного фильтра MTF50

Устройства на основе пассивных элементов

Известно устройство защиты, представляющее собой конденсаторную батарею-фильтр (рис. 9), состоящую из наборов фазных и линейных конденсаторов таким образом, что к симметричным точкам цепи из не менее трех последовательно соединенных линейных конденсаторов подключены одни из выводов фазных конденсаторов [30].

Данное устройство работает следующим образом: при подключении между полезной нагрузкой и источником в мощных цепях электропитания происходит подавление импульсных помеховых воздействий между линиями *1*, *7* при помощи цепи линейных конденсаторов *2*, *3*, *5*. При появлении синфазных помеховых импульсов происходит их фильтрация при помощи фазных конденсаторов *4*, *6*. Номинал линейных конденсаторов выбирается с учетом значительного напряжения, возникающего между линиями. В свою очередь, фазные конденсаторы рассчитываются на значительно меньшее напряжение, что позволяет уменьшить конечные габариты устройства и упростить установку.

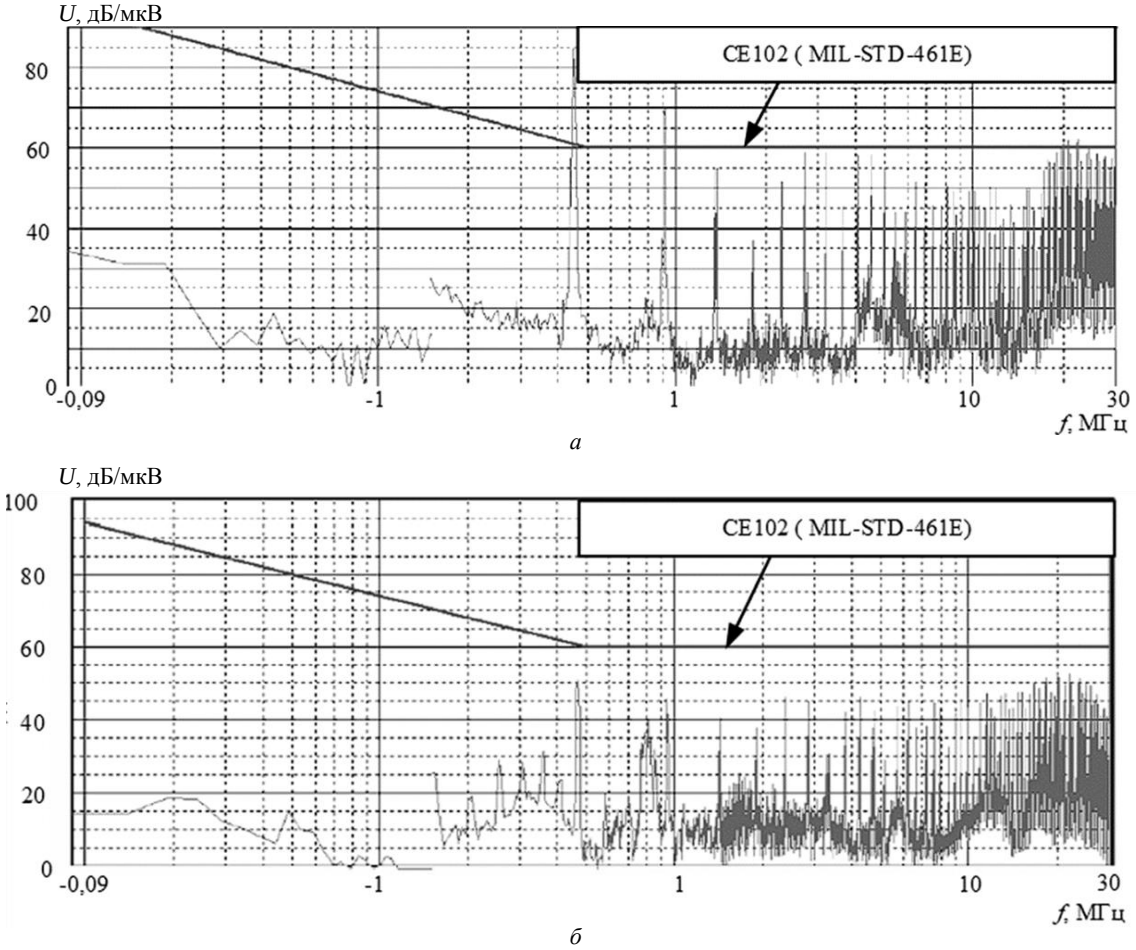


Рис. 8. Спектрограммы помех модульного фильтра MTF50: на входных (*а*) и выходных клеммах (*б*)

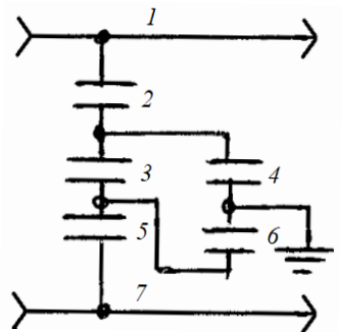


Рис. 9. Конденсаторная батарея-фильтр

В [31] представлена полезная модель устройства защиты, в котором повышение качества фильтрации пиковых помеховых импульсов в дифференциальном и синфазном режимах работы достигается за счет того, что в составе устройства применен двух-обмоточный синфазный помехоподавляющий дроссель, на входе и выходе которого установлены два сглаживающих конденсатора. Устройство состоит из входных (*1*) и выходных (*4*) клемм, предназначенных для подключения к цепям питания и полезной нагрузке соответственно, электрического плавкого предохранителя F (*2*), входного сглаживающего конденсатора C_1 (*5*), двухобмоточного дросселя L_1L_2 (*3*) и выходного сглаживающего конденсатора C_2 (*6*) (рис. 10).

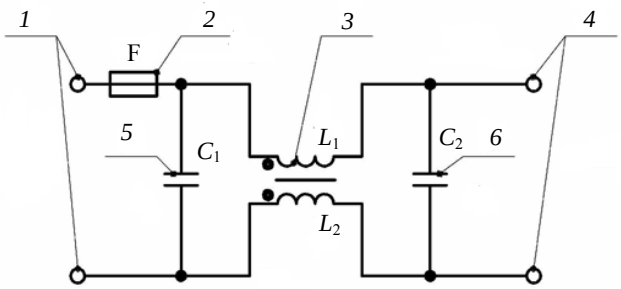


Рис. 10. Помехоподавляющий входной фильтр

Физика работы устройства заключается в следующем: при отключении полезной нагрузки возникающие дифференциальные помеховые импульсы и являющиеся следствием переходных процессов подавляются конденсаторами C_1 и C_2. Для подавления синфазных помеховых импульсов используется симметричный двухобмоточный дроссель L_1L_2, обладающий высоким индуктивным сопротивлением. Конструктивная симметрия устройства позволяет эффективно подавлять не только помехи, возникающие со стороны цепей питания по направлению к полезной нагрузке, но и предотвращать проникновение помех от полезной нагрузки в цепи питания. Результаты испытания устройства защиты в соответствии с ГОСТ 30805.22–2013 (CISPR 22:2006) [32] на предельные уровни помеховых эмиссий со стороны полезной

нагрузки в направлении цепей питания показали, что в диапазоне частот от 9 кГц до 30 МГц показатели помеховых эмиссий не превышают регламентированных уровней (рис. 11).

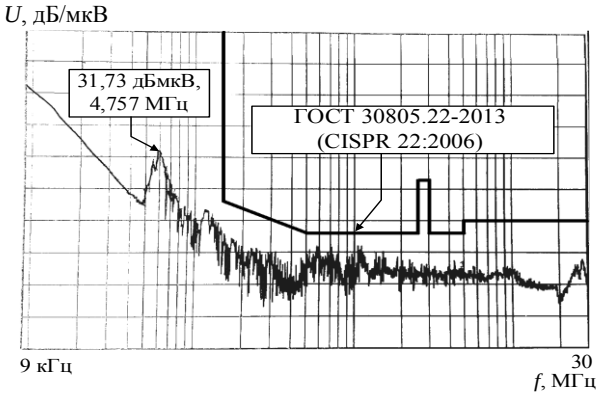


Рис. 11. Частотная диаграмма уровней помеховых эмиссий устройства защиты со стороны полезной нагрузки к цепям питания

Известна конструкция [33] индуктивно-емкостного фильтра, предназначенного для использования в источниках питания сварочной дуги для фильтрации высоковольтных импульсов напряжения высокой частоты, возбуждаемых осцилляторами (рис. 12). Конструкция и схемотехника устройства схожи с [31] и отличаются наличием газового разрядника FA, последовательно включенного с входным сглаживающим конденсатором C_1 и предназначенного для образования на основе индуктивно-емкостного фильтра *1* колебательного контура с переменным показателем добротности (в зависимости от значения напряжения на электродах разрядника FA).

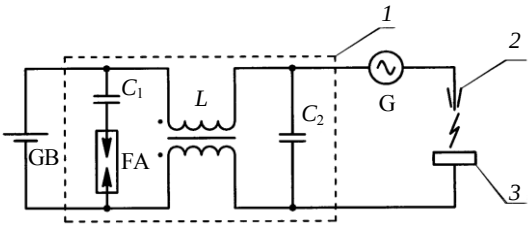


Рис. 12. Индуктивно-емкостной фильтр

Заявляемое устройство работает следующим образом: возбуждаемые осциллятором *G* высокочастотные импульсы высокого напряжения образуются между сварочной горелкой *2* и полезной нагрузкой (воздействующим объектом) *3*. При этом рабочие токи источника питания GB взаимно компенсируются, проходя через синфазный дроссель *L*, не приводят к насыщению кольцевого магнитопровода и не оказывают влияния на эффективность работы дросселя по гашению высокочастотных синфазных импульсов со стороны осциллятора. Сглаживающий конденсатор C_2 предназначен для шунтирования выхода индуктивно-емкостного фильтра, а его сопротивление помеховым импульсам со стороны осциллятора равно нулю. Сглаживающий конденсатор C_1 препятствует появлению непреднамеренной дуги постоянного тока, наведенной от источника GB в разрядник FA.

В [34] описано устройство защиты от импульсных помех, представляющее собой синфазный фильтр для преобразователя, работающего в импульсном режиме *4*. Устройство состоит из кольцевых магнитопроводов *2* и *7* на основе аморфного железа или феррита, на которых выполнены основные обмотки *1* и *6* (от 1 до 5 витков), подключённые к выходным или входным цепям преобразователя, а также вторичных обмоток *3* и *5*, которые соединены друг с другом (рис. 13). Технический результат предложенного устройства заключается в упрощении конструкции и достигается за счет того, что каждый кольцевой магнитопровод обладает индивидуальной основной обмоткой, при этом вторичные обмотки являются общими и соединены между собой.

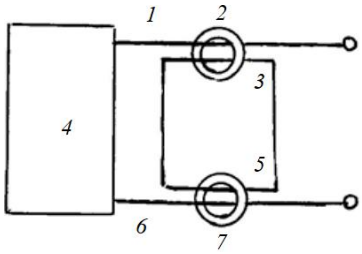


Рис. 13. Синфазный фильтр импульсного преобразователя

Предложенное устройство работает следующим образом: возникающие при работе импульсного преобразователя *4* токи синфазной помехи на кольцевых магнитопроводах *2* и *7*, независимо от природы появления (к или от преобразователя), всегда будут сонаправлены. По этой причине участок цепи, состоящий из основных обмоток *1*, 6 и кольцевых магнитопроводов *2* и *7*, является для синфазных помеховых импульсов ослабляющей индуктивностью. При этом встречно направленные вторичные обмотки *3* и *5* не будут оказывать влияния на синфазную помеху.

В случае возникновения дифференциальных помеховых импульсов наведенные током электродвижущие силы (ЭДС) во вторичных обмотках суммарно образуют ток, величиной аналогичный току короткого замыкания. Соответственно, кольцевые магнитопроводы *2* и *7* перейдут в режим короткого замыкания (КЗ), по причине которого сопротивление основных обмоток *1* и *6* будет крайне мало. Благодаря особенностям конструктивного исполнения, присутствует техническая возможность разнести кольцевые магнитопроводы *2* и *7* между собой на значительное расстояние для обеспечения большей эффективности устройства (например, в высоковольтных установках).

Экранированные устройства защиты

В [35] описана полезная модель, представляющая собой помехоподавляющий фильтр для цепей переменного тока, состоящий из трех индуктивных звеньев (два синфазных дросселя *5*, индуктивно связанных обмотками *4*, а также отдельные индуктивности *6*), набора керамических конденсаторов *3*, выполненный в двойном экранирующем корпусе (металлический корпус *1* и внутренний металлический экран *2*) (рис. 14). Конечное изделие заливается компаундом, в состав которого введены ферромагнитные порошки

аморфных измельченных и нанокристаллических фракций. Технический результат заключается в увеличении значения вносимого затухания в полосе подавления фильтра и расширении полосы подавления ЭМП. Также известен помехоподавляющий фильтр для цепей постоянного тока [36]. Конструкция данного устройства отличается от [35] наличием электролитических конденсаторов на выходе устройства.

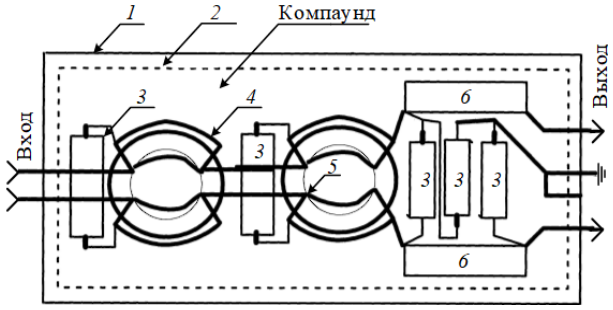


Рис. 14. Модульный помехоподавляющий фильтр модульного исполнения: для цепей переменного тока

В [37] описан экранированный модальный фильтр (МФ), состоящий из двух каскадов (рис. 15). В основе данного устройства лежит принцип модальных искажений, вследствие разности задержек мод в линиях передачи [38], благодаря которым происходит ослабление помеховых импульсов в дифференциальном и синфазном режимах работы.

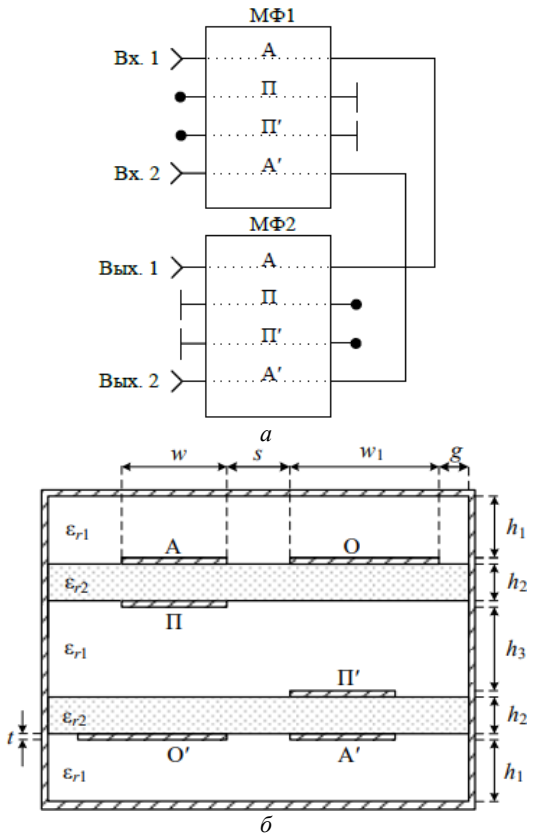


Рис. 15. Двухкаскадный МФ: схема электрических соединений (*а*) и поперечное сечение (*б*), где А, А′ – активные, О, О′ – опорные, П, П′ – пассивные проводники

Отсутствие активных и пассивных радиоэлектронных компонентов позволяет использовать устройство защиты в условиях повышенной влажности, низких и высоких температур, воздействия ионизирующего излучения, а также при высоких перегрузках. Наличие алюминиевого корпуса, играющего роль экрана, позволяет применять устройство в условиях сложной электромагнитной обстановки.

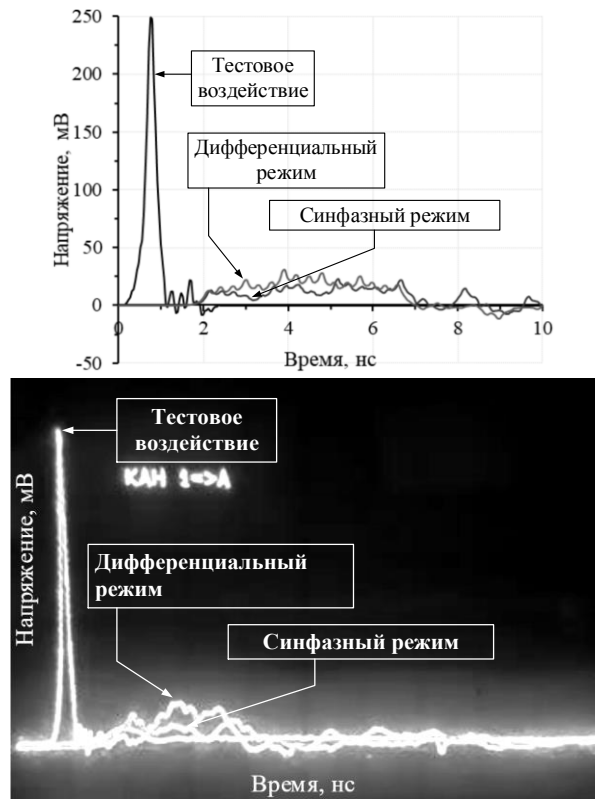
Рассматриваемый фильтр состоит из шестипроводной экранированной микрополосковой структуры в неоднородном диэлектрическом заполнении. Используемая конструктивная особенность в виде каскадирования предназначена для дополнительного уменьшения амплитуды помеховых импульсов. Устройство имеет следующие геометрические размеры (в мм): $h_2 = 0{,}43$, $w = 3$, $w_1 = 6$, $\varepsilon_{r1} = 1$, $\varepsilon_{r2} = 4{,}7$, $g = 4{,}2$, $t = 0{,}035$, $h_1 = 6$, $s = 0{,}5$, $h_3 = 3$. Длина МФ2 составляет 220 мм, МФ1– 110 мм.

На рис. 16 показан способ размещения ПП МФ на основе двухстороннего материала СТФ в экранирующем корпусе из алюминия с толщиной стенки 1,5 мм.

В рамках численного моделирования и экспериментального исследования были получены формы напряжений (рис. 17) в дифференциальном и синфазном режимах работы.



Рис. 16. Макет МФ: размещение стека ПП внутри экранирующего корпуса и расположение проводников



б

Рис. 17. Форма сигналов во временной области: численное моделирование (*а*), эксперимент (*б*)

Полученные значения вносимых потерь для дифференциального и синфазного режимов работы внесены в табл. 1.

Таблица 1

Вносимые потери двухкаскадного МФ, дБ

Режим	Синфазный	Дифференциальный
Моделирование	20,72	18,13
Эксперимент	23,86	17,84

Отклонение результатов моделирования от эксперимента составило 3,14 и 0,29 дБ для синфазного и дифференциального режимов соответственно.

В рамках численного моделирования и экспериментального исследования были получены частотные зависимости модулей коэффициентов передачи (рис. 18) в дифференциальном и синфазном режимах работы.

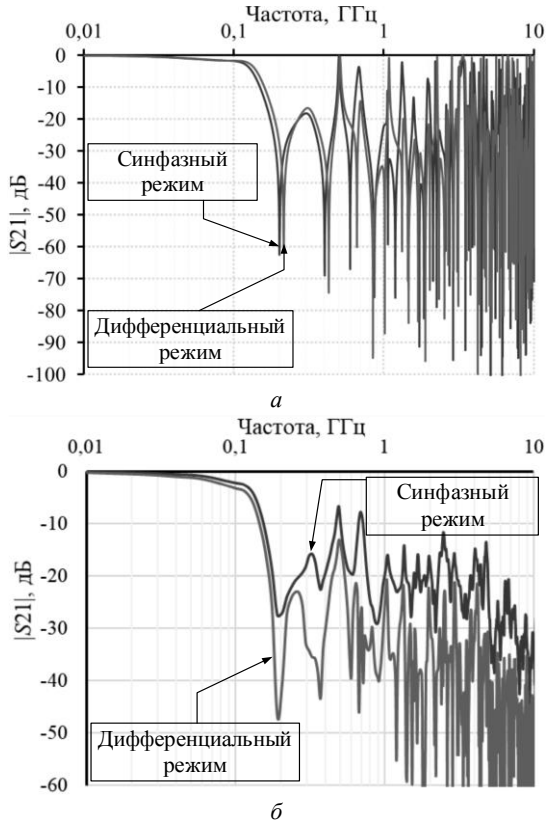


Рис. 18. Модули коэффициента передачи: численное моделирование (*а*), эксперимент (*б*)

Полученные значения частот среза для дифференциального и синфазного режимов работы внесены в табл. 2.

Таблица 2

Частота среза МФ, МГц

Режим	Синфазный	Дифференциальный
Моделирование	121	130
Эксперимент	127	98

Отклонение результатов моделирования от эксперимента составило 6 и 32 МГц для синфазного и дифференциального режимов соответственно. Наблюдаемые отклонения результатов компьютерных моделирований и экспериментов обусловлены разбросом параметров, а также влиянием используемых в составе прототипа МФ крепежа, разъемов-соединителей и выводных кабелей.

Интегрированные устройства защиты

В [39] предложен способ изготовления линии электропередачи, позволяющий снизить амплитуды помеховых импульсов в дифференциальном и синфазном режимах за счет уменьшения погонной индуктивности и увеличения погонной емкости линии в поперечном сечении. Способ заключается в следующем: полый цилиндр из диэлектрического или электропроводящего материала *2* покрыт диэлектрической оболочкой *1*, при этом внутри данного цилиндра выполнены линии передачи *4* (опционально – совмещенные с волоконно-оптическими линиями связи) в оболочке *3*, а на внешнюю сторону, по принципу спирали Архимеда, наматываются *k*-электропроводящие слои *5*, конструктивно совмещенные с изоляторами *6* при помощи клеевых слоев (рис. 19, *а*). На продольные стороны электропроводящих слоев установлены Г-образные коннекторы *7* и *8*, каждый из которых соответствует фазам или полюсам используемой линии передачи (рис. 19, *б*).

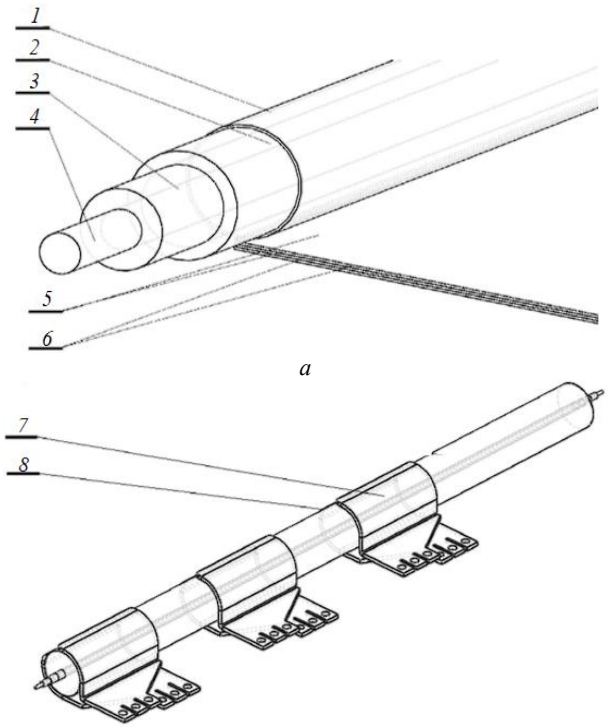


Рис. 19. Линия передачи (изометрия), вид: развернутый (*а*), спирального сечения (*б*)

На торцевых сторонах электропроводящих слоев смонтированы пустотелые металлические цилиндры *9* и *11* с одинаковой площадью поперечного сечения, но имеющие разные радиусы, совместно с изоляторами *10* образуя коаксиальную линию передачи, состоящую из *k*-цилиндров, разделенных изоляторами (рис. 20). Элемент *12* линии передачи представляет собой конструкцию, показанную на рис. 19, *а*.

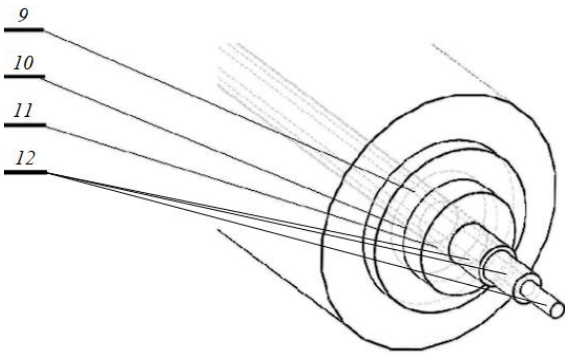


Рис. 20. Цилиндрические клеммы (изометрический вид)

Принцип действия устройств: источник питания подключается таким образом, что одна из клемм является проводником возвратных токов (*11*), а другая – обратных (*9*). Полезная нагрузка или дополнительная линия передачи подключаются при помощи клемм *7* и *8*. Внутри спиральной линии ток протекает в поперечном направлении (диагонально, от источника в направлении нагрузки). Структура устройства позволяет инвертировать подключение: так, полезная нагрузка (или дополнительная линия передачи) подключается к клеммам *9* и *11*, а источник – к клеммам *7* и *8*. Технический результат достигается по причине плотного сворачивания нескольких электропроводящих слоев, все витки полюсов расположены друг промеж друга, тем самым увеличивая погонную емкость, а значение погонной индуктивности, наоборот, снижается за счет возникающей между витками взаимной индуктивности.

В [40] представлена полезная модель помехоподавляющего кабеля. В конструкции кабеля применена токопроводная жила *5* (одиночная или в виде нескольких проводников *2*), оснащенная кольцевыми наконечниками *1* и покрытая помехоподавляющим экраном, который состоит из лент, выполненных из быстроохлаждаемых нанокристаллических или аморфных метастабильных сплавов *7*. По причине расположения лент внахлест в конструкции помехоподавляющего экрана полностью исключены щели и апертуры. Материал экрана также обладает высокой индукцией насыщения, позволяя поглощать избыточное магнитное поле, параллельно с этим экранируя магнитные поля, поступающие извне. С целью защиты кабеля от внешнего электромагнитного излучения в конструкции применяется дополнительная медная экранирующая оболочка *6*, выполненная по типу «кабельного чулка» и расположенная под внешним защитным покрытием *8* (рис. 21).

Для ограничения распространяющихся помеховых импульсов в жиле в конструкции применен кольцевой ферритовый сердечник *4*, который охватывает оболочку *7* и размещается в конце кабеля. С целью изоляции самого магнитопровода используется муфта, состоящая из подвижной *9* и неподвижной *3* частей (накручиваемая непосредственно на магнитопровод и одетая на концы жил соответственно). Дополнительный функционал муфты заключается в улучшении фиксации магнитопровода на кабели и повышении точности его позиционирования относительно жил. Примечательно, что в качестве материала магнитопровода может выступать как упомянутая выше лента из метастабильных быстроохлаждаемых сплавов, так и классический феррит. Установленный таким образом кольцевой магнитопровод образует на данном участке линии передачи синфазный трансформатор.

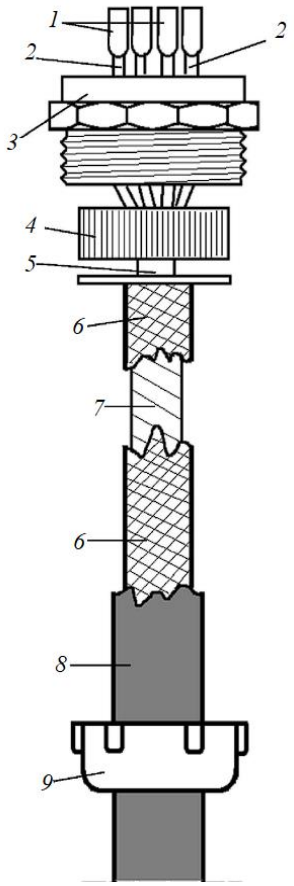


Рис. 21. Помехоподавляющий кабель

В [41] описано устройство, представляющее собой помехозащищенную силовую шину электропитания (СШЭП), состоящую из проводника в виде пластины *3*, которая изолирована и помещена к корпус. Корпус представляет собой крышку *1* и П-образное основание *7*, образующие собой шину для возвратных токов, позволяя тем самым снизить паразитные параметры (за счет увеличения погонной ёмкости и уменьшения погонной индуктивности соответственно) (рис. 22).

Каждая из токопроводящих жил имеет углубления для пайка *11* с целью монтажа отводов по продольным сторонам. Основание *7* также имеет возможность для установки отводов через прорези *12*. С целью компенсации теплового продольного расширения токопроводящей шины *3* основание *7* имеет открытые стенки *13*. Сформированная СШЭП имеет возможность при помощи планок *14*, кронштейнов *18* и держателей *16* устанавливаться на стационарную панель *17*, а также фиксировать на себе внешний фильтр защиты от помех *15*, снабженный индивидуальным электрическим экраном. Верхняя крышка *1*

устанавливается совместно с клеевым электропроводным слоем *2*, внутри которого и размещается шина положительной полярности, имеющая заданные показатели толщины и ширины (*t* и *w* соответственно).

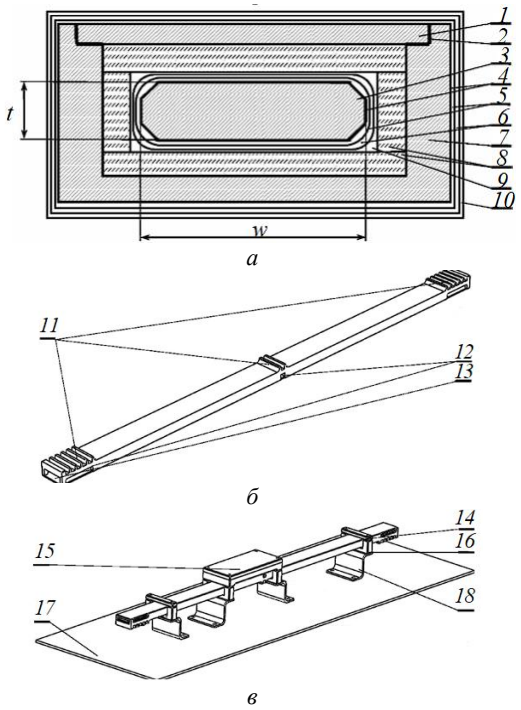


Рис. 22. СШЭП: поперечное сечение (*а*), изометрия (*б*, *в*)

Покрытие каждой из токопроводящих шин включает в себя последовательную обработку различными изоляционными материалами, такими как электроизоляционная пленка *6* (НИИКАМ-ПМ-ЛС и аналогичные), лаковое покрытие *5*, естественная оксидная пленка *4*, а также пенокомпаунд *9* на основе эпоксидной смолы и электроизолирующий слой стеклотекстолита *8*. Вся СШЭП совместно с гибкими отводами после изготовления покрывается металлизированной тканью *10*, улучшающей протекание поверхностных токов от электростатических разрядов. Технически результат заявляемого устройства заключается в увеличении механической и электрической прочности СШЭП, обладающей устойчивостью к внешним ЭМП, а также низкими паразитными параметрами.

Полосковые устройства защиты

В [42] рассмотрен встречно-штыревой микрополосковый фильтр в качестве устройства защиты от сверхширокополосных импульсов. Конфигурация фильтра состоит из массива из *n*-резонаторов линии передачи, каждый из них имеет длину λ/4 от длины волны до соответствующей средней частоты и заканчивается попеременно разомкнутой или короткозамкнутой цепью. Ширина линий связи должна быть выбрана таким образом, чтобы соответствовать характеристическому сопротивлению нагрузки или источника. Макет полоскового встречно-штыревого фильтра на 1 ГГц выполнен на диэлектрической подложке из материала RT/Duroid 5880 с характеристиками: диэлектрическая проницаемость ε_r = 2,2, высота структуры h = 0,5 мм, толщина дорожек t = 35 мкм, тангенс угла диэлектрических потерь tan δ = 0,0009 (рис. 23).



Рис. 23. Полосковый встречно-штыревой фильтр

Полученные в результате моделирования и экспериментального исследования передаточные функции прототипа изображены на рис. 24.

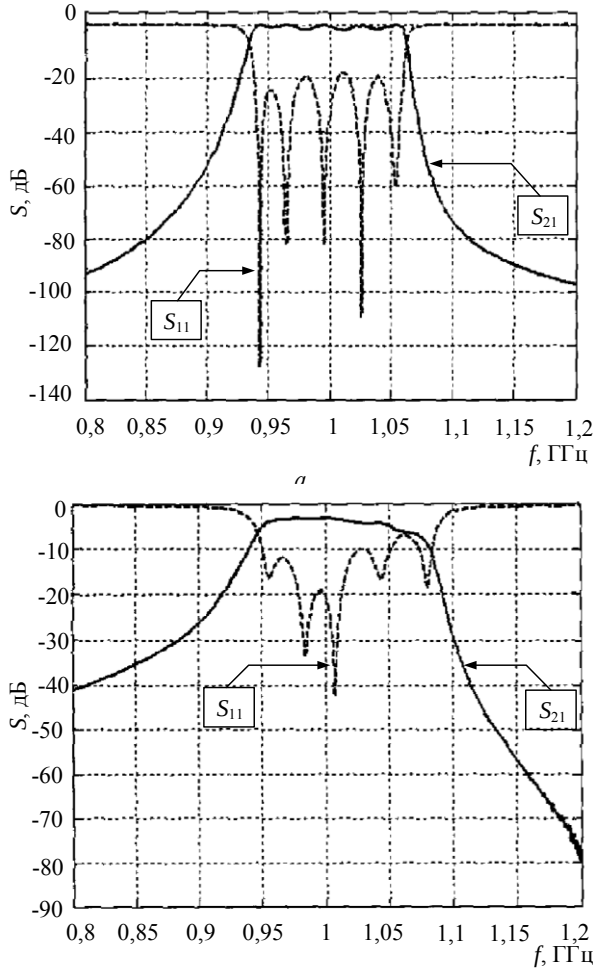


Рис. 24. Частотные зависимости полоскового встречно-штыревого фильтра: моделирование (*а*), эксперимент (*б*)

Такие фильтры подходят для защиты электронных схем от очень быстрых переходных процессов значительной амплитуды и могут быть легко интегрированы в электронные схемы в процессе производства.

В [43] рассмотрена зеркально-симметричная полосковая структура как способ компоновки дифференциальной пары проводников. Технический результат заключается в возможности ослабления помехового импульсного сигнала как в дифференциальном, так и в синфазном режимах работы и достигается за счет определенной компоновки проводников: пятипроводная линия передачи состоит из резервиру-

емых, резервных и опорных проводников, помещенных в диэлектрическую среду (рис. 25).

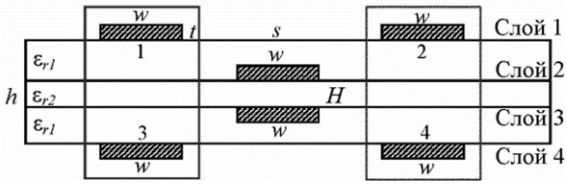


Рис. 25. Поперечное сечение зеркально-симметричной полосковой структуры

Используя дифференциальные резервируемые и резервные пары проводников (1 и 3, 2 и 4 соответственно) и располагая их на наиболее удаленных друг от друга четвертом и первом слоях, достигается лицевой вид связи между линиями, который увеличивает показатель электромагнитной связи между проводниками как в синфазном, так и в дифференциальном режимах работы. Структура обладает следующими геометрическими параметрами (в мкм) $t = 35$, $s = 700$, $w = 325$, $H = 510$, $h = 920$. Продольная длина структуры составляет $l = 1$ м. Схема электрических соединений устройства представлена на рис. 26. Значения всех резисторов равно 100 Ом.

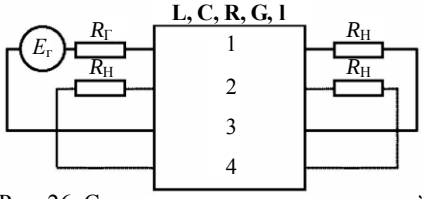


Рис. 26. Схема электрических соединений зеркально-симметричной полосковой структуры

На рис. 27 и 28 представлены результаты моделирования структуры во временной и частотной областях.

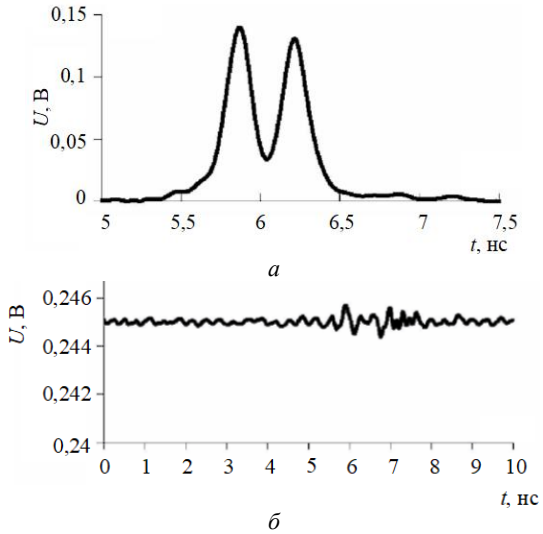


Рис. 27. Моделирование во временной области: прохождение дифференциального (*а*) и синфазного (*б*) сигналов через структуру

Видно, что вносимые потери в дифференциальном режиме работы составляют 3,57 раза. В синфазном режиме наблюдается незначительное колебание сигнала в пределах 1 мВ. По результатам анализа частотной зависимости полоса пропускания составила порядка 450 МГц по уровню –3 дБ.

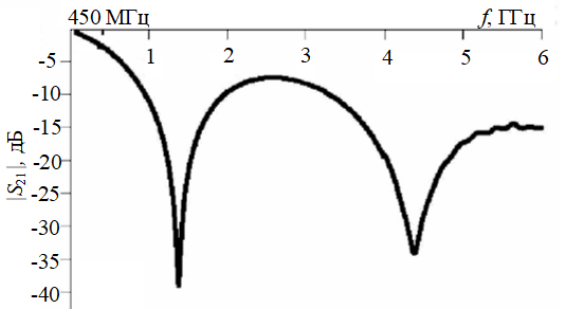


Рис. 28. Частотная зависимость коэффициента передачи устройства

В [44] описана четырехпроводная полосковая структура, обладающая лицевой связью между проводниками. Технический результат заключается в возможности раскладывать сверхкороткие помеховые импульсы как в дифференциальном, так и в синфазном режимах работы, а также в увеличенных уровнях ослабления. Поперечное сечение структуры построено по принципу центральной симметрии относительно центра всей структуры (рис. 29).

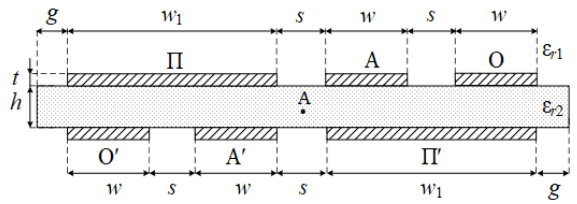


Рис. 29. Поперечное сечение четырехпроводной полосковой структуры, где А, А′ – активные; О, О′ – опорные; П, П′ – пассивные проводники

Структура обладает следующими геометрическими параметрами (в мм): $w_1 = 21$, $\varepsilon_{r1} = 1$, $\varepsilon_{r2} = 20$, $w = 10$, $h = 0{,}36$, $s = 2$, $t = 0{,}105$. Схема электрических соединений представлена на рис. 30.

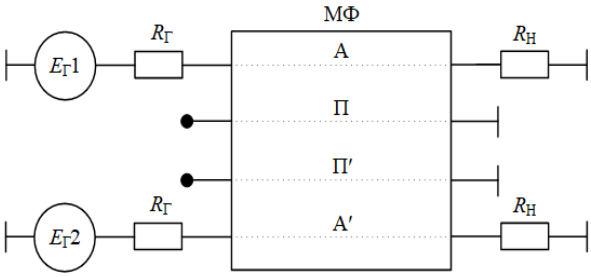


Рис. 30. Четырехпроводная полосковая структура, эквивалентная схема

Продольная длина структуры равна $l = 100$ мм, все значения сопротивлений на схемах равны 50 Ом. На дальних концах пассивных проводников применены резистивные нагрузки номиналами 1 мкОм, что соответствует режиму короткого замыкания (КЗ). На ближних концах пассивных проводников применены резистивные нагрузки номиналами 1 МОм, что соответствует режиму холостого хода (ХХ).

Принцип работы устройства: за счет конфигурации оконечных нагрузок на дальнем и ближнем концах пассивных линий, а также принципа модального разложения сигнала помеховые импульсы, распространяясь вдоль структуры, раскладываются на некоторую последовательность импульсов меньшей амплитуды, благодаря чему происходит ослабление помехового сигнала как в дифференциальном, так и в синфазном режимах работы. На рис. 31 приведены результаты моделирования: максимальное значение амплитуды импульсов на выходе устройства составило 99 мВ (вносимое затухание 14,54 дБ) для синфазного и 93 мВ (вносимое затухание 14,05 дБ) для дифференциального режимов соответственно.

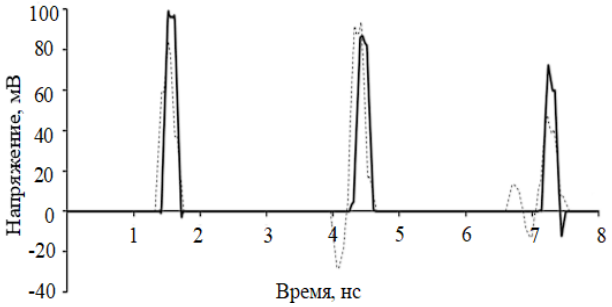


Рис. 31. Формы напряжения на выходе структуры: в синфазном (——) и дифференциальном (….) режимах

Сравнительный анализ устройств защиты

Существующее разнообразие доступных устройств защиты РЭС от кондуктивных помех позволяет найти применение во многих областях деятельности человека. Одними из наиболее простых и объективных критериев оценки каждого класса устройств защиты являются: области применения, сроки эксплуатации, наличие регламентирующих стандартов, характеристика ЭМС, габаритные размеры и сложность проектирования. Краткое описание по всем критериям приведено в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что наибольшей универсальностью обладают фильтры на пассивных компонентах благодаря повсеместно доступной и современной электронной компонентной базе (ЭКБ) активных и пассивных компонентов, отсутствию необходимости во внешнем источнике питания для работы, а также невысоким трудозатратам на производство, разработку и внедрение. Ощутимым недостатком является несколько ограниченная область применения: подобный класс фильтров зачастую не подходит или частично подходит для реализации устройств защиты прецизионных, портативных и быстродействующих РЭС.

Устройства защиты на основе активных компонентов частично решают проблемы предыдущего класса устройств: внедрение в их конструкцию логических цифровых схем, наличие больших значения входного и малых значений выходного сопротивления, способность повышать избирательные характеристики с минимальными затратами, а в определенные моменты получать вместо фильтра усилитель (максимальное значение амплитудно-частотной характеристики допускает быть больше единицы, в отличие от пассивных устройств защиты). Все это позволяет применять данный класс фильтров, где требуется повышенное качество обеспечения питания.

Таблица 3

Сравнение устройств защиты

Класс устройства/параметр	На активных компонентах	На пассивных компонентах	Экранированные	Интегрированные	Полосковые
Сферы применяемости [45, 46]	Телекоммуникационное, радиолокационное оборудование	Цепи питания, акустические системы	Специализированные, критически важные, безаварийные (военная промышленность, медицина, атомная энергетика)		Не ограничены
Характеристика ЭМС [47, 48]	Помехоустойчивость, помехозащищенность			Помехозащищенность	Помехоустойчивость, помехозащищенность
Габариты [49]	Малые, средние	Малые, средние, большие	Средние, большие	Малые, средние	Малые, средние
Срок эксплуатации [50, 51]	Ограничен ЭКБ		Ограничен ЭКБ либо не ограничен		Не ограничен
Особенности проектирования [52]	Выбор и параметризация ЭКБ, учет паразитных параметров ЭКБ		Выбор и параметризация ЭКБ, учет паразитных параметров ЭКБ, учет вида экранирования и типа экрана, учет стыков и апертур экрана	Учет уровня интеграции устройства защиты, выбор и параметризация ЭКБ, учет паразитных параметров ЭКБ	Расчет токовой нагрузки печатных элементов, учет электрической и магнитной проницаемости сред и материалов, параметризация поперечного сечения, ограничения техпроцесса производства ПП
Регламентирующие стандарты [53]	МЭК (IEC), ГОСТ, EN, VG, CISPR, MIL-STD.				

Использование полосковых устройств защиты для РЭС обладает важным преимуществом относительно других классов устройств: практически полное отсутствие активных/пассивных радиоэлектронных компонентов, а следовательно, – отсутствие неучтенных паразитных параметров, необходимости трудоемкого монтажа компонентов на ПП, значительного допуска и разброса номиналов компонентов, а также отсутствие элементов, наиболее подверженных механическим повреждениям, сбоям питания и конструктивным дефектам.

Защитное устройство данного класса может быть интегрировано напрямую в структуру ПП при помощи определенной структуры и расположения электропроводящих дорожек непосредственно самой РЭС. Все это позволяет применять данный класс устройств в экстремальных условиях (например, при ограничении максимального веса РЭС, при резком и значительном перепаде температур, при воздействии космических лучей или радиации). Единственные ограничения накладываются с точки зрения техпроцесса производства ПП, а также масштабируемости. В некоторых случаях рекомендовано использовать данные устройства не только в качестве самостоятельных, но и в качестве дополнительных, вспомогательных устройств к устройствам других классов [54].

Экранированные и интегрированные устройства защиты РЭС характеризуются как одни из наиболее сложных, дорогих и трудоемких устройств: каждое устройство проектируется под определённую задачу (заводские и готовые решения мало распространены либо отсутствуют), применение данного класса устройств связано с областями высокой технологической оснащённости и повышенными требованиями к безаварийности (военная промышленность, медицина, производство, аэрокосмическая промышленность). Помимо этого, цена некоторых отдельно взятых компонентов (например, электрических экранов, экранирующих тканей, токопроводящих клеев, полимерных компаундов, экранирующих пластин и прокладок) или затраты, зависящие от степени интегрирования, могут составлять значительную часть конечной стоимости РЭС [55].

Разновидности экранирования накладывают дополнительные ограничения, значительно влияющие на массогабаритные параметры устройства: при магнитостатическом экранировании материалом экрана выступают ферромагнитные материалы, при электростатическом – металлы с высоким показателем электропроводности (алюминий или серебро), при электромагнитном – материалы со значительным показателем магнитной проницаемости (сталь). Использование неоднородных, многослойных экранов из-за наличия границ раздела поверхностей с разными коэффициентами отражения ЭМ-волн позволяет дополнительно повысить эффективность экранирования [56, 57].

Заключение

Проведённый сравнительный анализ устройств фильтрации и подавления кондуктивных электромагнитных помех позволяет сделать ряд выводов, имеющих практическое и теоретическое значение.

Современные технологии защиты радиоэлектронных систем (РЭС) предлагают широкий спектр решений, начиная от простых пассивных фильтров до сложных интегрированных и экранированных конструкций. Это обеспечивает возможность выбора подходящего устройства под конкретные условия эксплуатации и задачи.

Активные фильтры и экранированные конструкции показали высокую эффективность в широком диапазоне частот, особенно в критически важных приложениях. Полосковые устройства и модальные фильтры предоставляют уникальные возможности для работы в экстремальных условиях за счёт устойчивости к внешним воздействиям и отсутствия паразитных параметров, обеспечивающие надёжную защиту в условиях повышенных требований к электромагнитной совместимости.

Использование нанокристаллических и аморфных материалов значительно расширяет функциональные возможности фильтров, увеличивая их устойчивость к перегрузкам и повышая диапазон рабочих частот.

Данный обзор подчёркивает важность системного подхода к разработке устройств фильтрации и защиты от электромагнитных помех, а также необходимость междисциплинарных исследований для улучшения их характеристик. Полученные результаты будут полезны как для проектировщиков радиоэлектронной аппаратуры, так и для исследователей, занимающихся разработкой новых методов обеспечения электромагнитной совместимости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01216, https://rscf.ru/project/23-79-01216/ в ТУСУРе.

Литература

1. Заболоцкий А.М. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: учеб. пособие / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2018. – 132 с.

2. Гурина Л.А. Электромагнитные помехи и методы защиты от них: учеб. пособие / Л.А. Гурина. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006. – 105 с.

3. Кечиев Л.Н. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС / Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк. – М.: Грифон, 2014. – 448 с.

4. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры: инженерное пособие. – М.: Грифон, 2019. – 720 с.

5. Ott H.W. Electromagnetic compatibility engineering. – New York: Wiley, 2009. – 843 p.

6. Куликова Л.В. Основы электромагнитной совместимости: учеб. / Л.В. Куликова, О.К. Никольский, А.А. Сошников. – 4-е изд., стер. – М.: Директ-Медиа, 2020. – 405 с.

7. Абдулвелеев И.Р. Электромагнитная совместимость электротехнических систем: учеб. пособие. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 84 с.

8. Стукалов С.Б. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем: учеб. пособие. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 64 с.

9. Fuchs E. Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives / E. Fuchs, M. Masoum. – San Diego: Academic Press/Elsevier, 2023. – 1282 p.

10. ГОСТ Р 32132.3–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Низковольтные источники питания постоянного тока. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 34 с.

11. Rohde & Schwarz; Кондуктивные помехи в преобразователях постоянного тока – моделирование и измерение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rohde-schwarz.com/cac/applications/-application-card_56279-1125376.html, свободный (дата обращения: 15.08.2024).

12. ГОСТ CISPR 24–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Устойчивость к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 40 с.

13. ГОСТ CISPR 14-1–2015. Электромагнитная совместимость. Требования для бытовых приборов, электрических инструментов и аналогичных аппаратов. – Ч. 1: Электромагнитная эмиссия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 65 с.

14. Газизов Т.Р. Основы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2022. – 138 с.

15. Mainali K. Conducted EMI mitigation techniques for switch-mode power converters: A survey / K. Mainali, R. Oruganti // IEEE Trans. Power Electron. – 2010. – Vol. 25, No. 9. – P. 2344–2356.

16. Narayanasamy B. A survey of active EMI filters for conducted EMI noise reduction in power electronic converters / B. Narayanasamy, F. Luo // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2019. – Vol. 61, No. 6. – P. 2040–2049.

17. EMI фильтры Murata [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kit-e.ru/emi-filtry-murata/, свободный (дата обращения: 15.11.2024).

18. Подавление помех с помощью фильтров EMIFIL. Руководство по применению [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.platan.ru/docs/library/Murata_EMI_examples.pdf, свободный (дата обращения: 15.11.2024).

19. ЭМС-фильтры TDK-EPCOS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://old.ferrite.ru/products/emc_components/, свободный (дата обращения: 14.11.2024).

20. Входные и выходные EMI фильтры POWTECH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://olil.ru/product/vhodnye-i-vyhodnye-emi-filtry-powtech/, свободный (дата обращения: 15.11.2024).

21. CW4L2 ЭМИ фильтры. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://darxton.ru/files/_misc/f1a/f1a3790d-cf5f-11eb-8e3d-000c29fafacd.pdf, свободный (дата обращения: 13.11.2024).

22. Горин А. Способы уменьшения электромагнитных помех // Электромагнитная совместимость в электронике. – 2021. – С. 1–4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://emc-e.ru/wp-content/uploads/04157.pdf, свободный (дата обращения: 13.11.2024).

23. Костелецкий В.П. Обзор гибридных фильтров для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных помех // Доклады ТУСУР. – 2022. – № 1 (25). – С. 37–47.

24. Гореев А. Защита от кондуктивных помех с помощью фильтров EPCOS // Силовая электроника. – 2016. – № 1. – С. 7–12.

25. Собко А.А. Обзор пассивных устройств подавления кондуктивных электромагнитных помех // Электронные средства и системы управления: матер. докладов междунар. науч.-практ. конф. – Томск: ТУСУР, 2018. – № 1–1. – С. 304–308.

26. Di Piazza M.C. EMI reduction in DC-fed electric drives by active common-mode compensator / M.C. Di Piazza, M. Luna, G. Vitale // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2014. – Vol. 56, No 5. – P. 1067–1076.

27. Никитин М. Компактные EMI-фильтры SynQor для гражданских и военных применений // Электронные компоненты. – 2011. – № 2. – С. 12–17.

28. Жданкин В. Модули фильтрации и защиты от перенапряжений для питающих сетей постоянного тока // Современная электроника. – 2014. – № 2. – С. 34–39.

29. MIL-STD-461F–2007. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rfimmunity.com/wp-content/uploads/2017/04/MIL-STD-461F.pdf, свободный (дата обращения: 14.11.2024).

30. Патент № 2 746 260 РФ, МПК H02J 3/01. Конденсаторная батарея-фильтр: № 2020133096: заявл. 08.10.20: опубл. 12.04.21 / Джус И.Н. – 4 с.

31. Патент № 193304 РФ, МПК H05B 37/02. Фильтр входной помехоподавляющий: № 2019108074: заявл. 21.03.19: опубл. 23.10.19 / Моргунов Д.Н., Машков С.В., Васильев С.И. – 1 с.

32. ГОСТ 30805.22–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Радиопомехи индустриальные. Нормы и методы измерений. – М.: Стандартинформ, 2014. – 64 с.

33. Патент № 2 741 069 РФ, МПК H02H 9/04. Индуктивно-емкостный фильтр: № 2020113962: заявл. 03.04.20: опубл. 22.01.21 / Борисенко Д.Н., Жохов А.А., Редькин Б.С. – 7 с.

34. Патент № 2 658 905 РФ, МПК H02M 1/12. Синфазный фильтр импульсного преобразователя: № 2017 119918: заявл. 07.06.17: опубл. 26.06.18 / Джус И.Н. – 5 с.

35. Патент № 202413 РФ, МПК H03H 7/00. Помехоподавляющий фильтр переменного тока в модульном исполнении: № 2020138741: заявл. 26.11.20: опубл. 17.02.21 / Лепеха Ю.П. – 6 с.

36. Патент № 202390 РФ, МПК H03H 7/00. Помехоподавляющий фильтр постоянного тока в модульном исполнении: № 2020138739: заявл. 26.11.20: опубл. 16.02.21 / Лепеха Ю.П. – 6 с.

37. Костелецкий В.П. Двухкаскадный экранированный модальный фильтр для работы в дифференциальном и синфазном режимах / В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий, А.М. Лакоза // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – № 4. – С. 127–133.

38. Gazizov T.R. New approach to EMC protection / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // The 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Munich, Germany, 2007. – P. 273–276.

39. Патент №2 749 558 РФ, МПК H02G 5/02. Способ изготовления линии электропередачи со спиральным поперечным сечением и устройство на его основе: № 2020 131977: заявл. 29.09.20: опубл. 15.06.21 / Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Николаев И.И., Демаков А.В., Дроздова А.А. – 17 с.

40. Патент № 194412 РФ, МПК H01B 11/10. Помехоподавляющий кабель: № 2019135718: заявл. 07.11.19: опубл. 11.12.19 / Баранов И.А., Петров С.Н. – 1 с.

41. Патент № 2822924 РФ, МПК H02G 5/06, H01R 4/58, H02B 1/20. Помехозащищенная силовая шина электропитания: № 2024103349: заявл. 12.02.2024: опубл. 16.07.2024 / Комнатнов М.Е., Дроздова А.А., Николаев И.И., Газизов Т.Р. – 14 с.

42. Krzikalla R. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses / R. Krzikalla, T. Weber, J.L. Ter Haseborg // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Istanbul, Turkey. May 11–16. – 2003. – Vol. 2. – P. 1313–1316.

43. Патент № 2817634 РФ, МПК H04B 15/02, H01P 1/04, H01P 11/00. Способ компоновки дифференциальной пары для цепей с модальным резервированием на основе зеркально-симметричной полосковой структуры: № 2023 125759: заявл. 09.10.2023: опубл. 17.04.2024 / Заболоцкий А.М., Власов С.В., Жечев Е.С. – 9 с.

44. Патент № 2823269 РФ, МПК H01P 3/08, H04B 15/02. Полосковая структура с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах: № 2024101988: заявл. 27.01.2024: опубл. 22.07.2024 / Костелецкий В.П., Лакоза А.М., Заболоцкий А.М., Нестеренко А.К. – 8 с.

45. Источник и классификация фильтров электромагнитных помех [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.emcdorexs.com/ru/source-and-classification-of-emi-filters.html, свободный (дата обращения: 15.11.2024).

46. Бутырина В.С. Актуальность применения пассивных фильтров в системе электроснабжения / В.С. Бутырина, П.А. Федосеева // Вестник науки. – 2022. – № 11 (56). – С. 288–292.

47. Подавление помех с помощью фильтров EMIFIL. Цифровая аппаратура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.platan.ru/docs/library/Murata_EMI.pdf, свободный (дата обращения: 12.11.2024).

48. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.

49. Недостатки простых EMI-фильтров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://russianelectronics.ru/files/60475/ek2012-06_42-45.pdf, свободный (дата обращения: 12.11.2024).

50. Дормидошина Д.А. Система управления надежностью на стадиях жизненного цикла электронной компонентной базы // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. – 2024. – № 15. – С. 36–40.

51. Маскираторы побочных электромагнитных излучений и наводок «Маис-М1», «Маис-М2» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rnt.ru/ru/production/detail.php?ID=21, свободный (дата обращения: 14.11.2024).

52. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с.

53. Стандарты электромагнитных помех [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://m.antpedia.com/standard/sp/ru/19999.html, свободный (дата обращения: 14.11.2024).

54. Stripline vs Microstrip Differences in Design and Signal Integrity [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pcbtok.com/stripline-vs-microstrip/, свободный (дата обращения: 4.11.2024).

55. Защита от помех в линиях связи. Практика проектирования и монтажа ИСБ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lib.secuteck.ru/articles2/inegr_sistemy/zashita-ot-pomeh-v-liniyah-svyazi, свободный (дата обращения: 4.11.2024).

56. Ивко А. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры как метод обеспечения электромагнитной совместимости // Силовая электроника. – 2015. – № 4. – С. 24–27.

57. Экранирующие корпуса для электронных устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/125325/, свободный (дата обращения: 4.11.2024).

Лакоза Александр Михайлович
Аспирант каф. сверхвысокочастотной
и квантовой радиотехники (СВЧиКР)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-0778-5037
Тел.: +7-962-781-10-18
Эл. почта: alexandrlakoza@mail.ru

Lakoza A.M.

Review of modern devices for filtering and protection against conductive electromagnetic interference in radio electronic equipment

The review and comparative analysis of modern devices used to filter and to suppress the electromagnetic conductive interference, and intended to protect modern radio electronic equipment (REE) are performed. The advantages and disadvantages of the considered devices and prototypes are briefly stated. The basic elements and peculiarities of application are specified, and the examples of experimental and practical realization are given.

Keywords: protection devices, differential mode, common mode, electromagnetic interference, conductive interference, electromagnetic compatibility.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-31-46

References

1. Zabolockij A.M., Gazizov T.R. *Electromagnetic Compatibility: Modal Technologies: Textbook*. TUSUR Publ.: Tomsk, 2018, 132 p. (in Russ.)

2. Gurina L.A. *Electromagnetic Disturbances and Methods of Protection against Them: Textbook*. Amur State University Publ.: Blagoveshchensk, 2014, 105 p. (in Russ.)

3. Kechiev L.N., Balyuk N.V. *Foreign Military Standards in the Field of EMC*. Gryphon: Moscow, 2014, 448 p. (in Russ.)

4. Kechiev L.N. *Shielding of Radio-electronic Equipment. Engineering Manual*. Gryphon: Moscow, 2019, 720 p. (in Russ.)

5. Ott H. W. Electromagnetic compatibility engineering. *John Wiley & Sons Inc., Hoboken,* 2009, pp. 843.

6. Kulikova L.V., Nikolskij O.K., Soshnikov A.A. *Fundamentals of Electromagnetic Compatibility: Textbook*. DirectMedia: Moscow, 2020 (in Russ.)

7. Abdulveleev I.R. *Electromagnetic Compatibility of Electrical Systems: Textbook.* Infra-Engineering: Moskva; Vologda, 2023 (in Russ.)

8. Stukalov S.B. *Electromagnetic Compatibility of Radio-electronic Systems: Textbook*. MIR: Voronezh, 2019 (in Russ.)

9. Fuchs E., Masoum M. Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives. *Academic Press/Elsevier*, 2023, pp. 1282.

10. GOST 61204-3:2000. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Low-voltage power supplies, DC output. Requirements and test methods. *Moscow, Standartinform Publishing*, 2014, 34 p.

11. Rohde & Schwarz; Conductive disturbances in DC-DC converters – modelling and measurement Available at: https://www.rohde-schwarz.com/cac/applications/-application-card_56279-1125376.html, free (Accessed: August 15, 2024).

12. GOST 24-2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Information technology equipment. Immunity to electromagnetic disturbances. Requirements and test methods. *Moscow, Standartinform Publising*, 2013, 40 p.

13. GOST 14-1-2015. Electromagnetic compatibility. Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus. Part 1. Emission. *M., Standartinform Publising*, 2016, 65 p.

14. Gazizov T.R. *Fundamentals of Electromagnetic Compatibility of Radio-electronic Means: Textbook.* TUSUR Publ.: Tomsk, 2022 (in Russ.)

15. Mainali K. and Oruganti R. Conducted EMI mitigation techniques for switch-mode power converters: A survey. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, pp. 2344–2356.

16. Narayanasamy B. and Luo F. A survey of active EMI filters for conducted EMI noise reduction in power electronic converters. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, pp. 2040–2049.

17. EMI filters Murata. Available at: https://kit-e.ru/emi-filtry-murata/, free (Accessed: November 15, 2024).

18. Interference Suppression with EMIFIL Filters. Application Guide. Available at: https://www.platan.ru/docs/ library/Murata_EMI_examples.pdf (Accessed: November 15, 2024).

19. EMC filters TDK-EPCOS. Available at: https://old.ferrite.ru/products/emc_components/, free (Accessed: November 14, 2024).

20. POWTECH Input and Output EMI Filters. Available at: https://olil.ru/product/vhodnye-i-vyhodnye-emi-filtry-powtech, free. (Accessed: November 15, 2024).

21. CW4L2 EMI Filters. Operation Manual Available at: https://darxton.ru/files/_misc/f1a/f1a3790d-cf5f-11eb-8e3d-000c29fafacd.pdf, free (Accessed: November 13, 2024).

22. Gorin, A. Methods for Reducing Electromagnetic Interference / A. Gorin // Collection «Electromagnetic Compatibility in Electronics». Available at: https://emc-e.ru/wp-content/uploads/04157.pdf, free (Accessed: November 13, 2024).

23. Kosteletsky V.P. *Obzor gibridnyh filtrov dlya zashchity radioelektronnyh sredstv ot konduktivnyh pomekh* [Review of hybrid filters for protecting radio-electronic equipment from conducted interference], *Proceedings of TUSUR University*, 2022, no. 1 (25). pp. 37–47 (in Russ.)

24. Goreev A. *Zashchita ot konduktivnyh pomekh s pomoshch'yu fil'trov EPCOS* [Protection against conducted interference using EPCOS filters]. *Silovaya Elektronika [Power Electronics]*, 2016, no. 1. pp. 7–12 (in Russ.)

25. Sobko A.A. *Obzor passivnyh ustrojstv podavleniya konduktivnyh elektromagnitnyh pomekh* [Review of passive devices for suppressing conductive electromagnetic interference]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Proceedings of International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems], 2018, no. 1–1. pp. 304–308 (in Russ.)

26. Di Piazza M. C., Luna M., Vitale G. EMI reduction in DC-fed electric drives by active common-mode compensator. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, pp. 1067–1076.

27. Nikitin M. *Kompaktnye EMI-filtry SynQor dlya grazhdanskih i voennyh primenenij* [Compact EMI-filters SynQor for civil and military applications]. *Elektronnye komponenty* [Electronic components], 2009, no. 2. pp. 12–17 (in Russ.)

28. Zhdankin V. *Moduli filtracii i zashchity ot perenapryazhenij dlya pitayushchih setej postoyannogo toka* [Modules of filtration and protection against over-voltages for DC supply networks]. *Sovremennaya Elektronika* [Modern Electronics], 2014, no. 2. pp. 34–39 (in Russ.)

29. MIL-STD-461F-2007. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. Available at: https://rfimmunity.com/wp-content/uploads/2017/04/MIL-STD-461F.pdf, free (Accessed: November 14, 2024).

30. Dzhus I.N. *Kondensatornaya batareya-filtr* [Capacitor battery-filter]. Patent RF, no. 2746260, 2021.

31. Morgunov D.N., Mashkov S.V., Vasilev S.I. *Filtr vhodnoj pomekhopodavlyayushchij* [Input noise suppression filter]. Patent RF, no. 193304, 2019.

32. GOST 30805.22-2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Information technology equipment. Radio disturbance. Limits and methods of measurements. *Moscow, Standartinform Publising*, 2014, 64 p.

33. Borisenko D.N., Zhohov A.A., Redkin B.S. *Induktivno-emkostnyj filtr* [Inductive-capacitive filter]. Patent RF, no. 2741069, 2021.

34. Dzhus I.N. *Sinfaznyj filtr impul'snogo preobrazovatelya* [Common mode filter of a pulse converter]. Patent RF, no. 2658905, 2018.

35. Lepekha YU.P. *Pomekhopodavlyayushchij filtr peremennogo toka v modulnom ispolnenii* [Interference-suppressing filter of alternating current in modular execution]. Patent RF, no. 202413, 2021.

36. Lepekha YU.P. *Pomekhopodav-lyayushchij filtr postoyannogo toka v modulnom ispolnenii* [nterference suppressing DC filter in modular design]. Patent RF, no. 202390, 2021.

37. Kosteleckij V.P., Zabolockij A.M., Lakoza A.M. *Dvuhkaskadnyj ekranirovannyj modal'nyj filtr dlya raboty v differencialnom i sinfaznom rezhimah* [Two-stage shielded modal filter for operation in differential and common modes]. *Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem (MES)* [Problems of development of advanced micro- and nanoelectronic systems (MNS)], 2021, no. 4. pp. 127–133 (in Russ.)

38. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection. *The 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 273–276.

39. Komnatnov M.E., Gazizov T.R., Nikolaev I.I., Demakov A.V., Drozdova A.A. *Sposob izgotovleniya linii elektroperedachi so spiralnym poperechnym secheniem i ustrojstvo na ego osnove* [Method of making a power line with spiral cross-section and a device based on it]. Patent RF, no. 2749558, 2021.

40. Baranov I.A., Petrov S.N. *Pomekhopodav-lyayushchij kabel* [Interference-suppressing cable]. Patent RF, no. 194412, 2019.

41. Komnatnov M.E., Drozdova A.A., Nikolaev I.I., Gazizov T.R. *Pomekhozashchishchennaya silovaya shina elektropitaniya* [Interference-protected power bus of electric power supply]. Patent RF, no. 2822924, 2024.

42. Krzikalla R., Weber T. and Ter Haseborg J.L. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Istanbul, Turkey, May 11–16, 2003, pp. 1313–1316.

43. Zabolockij A.M., Vlasov S.V., ZHechev E. *Sposob komponovki differencialnoj pary dlya cepej s modalnym rezervirovaniem na osnove zerkalno-simmetrichnoj poloskovoj struktury* [Method of differential pair layout for circuits with modal redundancy on the basis of a mirror-symmetric strip structure]. Patent RF, no. 2817634, 2024.

44. Kosteleckij V.P., Lakoza A.M., Zabolockij A.M., Nesterenko A. K. *Poloskovaya struktura s licevoj svyazyu, zashchishchayushchaya ot sverhkorotkih impulsov v sinfaznom i differencialnom rezhimah* [Face-coupled strip structure protecting against ultra-short pulses in common and differential modes]. Patent RF, no. 2823269, 2024.

45. Source and classification of EMI filters. Available at: https://www.emcdorexs.com/ru/source-and-classification-of-emi-filters.html, free (Accessed: November 15, 2024).

46. Butyrina V.S., Fedoseeva P.A. *Aktualnost primeneniya passivnyh filtrov v sisteme elektrosnabzheniya* [Relevance of the use of passive filters in the power supply system]. Vestnik nauki [Bulletin of Science], 2022, no. 11 (56), pp. 288–292 (in Russ.)

47. Noise suppression using EMIFIL filters. Digital equipment. Available at: https://www.platan.ru/docs/library/Murata_EMI.pdf, free (Accessed: November 12, 2024).

48. Kharlov N.N. *Electromagnetic Compatibility in Electric Power Engineering: Textbook*. TPU Publishing House: Tomsk, 2007, 207 p. (in Russ.)

49. Disadvantages of simple EMI filters. Available at: https://russianelectronics.ru/files/60475/ek2012-06_42-45.pdf, free (Accessed: November 12, 2024).

50. Dormidoshina D.A. *Sistema upravleniya nadezhnostyu na stadiyah zhiznennogo cikla elektronnoj komponentnoj bazy* [Reliability management system at the stages of the life cycle of the electronic component base]. *Radioelektronnaya otrasl: problemy i ih resheniya* [Radioelectronic industry: problems and their solutions], 2024, no. 15. pp. 36–40 (in Russ.)

51. Maskers of side electromagnetic radiation and interference «Mais-M1» «Mais-M2». Available at: https://www.rnt.ru/ru/production/detail.php?ID=21, free (Accessed: November 14, 2024).

52. Gazizov T.R. *Electromagnetic Compatibility and Safety of Electronic Equipment: Textbook*. TML-Press: Tomsk, 2007, 256 p. (in Russ.)

53. Electromagnetic Interference Standards. Available at: https://m.antpedia.com/standard/sp/ru/19999.html, free (Accessed: November 14, 2024).

54. Stripline vs Microstrip Differences in Design and Signal Integrity. Available at: https://www.pcbtok.com/ stripline-vs-microstrip, free (Accessed: December 5, 2024).

55. Zashhita ot pomeh v linijah svjazi. Praktika proektirovanija i montazha ISB [Protection against interference in communication lines. Practice of designing and installing ISB]. Available at: http://lib.secuteck.ru/articles2/inegr_sistemy/zashita-ot-pomeh-v-liniyah-svyazi, free (Accessed: December 5, 2024).

56. Ivko A. Jekranirovanie radiojelektronnoj apparatury kak metod obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti [Shielding of electronic equipment as a method of ensuring electromagnetic compatibility]. *Silovaya elektronika [Power electronics]*, 2015, no. 4. pp. 24–27 (in Russ.)

57. Jekranirujushhie korpusa dlja jelektronnyh ustrojstv [Shielding housings for electronic devices]. Available at: https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/125325, free (Accessed: December 5, 2024).

Alexandr M. Lakoza
Postgraduate student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering,
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0778-5037
Phone: +7-962-781-10-18
Email: alexandrlakoza@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 004.056

В.В. Баранов, А.А. Шелупанов

Методика и алгоритмы оценки деструктивного воздействия нарушителей на элементы распределенных информационных систем

Проведено обоснование актуальности разработки методики и алгоритмов оценки деструктивного воздействия нарушителей на элементы распределенных информационных систем. Дан анализ научных работ и исследований в данной области. Выявлены целевые функции простых компьютерных атак и определены объекты деструктивного воздействия (ДВ), на которые они направлены. Структурированы цели, задачи и этапы проведения комплексных компьютерных атак (ККА). Разработаны алгоритм и графовая объектно-ориентированная модель формирования сценариев ККА. Составлены онтологические структурно-функциональные модели (ОСФМ) комплектующих элементов распределенных информационных систем (РИС) на уровнях модели ЭМВОС, представленные как объекты (ДВ), разработана методика определения их уязвимостей и последствий ДВ. Разработана методика определения предпочтительности сценариев ККА и степени их критичности на основе цифровых карт безопасности, отражающих топологию и функциональные процессы элементов РИС, позволяющие оценивать возможность реализации угроз безопасности информации (УБИ) и их предпочтительные сценарии.
Ключевые слова: онтологическое моделирование, методика оценки деструктивного воздействия, уязвимости, сценарии, тактики, техники компьютерных атак, цифровые карты безопасности.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-49-60

Анализ проблем обеспечения требуемого уровня защищенности РИС показал необходимость разработки методики и алгоритмов оценки деструктивного воздействия различных категорий нарушителей на их элементы.

Применение эффективных методик и алгоритмов оценки деструктивного воздействия нарушителей на элементы РИС играет важную роль в раскрытии и упреждении замысла нарушителей, опережении их действий по реализации УБИ. Такие методики и алгоритмы позволяют, основываясь на имеющихся статистических базах данных, базах знаний, данных мониторинга, анализа и экспертной оценки событий ИБ, разрабатывать стратегии моделирования состояний защищенности РИС в условиях угроз ДВ и проводить их прогностическую оценку. Это дает возможность заблаговременно проводить оценку возможных рисков изменения уровня защищенности и применять наиболее рациональные меры защиты информации. На практике задача оценки событий ИБ осложняется вероятностным характером гипотез развития ситуаций, достаточно большим количеством альтернатив принятия по ним решений в условиях неполных данных и большой степенью неопределенности в характере действий нарушителя.

Научная ценность данного исследования заключается в том, что представленные модели, методики и алгоритмы являются универсальным инструментом, применимым для оценки защищенности РИС со структурой любой сложности. Для оценки деструктивного воздействия этапов ККА разработана методика на основе графовой модели, интегрированной с базой данных шаблонов компьютерных атак CAPEC™ [1], таксономиями тактик и техник и их проведения MITRE ATT & CK® [2], базами данных недостатков и уязвимостей CWE, CVE [3, 4] и системой оценки критичности уязвимостей CVSS-3.0 [5]. Разработан универсальный алгоритм, отражающий процесс формирования тактики реализации ККА. Такой подход позволяет создать достаточно полное множество сценариев простых компьютерных атак (ПКА), возможных относительно рассматриваемого объекта ДВ, отражаемых в цифровых картах безопасности (ЦКБ) элементов РИС.

Разработанные модели и методический аппарат вносит определенный вклад в развитие теории и методологии ИБ и является логическим продолжением проведенных ранее авторами исследований [6, 7].

Методы исследования

Основной задачей данного исследования является создание технологии оценки защищенности элементов РИС на основе разработанных моделей, методик и алгоритмов, а также средств и инструментов, необходимых для ее реализации. В ряде исследований были предложены различные варианты решения этой задачи.

В исследовании [8] предложены аналитические методы оценки уровня риска реализации УБИ в РИС, которые позволяют проводить анализ ситуации и принимать решения для текущей ее конфигурации. Эти методы основаны на количественной оценке элементов структуры РИС, применяемых мер защиты информации (МЗИ), результатов мониторинга интенсивности реализации УБИ и интенсивности активации механизмов их обнаружения и предотвращения. Недостатком предложенных методов является отсутствие возможности декомпозиции указанных процессов на уровнях РИС, ее структурных элементов (локальных сетей, центров обработки данных и др.), узлов (рабочих станций, коммутаторов и др.) и компонентов узлов.

В ходе исследования был проведен анализ общедоступных баз данных, включающих описание и классификацию общих шаблонов атак CAPEC™. Шаблоны, или сценарии атак, – это описания общих способов, приемов и последовательностей их применения, используемых нарушителями для деструктивного воздействия (ДВ) через уязвимости на элементы информационных систем.

Шаблоны атак проклассифицированы по признаку общих механизмов и (или) общих объектов проведения атак. Рассмотрены также и другие подходы к их классификации. Среди общих механизмов проведения атак выделено 9 групп. В каждой группе приведен перечень соответствующих данному механизму атак. Для каждой атаки приведено ее описание, предшествующие и последующие (при их наличии) атаки, а также объекты воздействия и виды воздействия. Каждый шаблон атаки содержит информацию о том, как разрабатываются и выполняются определенные этапы комплексной компьютерной атаки (ККА), а также рекомендации по способам их локализации.

В таксономиях MITRE ATT & CK® содержатся подробные описания 14 видов тактик и соответствующих им техник проведения компьютерных атак (КА). Каждой тактике присвоен ID, ее наименование отражает целевое назначение. Техники содержат приемы и способы достижения цели атаки. Техники реализуются через определенные объекты ДВ, имеющие уязвимости, которые программно связаны с определенными шаблонами атак CAPEC ™.

Недостатком моделей CAPEC™ и MITRE ATT & CK® является отсутствие системного представления модели и методик формирования ККА на основе шаблонов простых компьютерных атак (ПКА), критериев определения их предпочтительности.

УБИ реализуют процессы различной степени критичности по влиянию на конфиденциальность, целостность и доступность защищаемой информации и определяют степени критичности доступных им уязвимостей. Базы данных CWE, CVE отражают полный перечень известных уязвимостей и ошибок в программном и аппаратном обеспечении. Общая система оценки уязвимостей CVSS-3.0 позволяет определить их категории – высокий, средний и низкий и численные значения такой оценки. Недостатком является то, что в методике данной оценки отсутствует метрика критичности объекта, чья уязвимость подвергалась оценке, для безопасности РИС или ее элемента.

В [9] предложен проактивный метод анализа киберугроз и оценки рисков нарушения кибербезопасности критической информационной инфраструктуры, который включает этапы выявления киберугроз, моделирование сценариев нанесения ими ущерба, оценки рисков и ранжирование активов по степени их критичности. Данный метод позволяет выполнить оценку количества критически уязвимых активов, обосновать состав и вероятность реализации киберугроз, а также провести оценку рисков от их реализации. Применение данной технологии позволяет автоматизировать процесс анализа КА и оценки рисков ДВ.

В [10, 11] предложен оригинальный метод автоматизированного моделирования набора возможных атак на компоненты базовой архитектуры АСУ ТП на основе нечетких когнитивных карт. Он позволяет извлечь информацию о слабых местах инфраструктуры, наиболее опасных уязвимостях и потенциальных слабостях компонентов системы, выявить наиболее успешные сценарии реализации атак и оценить их последствия для предприятия. Исходными данными для построения когнитивных карт становятся экспертные оценки (граф атак), формализованные и систематизированные шаблоны из международных баз знаний, что существенно повышает обоснованность и полноту сценарного моделирования.

В результате анализа вектора кибератак эксперт может определить возможные сценарии реализации с учетом используемых уязвимостей, оценить уровень опасности реализации каждого сценария в отдельности и кибератаки в целом. Однако следует отметить, что предложенный метод не универсален. Он не позволяет разрабатывать масштабируемые структурно-функциональные модели элементов РИС, моделировать полный перечень сценариев ККА относительно данных элементов и формировать вектор атак применительно к объектам ДВ на системном, прикладном, аппаратном и пользовательском уровнях модели ФСТЭК России [12].

В ходе анализа существующих методов моделирования информационных систем, отражающих взаимное влияние их элементов, а также воздействий на них событий ИБ, был выбран рассмотренный в [13, 14] метод онтологий. Как модель онтология может быть представлена в виде графа, вершины которого – это объекты (концепты), а ребра – отношения между ними. В зависимости от целей и задач онтология может отражать совокупность однородных или разнородных подсистем, воздействующие на них внешние процессы и реализуемые ими внутренние процессы, а также их взаимные влияния. Важным преимуществом онтологий применительно к цели нашего исследования является возможность построения ОС-ФМ элементов РИС любой сложности. Эти модели наглядно отражают функциональные и информационные процессы между ними, а также процессы ДВ.

В ряде работ [15, 16] события ИБ деструктивного характера формализованно представлены в виде графовых моделей векторов атак, отражающих показатели их существенных свойств и точки (объекты) воздействия. Данный метод органически интегрируется с рассмотренным выше методом онтологического моделирования. Такая интеграция позволит определить объекты ДВ, их критичность, пути (маршруты), техники и тактику реализации сценария ККА, провести идентификацию и оценку рисков инцидентов, определить способы и точки нейтрализации УБИ и (или) уязвимостей объектов ДВ.

Для определения параметров ДВ применяется их вероятностная оценка. Численные значения данных параметров будут зависеть от параметров, других взаимоувязанных с ними событий ИБ. Например, вероятность реализации риска инцидента зависит от вероятности применения того или иного сценария УБИ, применяемых мер защиты информации и др. Такая вероятность называется условной, т.е. она для одного события наступает при условии, что другое событие (по подтверждённому или неподтверждённому доказательством утверждению) уже произошло.

Данный процесс реализует метод байесовских сетей, который применен в данном исследовании для формирования нейро-байесовских моделей (НБМ) элементов РИС [17, 18].

Для обучения НБМ необходима база данных оценки предпочтительности альтернативных сценариев событий ИБ. Чем объемней данная база и чем точнее определены правила предпочтительности, тем точнее будут результаты расчета вероятностей событий. Для этого в работе были исследованы методы многокритериальной оценки (MCDM) событий ИБ. Одним из перспективных направлений повышения верифицированности результатов экспертной оценки является разработка гибридных методов MCDM. Заслуживает внимания подход, предложенный в [19] и заключающийся в интеграции векторных, матричных и октавных методов оценки событий ИБ. Предложенный методический подход позволяет проводить детальную количественную и качественную оценку массивов исходных данных, ранжировать их по приоритетам, определять прямые и опосредованные связи и зависимости, структурировать формат для расчета весовых коэффициентов предпочтительности показателей, критериев и альтернатив. Ценность данного гибридного метода в возможности автоматизации расчетов, что компенсирует их сложность.

В научных работах [20, 21] предложен метод построения онтологических структурно-функциональных НБМ с привязкой их к моделям ЭМВОС. Данный тип моделей позволяет представить РИС в виде онтологической модели компонентов узлов ее элементов, размещенных на соответствующих уровнях модели ЭМВОС, и функциональных связей между ними. В зависимости от цели эти связи могут отображать как процессы функционирования РИС, так и процессы ДВ на данные компоненты элементов РИС. Для данных онтологий применим байесовский метод оценки совместных вероятностей априорных и апостериорных событий ИБ различного генеза, позволяющий в условиях неполных исходных данных повысить достоверность их оценки.

Рассмотренные методы с учетом устранения выявленных недостатков будут применены для построения цифровых копий или цифровых карт безопасности (ЦКБ) РИС и их элементов.

Под ЦКБ в работе понимается ОС-ФМ элемента структуры РИС, отражающая комплектующие его узлов на уровнях модели ЭМВОС, реализуемые ими функциональные процессы, типы ДВ на них, и сопряженная с ней информационно-расчетная система, позволяющая определить предпочтительные сценарии реализации УБИ и оценить их последствия [22].

Данные ЦКБ будут выступать средством проактивного моделирования сценариев реализации УБИ для конкретных исходных данных.

Результаты и обсуждение

По своей структуре КА делятся на простые и комплексные. Под ПКА в работе рассматриваются атаки, действие которых ограничено одной частной целью. В ходе анализа и обобщения, проводившихся в данной области исследований, существующих баз данных и знаний [1, 2] были выделены и классифицированы по целевой функции девять типов ПКА. Данные типы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Классификация типов ПКА по целевой функции

№	Наименование и цель атаки	Объекты ДВ
1	*2*	*3*
1	Фишинговая атака (ФА) – массовая рассылка сообщений с целью воздействия на пользователей для получения конфиденциальной информации	Пользователи РИС
2	Атака типа «Брутфорс» (БФ) – подбор пароля пользователя с целью получения легитимных прав в системе	Компоненты узлов сети, позволяющие провести операцию идентификации, аутентификации и авторизации субъектов
3	Атака типа «Человек посередине» (ЧпС) – подключение и прослушивание передаваемой информации для сбора данных в целях осуществления других типов атак	Компоненты узлов сети, позволяющие осуществить подключение и прослушивание передаваемой информации
4	Атака произвольным кодом (ПрК) – атака, направленная на эксплуатацию уязвимости в программном обеспечении посредством ввода машинного кода в целях осуществить вход, повышение привилегий и распространение в системе	Компоненты узлов сети, воздействие на которые машинным кодом позволяет атакам других типов осуществить доступ к объектам ДВ
5	«Криптографическая атака (КрА)» – атака, использующая уязвимости криптографических протоколов, позволяющая получить НСД к данным для входа, повышения привилегий и распространения в системе, дешифрования защищаемой информации	Компоненты узлов сети, имеющие криптографические протоколы и позволяющие получить НСД к данным для их дешифровки
6	Атака «Перехват сеанса (ПС)» – атака, осуществляющая вход в систему, подключение и прослушивание злоумышленником передаваемой информации	Компоненты узлов сети, которые могут быть использованы как точки входа в систему и средства получения информации
7	Спуффинг-атака (СпуА) – атака, заключающаяся в подмене легитимных узлов сети нелегитимными с целью обхода модели разграничения доступа и нарушения работы сети	Компоненты узлов сети, которые могут быть использованы для подмены адресов узлов сети на канальном и (или) сетевом уровне

Окончание табл. 1

1	2	3
8	8. Атака вредоносным кодом (ВрК) – применение преднамеренно разработанного машинного кода, который перехватывает, искажает, уничтожает и (или) ограничивает доступ к защищаемой информации	Компоненты узлов сети, которые могут быть использованы для нанесения ущерба защищаемой информации
9	Атака «Отказ в обслуживании» (DDoS) – атака, направленная на замедление или блокирование работы узла или в целом сети	Компоненты узлов сети, которые могут быть использованы для блокирования или ограничения доступа к защищаемой информации

Из целевых функций данных типов ПКА установлено, что одни из них обеспечивают проникновение, повышение привилегий и распространение в системе, а другие используют этот плацдарм непосредственно для нанесения ущерба защищаемой информации, нарушая ее конфиденциальность, целостность, доступность.

В целях моделирования данного процесса требуется определить, на какие объекты ДВ направлены данные типы ПКА. Для этого применен апробированный в [20, 21] метод представления различных элементов РИС в виде онтологических структурно-функциональных моделей (ОС-ФМ) на уровнях модели OSI/ISO. Компоненты узлов сети (роутеров, коммутаторов, серверов, рабочих станций) являются объектами, участвующими в обработке защищаемой информации, и в то же время являются объектами ДВ. Для них были разработаны соответствующие модели. На рис. 1 в качестве примера представлена ОС-ФМ объектов ДВ автоматизированного рабочего места (АРМ). Соединяя, в соответствии со структурой элемента РИС, модели входящих в его состав узлов, мы получим ОС-ФМ уровня элемента РИС. Таким образом, мы имеем универсальный инструмент построения ОС-ФМ элементов структуры РИС любой сложности.

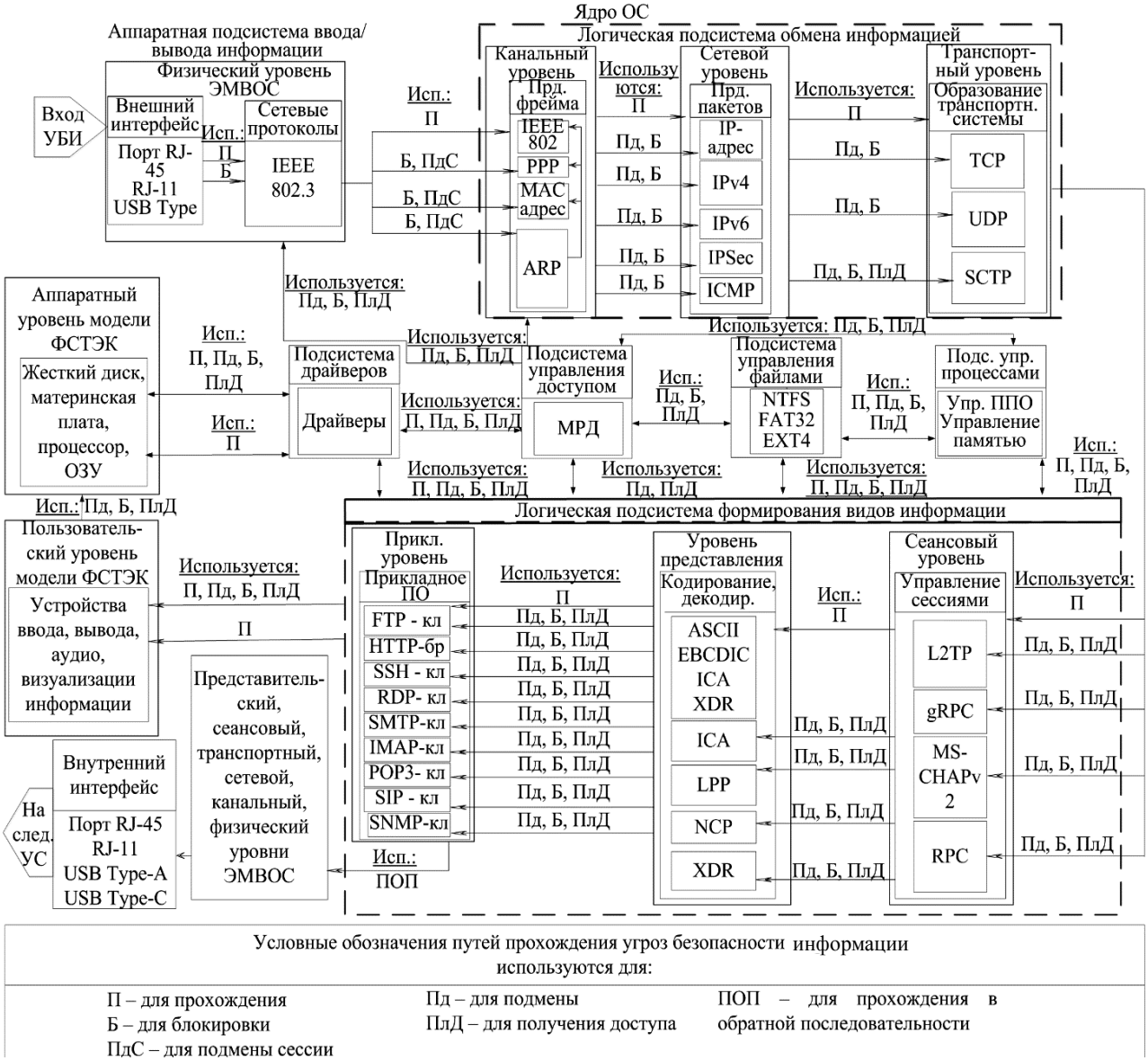


Рис. 1. ОС-ФМ объектов ДВ автоматизированного рабочего места

Анализ целевых функций ПКА и ОС-ФМ узлов элементов РИС позволил выделить объекты ДВ на уровнях моделей ЭМВОС и вид ущерба, причиняемого в ходе реализации различных типов ПКА. Фрагмент полученных результатов представлен в табл. 2.

Таблица 2

Объекты ДВ на уровнях моделей OSI/ISO и вид ущерба, причиняемого в ходе проведения различных типов ПКА (фрагмент)

Уровни моделей ЭМВОС/ФСТЭК	Объекты ДВ на уровнях моделей ЭМВОС/ФСТЭК	Вид ущерба		
		К	Ц	Д
2. Атака типа «Брутфорс» (БФ)				
Канальный уровень / Сетевой уровень	PPP	+	-	-
Сетевой уровень / Сетевой уровень	IPSec	+	-	-
Транспортный уровень / Сетевой уровень	SCTP	+	-	-
Сеансовый уровень / Системный уровень	L2TP, MS-CHAPv2, gRPC	+	-	-
Прикладной уровень / Программный уровень	HTTP, SSH, POP3, SIP, SNMP, SMTP, RDP, FTP	+	-	-
3. Атака типа «Человек посередине» (ЧпС)				
Физический уровень / Аппаратный уровень	IEEE 802	+	-	-
Канальный уровень / Сетевой уровень	IEEE 802, PPP, MAC-адрес, ARP	+	-	-
Сетевой уровень / Сетевой уровень	IP-адрес, IPv4, IPv6, IPSec, ICMP	+	-	-
Транспортный уровень / Сетевой уровень	TCP, UDP, SCTP	+	-	-
Сеансовый уровень / Системный уровень	RPC, gRPC, L2TP, MS-CHAPv2	+	-	-
Уровень представления / Системный уровень	ICA, LPP, NCP, XDR	+	-	-
Прикладной уровень / Программный уровень	FTP, HTTP, SSH, RDP, SMTP, IMAP, POP3, SIP, SNMP	+	-	-
……..				
7. Спуффинг-атака (СпуА)				
Канальный уровень / Сетевой уровень	MAC адрес, ARP, PPP	+	+	+
Сетевой уровень / Сетевой уровень	IP-адрес	+	+	+
Транспортный уровень / Сетевой уровень	TCP, SCTP	+	+	+
Прикладной уровень / Программный уровень	DNS, SMTP	+	+	+

Применение единичных ПКА не всегда достигают цели, поэтому применяются различные их последовательности, объединённые единым замыслом по достижению данной цели. Они представляют собой ККА. Модель ККА представлена на рис. 2. В ее структуре выделены три этапа: подготовительный, основной и завершающий.

Целью подготовительного этапа является получение необходимых данных для формирования структуры ККА. В этих целях осуществляется сбор необходимой информации из открытых источников, инструментарий для тестирования «видимости» структуры и комплектующих узлов информационной системы, криптографические алгоритмы, ботнеты и др. Собранный материал определяет возможный перечень первичных и последующих ПКА, их последовательность.

Основной этап ККА реализуется в ходе проведения последовательности ПКА, направленных на проникновение, закрепление, повышение привилегий, распространение в системе и нанесение ущерба защищаемой информации.

Этапы ККА реализуются последовательным, параллельным или смешанным методами применения техник, иначе – тактиками ПКА.

Целью заключительного этапа является скрытие (уничтожение) следов ККА – применяемых техник и тактик. Производится очистка протоколов, уничтожаются данные в реестрах.

Процесс формирования тактики реализации ККА отражен на рис. 3 в виде алгоритма. Он достаточно сложный.

Для реализации тактики ККА, используя данные, полученные в ходе подготовительного этапа, следует определить общий перечень объектов ДВ и выделить среди них доступные (имеющие уязвимости). Определить объекты ДВ для входа, легализации, повышения привилегий, путей распространения атаки до целевых объектов. При необходимости определить транзитный путь для перехода на другой узел сети. Составить перечень необходимых типов ПКА, определить последовательность и результат их применения. Затем следует составить перечень доступных для каждой ПКА техник ДВ, необходимого для их реализации инструментария и оптимизировать их по критерию минимизации ресурсов для их реализации. Таким образом, будет сформирована тактика ККА.

На рис. 4 отображена графовая модель формирования возможных вариантов тактик проведения ККА. В ее структуре выделены четыре сектора, соответствующие этапам ККА, и составлены последовательности из классифицированных в данной работе типов ПКА. Эти последовательности и определяют варианты тактик реализации ККА.

Данную модель в совокупности с алгоритмом и методиками можно рассматривать как методологию реализации жизненного цикла ККА от сбора данных по атакуемой системе до нанесения ущерба информации по нарушению ее конфиденциальности, целостности и доступности.

Модель также отражает базу данных возможных сценариев ККА и представляет интерес как инструмент формирования онтологических векторов развития событий ИБ деструктивного характера. Каждый вектор начинается с определенного типа ПКА, которому достаточно для реализации полученной разведывательной информации. Его метрики будут зависеть от того, насколько очередная ПКА продвинется к целевому объекту ДВ.



Рис. 2. Модель комплексной компьютерной атаки

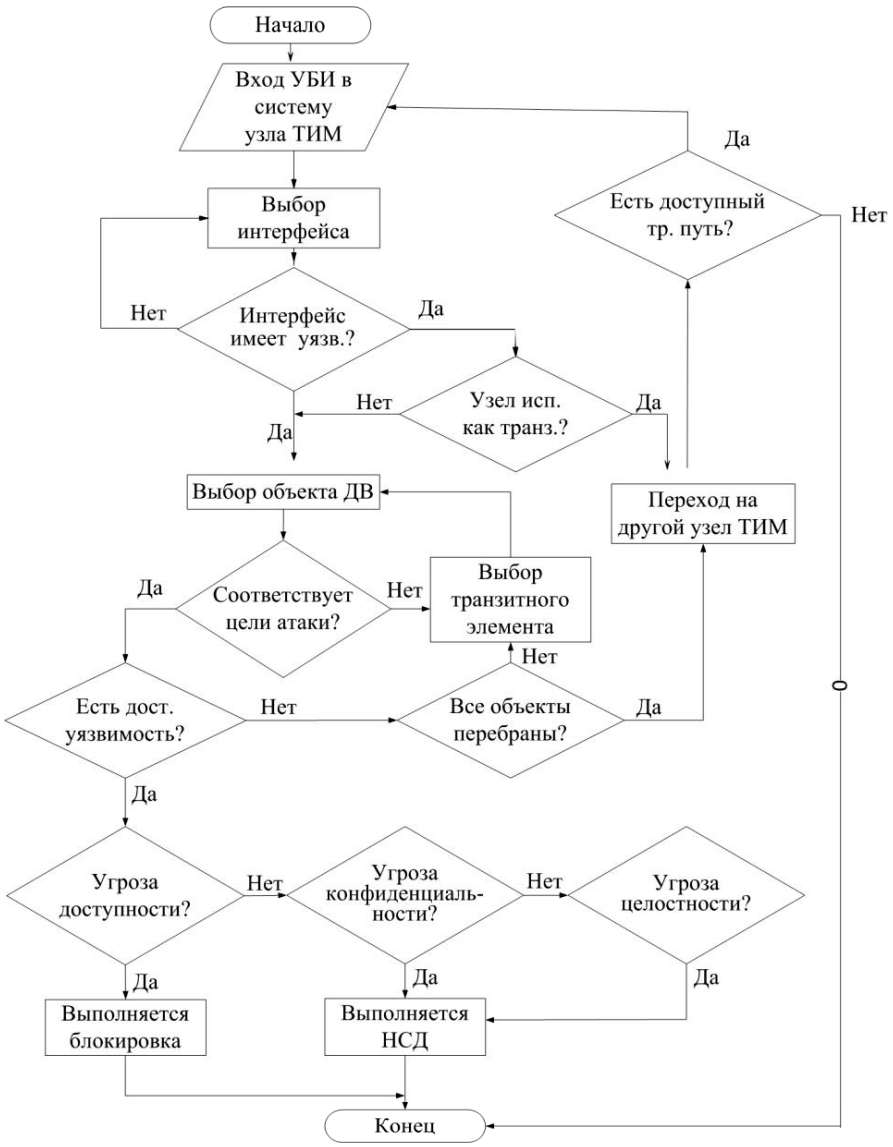
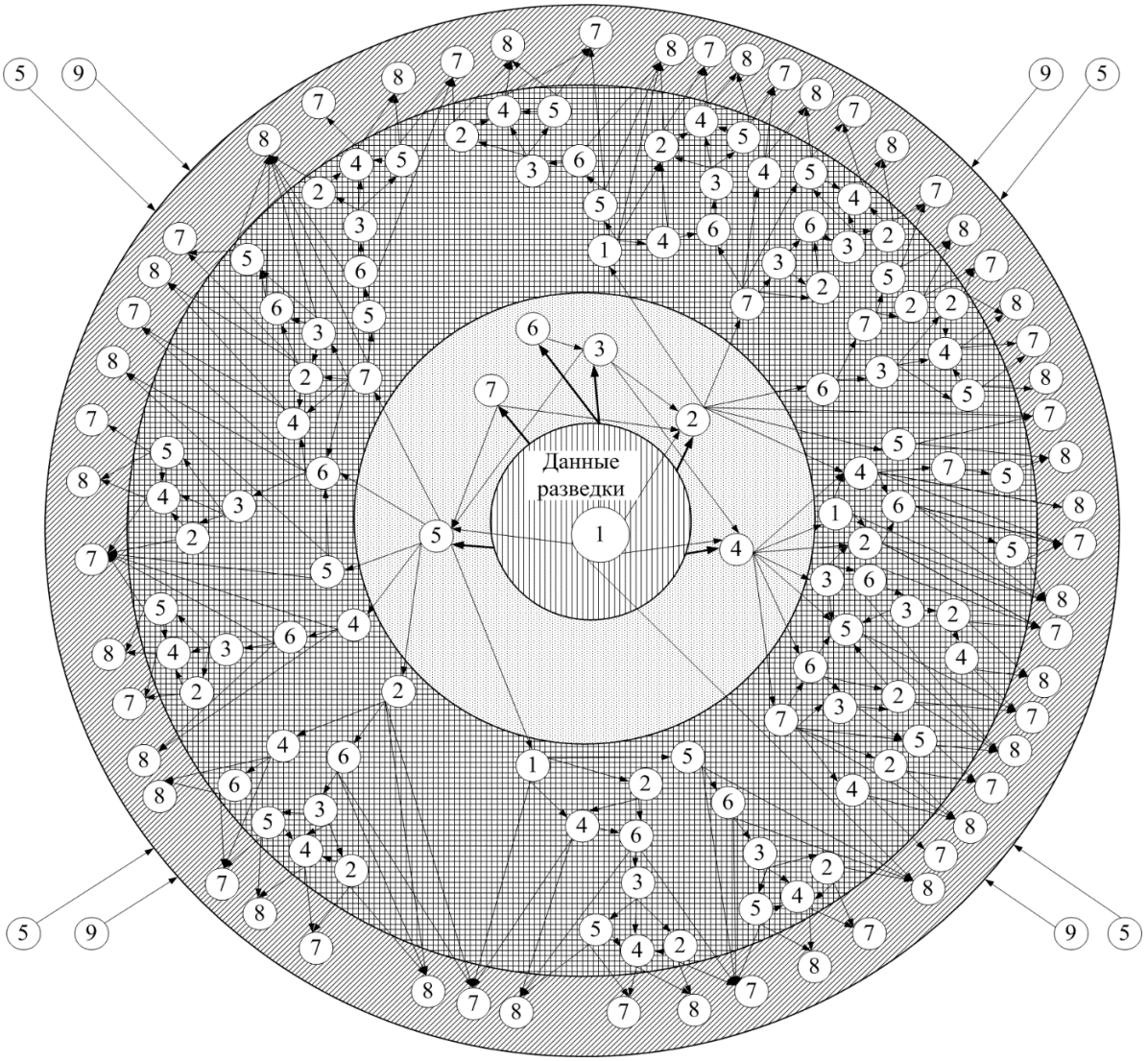


Рис. 3. Алгоритм процесса формирования тактики реализации ККА

На основе рассматриваемой графовой модели и ОС-ФМ объектов ДВ узлов сети и коммутационного оборудования разработаны цифровые карты безопасности (ЦКБ) элементов РИС. На рис. 5 представлен пример реализации ЦКБ АРМ. Каждая ЦКБ имеет одну, или несколько точек входа, через которые УБИ проникает в систему, и одну, или несколько точек выхода, через которые УБИ при необходимости переходит на другой узел сети.



Этапы комплексной атаки:

Подготовительный этап

- Сбор данных по атакуемым объектам ДВ

Основной этап

- Проникновение, легализация

- Распространение, повышение привелегий

- Деструктивное воздействие

Условные обозначения элементов комплексных атак:

1 – Фишинговая атака (ФА)

2 – Атака типа «Брутфорс» (БФ)

3 – Атака типа «Человек посередине» (ЧпС)

4 – Атака произвольным кодом (ПрК)

5 – Криптографическая атака (КрА)

6 – Атака «Перехват сеанса» (ПС)

7 – Спуффинг-атака (СпуА)

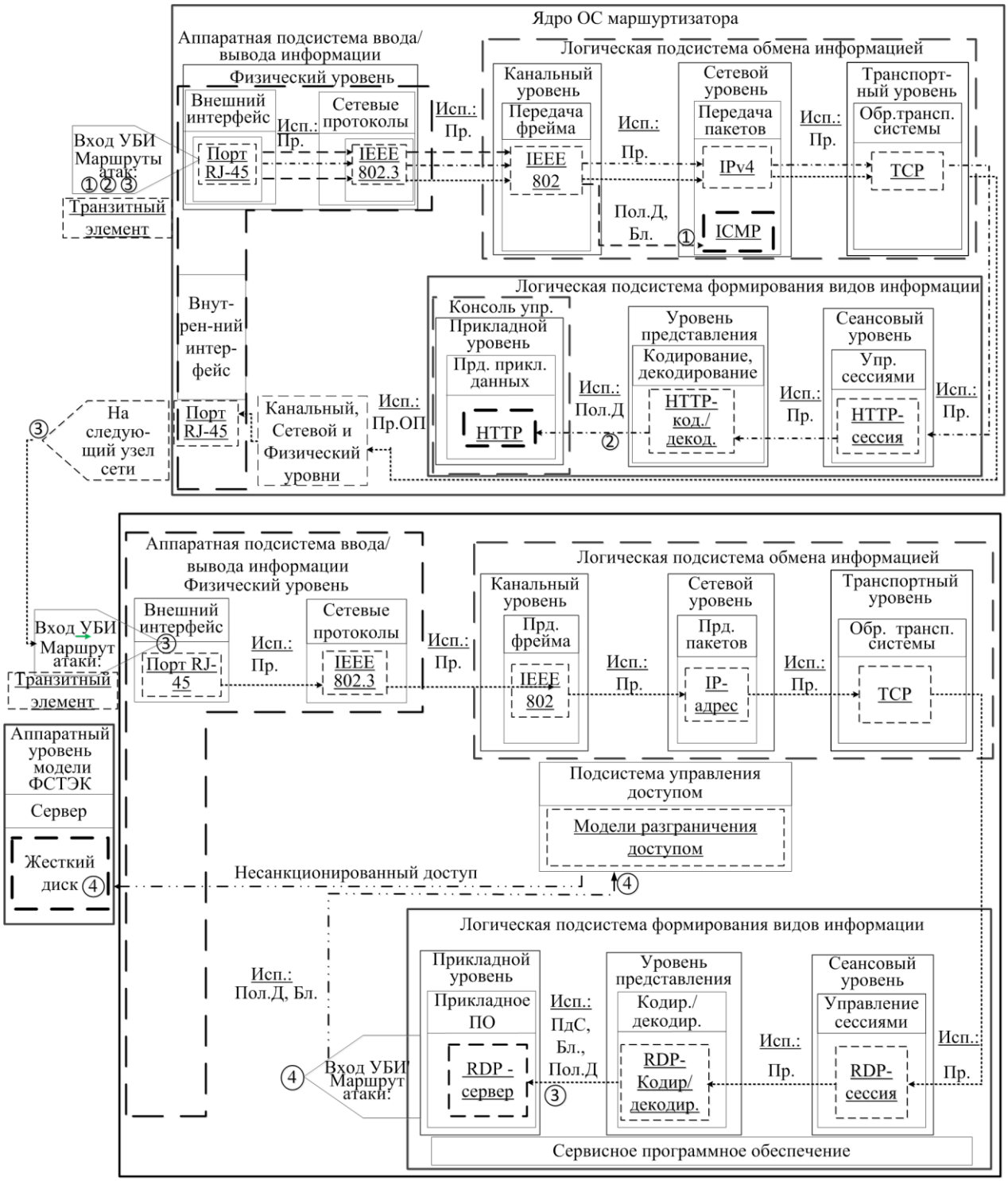
8 – Атака вредоносным кодом (ВрК)

9 – Атака «Отказ в обслуживании» (DDoS)

Рис. 4. Графовая модель формирования тактик ККА

Имея структуру элементов РИС и применяя ЦКБ входящих в ее состав узлов сети, появляется возможность составить ЦКБ РИС.

Для обеспечения работы ЦКБ разработан ее информационно-расчетный модуль (ИРМ). Пример его работы представлен на рис. 6.



Наименование типов атак:			
① - Сбор и анализ информации (CWE-200)	② - Атака произвольным кодом (CWE-120 с использованием уязвимости CVE-2022-4498)	③ - Атака произвольным кодом (CWE-94 с использованием уязвимости CVE-2012-0002)	④ - Атака вредоносным кодом (CWE-269 с использованием уязвимости CVE-2021-41379)
Условные обозначения			
Пр. – для прохождения Бл. – для блокировки	ПдТ – для подмены таблицы MAC адресов Пол. Д – для получения доступа	Пр.ОП – для прохождения уровней в обратной последовательности	

Рис. 5. Пример отображения векторов ККА на цифровой карте безопасности АРМ

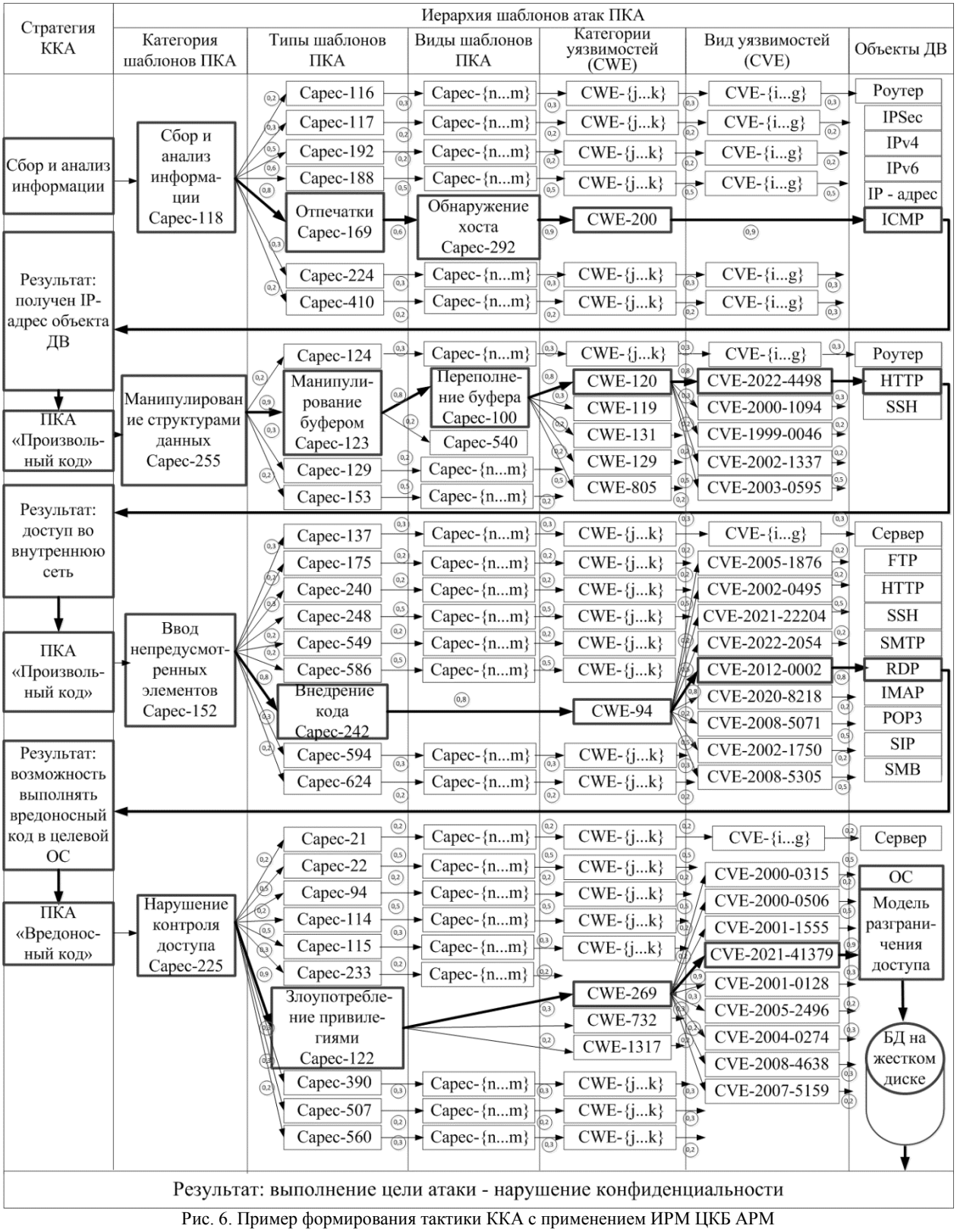


Рис. 6. Пример формирования тактики ККА с применением ИРМ ЦКБ АРМ

Разработанные в ходе исследования ОС-ФМ узлов элементов РИС были интегрированы с базами данных и знаний CAPEC™, MITRE ATT & CK®, CWE, CVE и CVSS, а также с НБМ. Комплектующие данных узлов (интерфейсы, протоколы, программное обеспечение, аппаратная архитектура), размещенные на уровнях модели ЭМВОС, рассматриваются как объекты, обеспечивающие функционирование элемента РИС, и как объекты ДВ. При помощи баз CWE, CVE и CVSS определяются их уязвимости и их критичность. Воздействующие на данные объекты ДВ ПКА привязаны к базам CAPEC™, MITRE ATT & CK®, а также к разработанной в исследовании графовой модели формиро-

вания тактик ККА (см. рис.4). Для шаблонов атак CAPEC™, тактик и техник их реализации MITRE ATT & CK® из баз CWE, CVE определяются доступные уязвимости и ошибки в ПО и аппаратной части. По разработанным в исследовании ЦКБ узлов сети – объектов атаки (см. рис. 5) определяется путь прохождения ККА на каждом ее этапе. Для этого выделяются целевые объекты ДВ ПКА. С помощью НБМ рассчитываются вероятности выбора нарушителем того или иного сценария ПКА по критерию степени достижения цели при минимизации затрат. Для каждого объекта ДВ, выбранного в качестве целевого, с применением графовой модели формируется перечень возможных тактик ККА. Для каждой ПКА, входящей в рассматриваемую последовательность (тактику) из CAPEC™ и MITRE ATT & CK®, составляется выборка шаблонов и техник ее реализации.

Для обучения НБМ применяется предложенный в исследовании [17, 18] алгоритм обучения искусственного интеллекта семейства AutoAI. Выбор данного алгоритма определен тем, что он позволяет проводить количественный «причинно-следственный анализ» на основе синтезированных обучающих данных о событиях ИБ, которые уже произошли (априорных событиях).

Далее производится оценка статистических взаимосвязей между априорными и апостериорными событиями ИБ, определяются их взаимные связи влияния, а также проводится прогностическая оценка априорных и апостериорных рисков потерь от событий ИБ деструктивного характера. Данная прогностическая оценка в исследовании основана на выборе предпочтительных техник реализации ПКА – апостериорных деструктивных воздействий, рассматриваемых как альтернативы выбора для складывающейся ситуации. Данные альтернативы были получены из баз данных CAPEC ™ и MITRE ATT & CK® и проранжированы с применением методики гибридной многокритериальной оценки [19].

Применение НБМ позволяет произвести расчет вероятностей выбора сценариев ККА, а также вероятности выбора конкретных уязвимостей для реализации определенных тактик и техник ПКА.

Заключение

Представленные в работе методика и алгоритмы оценки деструктивного воздействия нарушителей на элементы РИС являются очередным шагом в развитии теории и практики оценки защищенности информации.

Для моделирования ЦКБ применен метод, заключающийся в интеграции ОС-ФМ объектов ДВ элементов РИС, определяемых на уровнях модели ЭМВОС с нейро-байесовскими моделями оценки совместных вероятностей этих событий ИБ [20, 21]. Разработанные онтологические модели ДВ на объекты элементов РИС в совокупности с интегрированными с ними базами данных шаблонов компьютерных атак CAPEC® [1] и таксономиями тактик и техник их проведения MITRE ATT & CK® [2] позволяют определить возможные векторы и сценарии ККА, а применение системы оценки критичности уязвимостей CVSS-3.0 совместно с НБМ обеспечивает вероятностную оценку их предпочтительности.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности их применения в работе органов управления ИБ при разработке новых РИС, а также при проведении мониторинга и аудита безопасности существующих РИС. Применение разработанных ЦКБ элементов РИС существенно снижает время составления модели УБИ и обеспечивает высокие показатели достоверности принятых решений при оценке защищенности РИС [22, 23].

Литература

1. CAPEC (Common Attack Pattern Enumeration and Classification) – стандарт описания классов атак и их иерархических отношений, каталог известных кибератак [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://capec.mitre.org, свободный (дата обращения: 12.08.2024).

2. MITRE ATT&CK Matrix – формальное описание техник и тактик реализации кибератак [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://atac.mitre.org, свободный (дата обращения: 12.08.2024).

3. Перечисление общих недостатков. Разработанный сообществом список слабых мест программного и аппаратного обеспечения, которые могут стать уязвимостями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cwe.mitre.org/data/definitions/ 1194. html, свободный (дата обращения: 12.08.2024).

4. База данных общеизвестных уязвимостей информационной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cve.mitre.org//, свободный (дата обращения: 10.09.2024).

5. Общая система оценки уязвимостей (CVSS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.first.org/cvss/v3.0/specification-document for CVSS version 3.0, свободный (дата обращения: 24.08.2024).

6. Baranov V.V. Cognitive model for assessing the security of information systems for various purposes / V.V. Baranov, A.A. Shelupanov. – Symmetry. – 2022. – Vol. 14, No. 12. – P. 2631.

7. Баранов В.В. Методика и алгоритмы расчета защищенности элементов распределенных информационных систем в условиях деструктивного воздействия / В.В. Баранов, А.А. Шелупанов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 88–100.

8. Ху З. Аналитическая оценка уровня безопасности распределенных и масштабируемых компьютерных систем / З. Ху, В. Мухин, Я. Корнага и др. // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – 2016. – № 12. – Режим доступа: https://doi.org/10.5815/ijisa.2016.12.07, свободный (дата обращения: 08.09.2024).

9. Figueira P. Improving information security risk analysis by including threat-occurrence predictive models / P. Figueira, K. Bravo-Lopez, D.L. Lopez-Rivas // Computers and Security. – 2020. – № 88 (101609). DOI: 10.1016/j.cose.2019.101609.

10. Васильев В.И. Методика оценки актуальных угроз и уязвимостей на основе технологий когнитивного моделирования и Text Mining / В.И. Васильев, А.М. Вульфин, А.Д. Кириллова, Н.В. Кучкарова // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 3. – С. 110–133.

11. Массель Л. Интеллектуальные инструменты поддержки для принятия стратегических решений по разви-

тию интеллектуальных сетей / Л. Массель, А. Массель. – Веб-сайт конференций E3S. – 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186902009, свободный (дата обращения: 08.09 2024).

12. Зикратов И.А. Оценка информационной безопасности в облачных вычислениях на основе байесовского подхода / И.А. Зикратов, С.В. Одегов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 121–126.

13. Баранов В.В. Комплексная модель функционирования распределенных информационных систем в условиях деструктивного воздействия // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2022. – № 5. – С. 51–67.

14. Скворцов Н.А. Вопросы согласования разнородных онтологических моделей и онтологических контекстов. Онтологическое моделирование / Матер. семинара / под ред. Л.А. Калиниченко. – М.: ИПИ РАН. – 2008. – С. 149–166.

15. Абрамов Е.С. Применение графов атак для моделирования вредоносных сетевых воздействий / Е.С. Абрамов, А.В. Андреев, Д. Мордвин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – Т. 126, № 1. – С. 165–174.

16. Singhal A. Security risk analysis of corporate networks using probabilistic attack graphs. Network security indicators. – Cham, 2017. – P. 53–73.

17. Radanliev P. Improving the cybersecurity of the healthcare system with the help of self-optimizing and self-adapting artificial intelligence. – Part 2 / P. Radanliev, D. De Ruhr // Healthcare technology. – 2022. – Vol. 12. – P. 923–929 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.1007/s12553-022-00691-6, свободный (дата обращения: 12.09.2024).

18. Jaxen F. Bayesian networks and decision-making graphs. – M.: Sprinnger, 2001. – P. 54–120.

19. PROMETHE-SAPEVO-M1 hybrid modeling proposal: Multi-criteria evaluation of unmanned aerial vehicles for use in naval warfare / M.L. Moreira, K.F.S. Gomez, M. dos Santos, M.S. dos Carmo J.V.G.A. Araujo // Proc. Int. Joint Conference on Industrial Engineering and Operations Management. – 2020. – Vol. 337. – P. 381–393. DOI: 10.1007/978-3-030-56920-4_31.

20. Herzog A. Ontology of Information Security. International Journal of Information Security and Confidentiality. – 2007. – Vol. 1 (4). – P. 1–23.

21. Баранов В.В. Совершенствование моделей и методов оценки защищенности элементов распределенных информационных систем / В.В. Баранов, И.Н. Цыгулев // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационные технологии в Вооруженных Силах Российской Федерации»: сборник III Всерос. науч.-техн. конф. – Анапа, 2024. – С. 194–197.

22. Баранов В.В. Разработка цифровых карт безопасности элементов распределенных информационных систем / В.В. Баранов, А.П. Корчагина, А.А. Шелупанов // Информационная безопасность цифровой экономики: матер. XIX науч.-практ. конф. (в рамках X Пленума регион. отд. Федерального учеб.-метод. объединения в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 10.00.00 «Информационная безопасность» по Сибирскому и Дальневосточному федеральным округам (СибРОУМО)). – Новосибирск, 2023. – С. 11–23.

23. Лабутин Н.Г. Моделирование действий специалиста при оценке угроз безопасности информации в информационных системах и сетях в соответствии с новой методикой ФСТЭК России / Н.Г. Лабутин, П.В. Костин // Труды НГТУ им. Р. Алексеева. – 2022. – № 3 (138). – С. 22–31.

Баранов Владимир Витальевич
Канд. воен. наук, доцент, зав. каф. информационной безопасности Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова
Просвещения ул., 132, Новочеркасск, Россия, 346428
Тел.: +7-928-100-05-98
Эл. почта: kaf-ib@npi-tu.ru

Шелупанов Александр Александрович
Д-р техн. наук, проф., президент
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-813-929-40-80
Эл. почта: saa@tusur.ru.

Baranov V.V., Shelupanov A. A

Methods and algorithms to assess the destructive impact of violators on elements of distributed information systems

The paper substantiates the relevance of the development of methods and algorithms to assess the destructive impact of violators on elements of distributed information systems. The analysis of scientific works and research in this field is carried out. The target functions of simple computer attacks have been identified and the objects of destructive influence (DI) to which they are directed have been identified. The goals, objectives and stages of complex computer attacks (CCAs) are structured. An algorithm and a graph object-oriented model for the formation of CCAs scenarios have been developed. Ontological structural and functional models (OS-FM) of components of distributed information systems (DIS) at the levels of the OSI\ISO model, represented as objects of destructive influence (DI), have been compiled, and a methodology to determine their vulnerabilities and consequences of destructive influence has been developed. A methodology has been developed to determine the preference of CCAs scenarios and the degree of their criticality based on digital security maps reflecting the topology and functional processes of the DIS elements, allowing to assess the possibility of information security threats and their preferred scenarios.

Keywords: ontological modeling, methods for assessing destructive effects, vulnerabilities, scenarios, tactics, techniques of computer attacks, digital security maps.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-49-60

References

1. CAPEC (Common Attack Pattern Enumeration and Classification) is a standard for describing classes of attacks and their hierarchical relationships, a catalog of known cyber-attacks. Available at: https://capec.mitre.org, free, (Accessed: August 12, 2024) (in Russ.)

2. MITRE ATT & CK Matrix-a formal description of techniques and tactics for implementing cyber-attacks. Available at: https://atac.mitre.org, free (Accessed: August 12, 2024) (in Russ.)

3. List of common disadvantages. A list of types of software and hardware vulnerabilities developed by the community. Available at: https:// cwe.mitre.org/data/ definitions/1194.html, free (Accessed: August 12, 2024) (in Russ.)

4. Common vulnerabilities and risks. Available at: https://cve.mitre.org, free (Accessed: September 10, 2024) (in Russ.)

5. The General Vulnerability Assessment System (CVSS). Available at: https://www.first.org/cvss/v3.0/specification-document for CVSS version 3.0, free (Accessed: August 24, 2024) (in Russ.)

6. Baranov V.V., Shelupanov A.A. Cognitive model for assessing the security of information systems for various purposes. *Symmetry*, 2022, vol. 14, no. 12, pp. 2631.

7. Baranov V.V., Shelupanov A.A. Methods and algorithms for calculating the security of elements of distributed information systems in conditions of destructive influence. *Proceedings of TUSUR University.* 2022, vol. 25, no. 4, pp. 88–100.

8. Hu Z, Mukhin V., Kornaga [et al.] Analytical assessment of the security level of distributed and scalable computer systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2016, no. 12. DOI: https://doi.org/10.5815/ijisa.2016.12.07 (Accessed: September 08, 2024).

9. Figueira P., Bravo-Lopez K., Lopez-Rivas D.L. Improving information security risk analysis by including threat-occurrence predictive models. *Computers and Security Volume*. 2020. No 88 (101609). DOI: https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101609 (Accessed: July 30, 2024).

10. Vasiliev V.I., Vulfin A.M., Kirillova A.D., Kuchkarova N.V. Methodology for assessing current threats and vulnerabilities based on cognitive modeling and Text Mining technologies. *Management, Communication and Security Systems*, 2021, no. 3, pp. 110–133.

11. Massel L., Massel A. Intelligent support tools for making strategic decisions on the development of intelligent networks, *E3S Web of Conferences* 2018. Access mode: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186902009, free (Accessed: September 08, 2024) (in Russ.)

12. Zikratov I.A., Odegov S.V. Assessment of information security in cloud computing based on a Bayesian approach. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 4 (80), pp. 121–126.

13. Baranov V.V. Complex model of functioning of distributed information systems in conditions of destructive influence. *Electronic Network Polythematic Journal «Scientific Works of the Kuban State Technological University»*, 2022, no. 5. pp. 51–67.

14. Skvortsov N.A. Issues of coordination of dif-ferent ontological models and ontological contexts. Ontological modeling. *Edited by L.A. Kalinichenko: Seminar proceedings. M.: IPI RAS*. 2008. pp. 149–166 (in Russ.)

15. Abramov E.S., Andreev A.V., Mordvin D. Application of attack graphs to simulate malicious network impacts. *Proceedings of the Southern Federal University. Technical Sciences*. 2012, vol. 126, no. 1, pp. 165–174.

16. Singhal A. Security risk analysis of corporate networks using probabilistic attack graphs. *Network Security Indicators.* Cham, 2017, pp. 53–73.

17. Radanliev P., De Ruhr D. Improving the cybersecurity of the healthcare system with the help of self-optimizing and self–adapting artificial intelligence. Part 2. *Healthcare Technology*, 2022, vol. 12, pp. 923–929. Available at: https://doi.org/10.1007/s12553-022-00691-6, free (Accessed: September 12, 2024).

18. Jaxen F. Bayesian networks and decision-making graphs. M.: *Springer,* 2001, pp. 54–120.

19. Moreira M.L., Gomez K.F.S., dos Santos M., dos Carmo M.S., Araujo J.V.G.A. PROMETHE-SAPEVO-M1 hybrid modeling proposal: Multi-criteria evaluation of unmanned aerial vehicles for use in naval warfare, *Proceedings of the International Joint Conference in Industrial Engineering and Operations Management,* 2020, vol. 337, pp. 381–393. DOI: 10.1007/978-3-030-56920-4-31.

20. Herzog A. Ontology of Information Security. *International Journal of Information Security and Confidentiality*. 2007, vol. 1 (4). pp. 1–23.

21. Baranov V.V., Tsygulev I.N. Improvement of models and methods for assessing the security of elements of distributed information systems. The state and prospects of development of modern science in the field of Information technology in the Armed Forces of the Russian Federation. *The Third All-Russian Scientific and Technological Conference «Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control»*. Anapa, 2024, pp. 194–197.

22. Baranov V.V., Korchagina A.P., Shelupanov A.A. Development of digital security maps of elements of distributed information systems. *Information Security of the Digital Economy. Proceedings of the XIX Scientific and Practical Conference* (under the Xth Plenum of the regional branch of the Federal Educational and Methodological Association in the higher education system for the major 10.00.00 «Information security» in the Siberian and Far Eastern Federal Districts). Novosibirsk, 2023, pp. 11–23.

23. Labutin N.G., Kostin P.V. Modeling the actions of a specialist in assessing threats to information security in information systems and networks in accordance with the new methodology of the FSTEC of Russia. *Transactions of NNSTU named after R.E. Alekseev.* 2022, no. 3 (138). pp. 22–31.

Vladimir V. Baranov
Candidate of Sciences in Warfare, Associate Professor,
Head of the Department of Information Security,
South Russian State Polytechnic University (NPI)
named after M.I. Platov
132, Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Russia, 346428
Phone: +7-928-100-05-98
Email: kaf-ib@npi-tu.ru

Alexander A. Shelupanov
Doctor of Sciences in Engineering, Professor,
President of Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-813-929-40-80
Email: saa@tusur.ru

УДК 004.056:519.1

О.С. Авсентьев, Э.А. Томилова

Модели адаптивного управления защитой информации в процессе создания государственной информационной системы

Рассмотрены проблемные вопросы разработки моделей адаптивного управления защитой информации в государственной информационной системе в процессе создания системы ее защиты, позволяющих учитывать изменения форм представления защищаемой информации, совокупность условий динамики ее обработки и факторов, создающих опасность реализации угроз утечки по техническим каналам. Разработаны описательные модели исследуемых процессов. Обоснована возможность учета указанных изменений и условий на основе системы адаптивного управления защитой информации, создаваемой по централизованному принципу и обеспечивающей управление в двух уровнях путем усиления мер защиты в соответствии с изменениями состава объекта защиты, внутренних и внешних факторов, характеризующих динамику функционирования такой системы, а также направлений решения проблемных вопросов оценки ее эффективности. Для расчета показателей оценки эффективности управления защитой информации на этапах создания информационной системы в защищенном исполнении, учитывающих фактор времени и различные логические условия управления защитой, предложено применение аппарата составных сетей Петри–Маркова. Разработаны блок-схемы циклов управления для двух уровней, которые рассматриваются в качестве основы для формирования графов составных сетей Петри–Маркова.

Ключевые слова: информационная система в защищенном исполнении, система адаптивного управления защитой информации, угроза утечки информации, условия и факторы, эффективность управления защитой информации.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-61-73

Защита информации (ЗИ), не содержащей сведений, составляющих государственную тайну, является составной частью работ по созданию и эксплуатации информационной системы в защищенном исполнении (ИСЗИ), создаваемой для обеспечения деятельности какой-либо организации государственного сектора (далее – организации), и должна обеспечиваться на всех стадиях (этапах) ее создания, в ходе эксплуатации и вывода из эксплуатации путем принятия мер защиты, направленных на блокирование угроз безопасности информации (УБИ) [1]. При этом если на этапах эксплуатации и вывода из эксплуатации защита осуществляется на основе сформированной и аттестованной системы ЗИ (СЗИ) в помещениях, оборудованных в соответствии с требованиями к защищаемым помещениям (ЗП), то на предшествующих этапах такая СЗИ еще не сформирована и возникает ряд проблемных вопросов, связанных с выбором мер защиты в условиях изменений состава объекта защиты и динамики реализации УБИ, обрабатываемой при выполнении работ на каждом из этих этапов. Однако в [1, 2] в явном виде разделение процесса создания ИСЗИ на этапы не приведено, перечислены лишь мероприятия, проводимые в интересах ее создания.

В [3] такое разделение приведено, однако при выполнении работ в рамках каждого из этапов не предусмотрены меры по защите информации. В связи с указанными обстоятельствами на этапах, предшествующих эксплуатации ИСЗИ, не представляется возможным корректное определение информации, обрабатываемой при выполнении работ на различных этапах, как объекта защиты. Кроме того, часть такого рода работ выполняется сотрудниками (работниками) организации, как представителями заказчика [2, 3], во-первых, часто не имеющими соответствующей квалификации, во-вторых, обрабатывающими информацию на каждом из этапов в помещениях, как правило, не оборудованных в соответствии с требованиями к ЗП. Это обусловливает трудности по разработке модели УБИ, учитывающей изменения видов обрабатываемой информации, материальных носителей, состава используемого оборудования и динамику реализации информационных процессов по ее обработке.

Следует отметить, что в качестве негативного последствия реализации УБИ в процессе создания ИСЗИ рассматривается утечка информации, обрабатываемой на каждом из этапов [4]. При этом получение доступа к содержанию перехваченной информации может использоваться нарушителем для реализации УБИ, обрабатываемой на этапе эксплуатации ИСЗИ, например, путем преодоления мер защиты в составе созданной СЗИ, и, как следствие, для нанесения ущерба деятельности организации. Поскольку перехват информации нарушителем может осуществляться путем формирования каналов утечки, в том числе технических (ТКУИ), то в состав объекта защиты следует включать и помещения, в которых осуществляется обработка защищаемой информации, а объект защиты целесообразно рассматривать как объект информатизации (ОИ).

В связи с тем, что обработка информации, используемой при выполнении работ на каждом этапе создания ИСЗИ в составе ОИ, осуществляется во времени, соответствующие информационные процессы характеризуются случайными временными характеристиками. Это обусловливает трудности оценки защищенности информации и эффективности приме-

няемых мер защиты [5] на каждом из этапов. Результаты обработки информации на текущем этапе используются в качестве исходных данных на последующем этапе. При этом изменяются содержание обрабатываемой на ОИ информации, оборудование, используемое для ее обработки, как объекты защиты, и перечень УБИ, что обусловливает необходимость применения дополнительных, соответствующих данным изменениям мер защиты.

В настоящее время для выбора и применения мер защиты в процессе создания ИСЗИ на ОИ проводится комплекс мероприятий [1], реализуемых предварительно группой сотрудников структурного подразделения или назначенным должностным лицом организации, ответственными за защиту информации. При этом управление этой группой осуществляется по централизованному принципу, например, руководителем организации или сотрудником, ответственным за организацию и проведение мероприятий в интересах создания ИСЗИ в составе ОИ.

В рассмотренных выше условиях организацию и проведение этих мероприятий некорректно считать управлением защитой информации, обрабатываемой на этапах создания такого рода ИС, поскольку не определены объекты и цели защиты, условия и факторы, создающие потенциально или реально существующую опасность реализации нарушителем угроз утечки защищаемой информации, цели защиты, критерии оценки защищенности информации и эффективности применяемых мер защиты.

Существующее методическое обеспечение, например [1–3], не позволяет, во-первых, учесть указанные изменения объекта защиты, условия, характеризующие динамику параллельно реализуемых процессов обработки информации, используемой в интересах создания ИСЗИ, и угроз ее утечки, во-вторых, применить адекватные меры защиты по блокированию этих угроз. Выходом из создавшейся ситуации представляется разработка в составе создаваемой СЗИ системы (подсистемы) адаптивного управления защитой информации (САУЗИ), обеспечивающей управление применением различных организационных и технических мер защиты, направленных на своевременное блокирование угроз утечки информации, обрабатываемой при выполнении работ на различных этапах создания ее СЗИ с учетом рассмотренных изменений и условий.

В этом случае система решений в ходе управления защитой распределяется по направлениям, связанным с обработкой информации различного вида и ее защитой от утечки на каждом этапе. В интересах поддержки принятия этих решений целесообразно создание специализированного программно-аппаратного комплекса, используемого для управления множеством датчиков и аппаратных или программно-аппаратных средств защиты, функционирующих в условиях динамики изменения обстановки и распределенных по территории ОИ. Эффективность защиты, как степень соответствия результата защиты поставленной цели, в этих условиях следует рассматривать с учетом того, насколько эффективно управление САУЗИ в достижении цели защиты.

В настоящее время исследования, связанные с построением систем управления, используемых в различных сферах деятельности, в основном посвящены развитию теории управления, математических методов описания процессов управления, архитектуры построения управленческих циклов в целом, методов и средств коммуникации их структурных элементов, поддержки взаимосвязей между ними и др. [6–8]. Однако вопросы применения САУЗИ для управления защитой информации, обрабатываемой при выполнении работ на этапах создания ИСЗИ в составе ОИ, от утечки по техническим каналам и реализации предложенного принципа адаптивного управления защитой на ее основе в связи с необходимостью решения ряда проблемных вопросов оценки эффективности САУЗИ и эффективности управления ею до настоящего времени даже не рассматривались.

Данная статья посвящена исследованию возможности применения существующего аппарата теории управления в интересах обоснования методов управления САУЗИ от утечки по техническим каналам на ОИ в условиях изменения состава объекта защиты, внутренних и внешних факторов, характеризующих динамику функционирования такой САУЗИ, а также обоснования направлений решения проблемных вопросов оценки эффективности такого рода системы и эффективности управления ею.

Описание информационных процессов по обработке информации на различных этапах создания ИСЗИ как объектов защиты

На этапах, предшествующих эксплуатации ИСЗИ, проводятся следующие мероприятия:

– e_1 – формирование требований к защите информации, содержащейся в информационной системе;

– e_2 – разработка системы защиты информации;

– e_3 – внедрение системы защиты информации;

– e_4 – аттестация информационной системы по требованиям защиты информации и ввод ее в действие.

Часть работ на этапах $e_1 \div e_4$ по формированию требований к ИСЗИ, ее разработке, организации внедрения, аттестации на соответствие требованиям безопасности информации и вводу в действие в соответствии с [1, 4] осуществляется обладателем информации (заказчиком) в условиях отсутствия сформированной СЗИ, соответствующей требованиям о защите информации.

Нарушение конфиденциальности информации, обрабатываемой сотрудниками организации при выполнении работ на этапе e_1 и содержащей различные сведения ограниченного доступа [1, 4], может быть использовано нарушителем как при разработке сценариев реализации угроз ее утечки по техническим каналам на этапах $e_2 \div e_4$, так и при реализации УБИ, обрабатываемой на этапе эксплуатации ИС.

Сценарии реализации угроз могут быть скорректированы нарушителем для соответствующих способов их реализации применительно к конкретным объектам воздействия, последовательности выполняемых действий, привлечению необходимых сил и

средств, соответствующих его возможностям (потенциалу), а также планированию выделяемых ресурсов для реализации угроз как в отношении этой информации, так и оборудования создаваемой ИСЗИ.

На этапе e_2 сотрудниками подразделения обрабатываются сведения: о составе пользователей, процессов и других субъектов доступа, объектов, подлежащих защите в ИСЗИ в составе ОИ; о правилах разграничения, методах контроля и управления доступом; об уязвимостях ИС, которые могут привести к возникновению УБИ; о мерах ЗИ, включаемых разработчиком в состав СЗИ, о ее структуре и размещении элементов в составе ОИ. Нарушение конфиденциальности сведений о формируемой СЗИ может быть использовано нарушителем для обхода мер защиты при реализации УБИ на этапе эксплуатации ИСЗИ и ОИ [4].

Раскрытие сведений, обрабатываемых сотрудниками подразделения при внедрении ИСЗИ на этапе e_3 и содержащихся в разработанных организационно-распорядительных документах по ЗИ, о результатах предварительных испытаний и опытной эксплуатации СЗИ, об уязвимостях ИСЗИ, об уточнении модели УБИ и принятии (дополнении) мер по их блокированию, позволит нарушителю на этапе эксплуатации ИСЗИ скорректировать сценарии реализации УБИ с учетом обхода дополненных, в том числе организационных, мер защиты в составе скорректированной СЗИ.

На этапе e_4 при проведении аттестационных испытаний ИСЗИ осуществляется анализ информации, содержащейся в документах, разработанных на этапах $e_1 \div e_3$, в части их соответствия нормативным требованиям [1]. Раскрытие сведений, содержащихся в указанных документах, может быть использовано нарушителем с целью нарушения функционирования оборудования ИСЗИ, а также реализации УБИ на этапах ее эксплуатации и вывода из эксплуатации.

Как показано в [4], в интересах создания ИСЗИ в составе ОИ обрабатывается информация как в форме документов на бумажных или электронных носителях, так и в речевом виде. В первом случае при реализации процессов разработки этих документов могут использоваться средства вычислительной техники (СВТ), имеющиеся в распоряжении сотрудников организации, а также соответствующие документы на бумажных носителях. Обсуждение и утверждение руководителем разработанных документов осуществляются на совещаниях в речевой форме. В [4] обосновано представление такого рода процессов в виде потоков событий, содержащих сообщения сотрудников организации, выполняющих работы в интересах создания ИСЗИ.

На рис. 1 в качестве примера приведена временная диаграмма реализации процессов по обработке информации в речевой форме при обсуждении результатов выполнения работ на этапах $e_1 \div e_4$ [4].

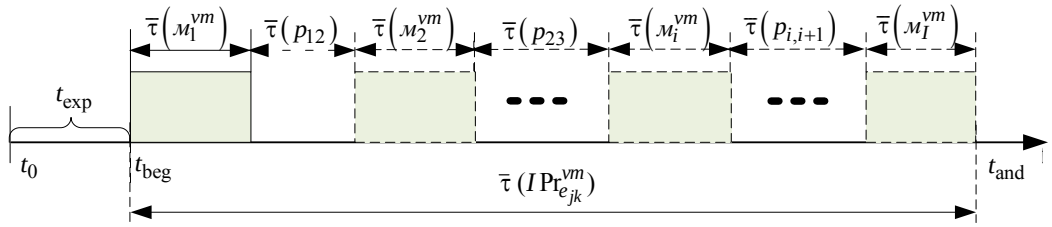


Рис. 1. Временные диаграммы реализации процессов по обработке информации в речевой форме при обсуждении результатов выполнения работ на этапе e_1 «Формирование требований к ЗИ»

На рис. 1 используются следующие обозначения: t_0 – время начала рабочего дня в организации; t_{exp} – время ожидания начала совещания (мероприятия); t_{beg} и t_{and} – времена начала и окончания совещания, соответственно; $\overline{\tau}\left(м_i^{vm}\right), i=\overline{1,I}$, – средняя продолжительность речевого сообщения массива $м_i^{vm}$ i-го, участника совещания; $\overline{\tau}\left(p_{i,i+1}\right), i=\overline{1,I-1}$ – средняя продолжительность паузы между выступлениями i-го и $(i+1)$-го участников совещания; $\overline{\tau}\left(I\,\text{Pr}_{e_{jk}}^{vm}\right)$ – среднее время реализации информационного процесса $I\,\text{Pr}_{e_{jk}}^{vm}\left(e_{jk}\right)$ по обсуждению результатов выполнения k-й работы j-го этапа создания ИСЗИ, $k=\overline{1,K}$, $j=\overline{1,J}$.

Временные диаграммы, аналогичные представленной на рис. 1, могут быть использованы для иллюстрации процессов обработки информации в интересах выполнения работ на различных этапах создания ИСЗИ.

Нарушение конфиденциальности информации, обрабатываемой на этапах создания ИСЗИ, в случае ее перехвата, является результатом реализации нарушителем угроз ее утечки, во-первых, по каналам утечки с использованием технических средств или без их использования, во-вторых, за счет получения физического или логического (через ЛВС или интернет) доступа к компьютерам, используемым для создания необходимых документов [4]. Как показано в [5] угроза утечки информации может быть реализована при выполнении ряда логических условий: наличие сформированного нарушителем канала утечки; соответствие условий его формирования требованиям скрытности применения средств (в том

числе технических) перехвата защищаемой информации, обеспечивающих возможность приема побочных информативных сигналов структурных элементов ИС и отображения содержащейся в параметрах этих сигналов информации, представляющей интерес для нарушителя; обработка этой информации на ОИ в течение времени реализации ее перехвата. Указанные обстоятельства обусловливают динамику реализации такого рода угроз [5].

Для применения адекватных мер защиты необходимо проводить оценку угроз утечки защищаемой информации на каждом из этапов создания ИСЗИ [9]. Более того, в соответствии с [9] такая оценка должна проводиться «систематически». При этом возникают проблемные вопросы, связанные с неопределенностью показателей и критериев оценки, а также самого понятия систематичности. Кроме того, возникают существенные трудности оценки, связанные, во-первых, со спецификой описания изменений защищаемой информации как объекта защиты от угроз ее утечки, во-вторых, с описанием условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность реализации нарушителем этих угроз. Указанные обстоятельства обусловливают необходимость решения указанных вопросов при разработке моделей управления САУЗИ ИСЗИ, оценке эффективности такого рода системы и эффективности управления ею.

Описание динамики процессов реализации угроз утечки информации, обрабатываемой на этапах создания ИСЗИ

В соответствии с современным подходом к оценке защищенности информации и эффективности ее защиты на всех этапах существования ИСЗИ необходимо проводить оценку (анализ) УБИ, включающую следующие мероприятия [10].

1. Определение состава защищаемой информации и характеристик ОИ, в пределах которого осуществляется ее обработка. Обработка речевой информации массивов $м_i^{vm}$ (см. рис. 1) может осуществляться как без использования технических средств, так и с использованием средств усиления и воспроизведения звука (при проведении совещаний на больших ОИ) [5]. Разработка документов в интересах создания ИСЗИ осуществляется с использованием компьютеров, как автономных, так и включенных в локальную вычислительную сеть (или сеть Internet).

2. Определение возможных источников угроз. Источником угрозы утечки информации могут быть как внутренние, так и внешние нарушители, а также внешние нарушители, выступающие в сговоре с внутренними [4, 9]. При этом способом реализации угрозы является формирование нарушителем канала утечки информации.

3. Выявление уязвимостей, которые могут эксплуатироваться нарушителем при реализации угроз утечки информации. В качестве основных рассматриваются уязвимости, связанные с использованием для обработки защищаемой информации оборудования, элементы которого могут выступать в качестве датчиков информации в составе ТКУИ.

4. Определение состава возможных угроз утечки информации о создаваемой ИСЗИ. При этом необходимо учитывать то обстоятельство, что угрозы считаются разными при их отличии даже в одном из элементов описания: источник угрозы, эксплуатируемая уязвимость, объект воздействия, сценарий реализации.

5. Определение возможностей реализации такого рода угроз и оценка ущерба от их реализации. Информация, представляющая интерес для нарушителя, может содержаться в одном или нескольких перехваченных речевых сообщениях или создаваемых документах, состав которых при оценке угроз, как правило, неизвестен.

6. Определение перечня актуальных УБИ (модели УБИ) на каждом из этапов создания ИСЗИ.

Одним из существенных факторов, влияющих на результаты оценки угроз утечки информации, обрабатываемой на различных этапах создания ИСЗИ, защищенности этой информации от утечки и эффективности применяемых мер защиты является фактор времени, характеризующий динамику реализации такого рода угроз и применяемых мер в условиях динамики реализации информационных процессов, например, $I\,\mathrm{Pr}_{e_{jk}}^{vm}$ (см. рис. 1), изменения структурных элементов создаваемой ИС, используемых для обработки информации, представленной в различном виде на различных этапах создания ИСЗИ.

В результате проведения перечисленных мероприятий по оценке угроз утечки информации формируется модель угроз. В настоящее время формирование модели угроз утечки информации, не содержащей сведений, составляющих государственную тайну, осуществляется в соответствии с требованиями, приведенными, например, в [11], а оценка защищенности информации от утечки осуществляется путем измерений уровней информативных сигналов в опорных точках вокруг структурных элементов создаваемой ИС в составе ОИ с использованием расчетно-измерительных методик с последующими расчетами уровней этих сигналов на границе контролируемой зоны (КЗ) ОИ. При этом защищенность информации как способность системы защиты противостоять ее утечке определяется в зависимости от выполнения условий [12]:

$$A_{\mathrm{IS}}/P_N < \mu_{\mathrm{res}}, \quad (1)$$

$$\Delta\tau_{\mathrm{IS}} < \left(\tau_{\mathrm{exp}} + \tau_{\mathrm{и}}\right), \quad (2)$$

$$\Delta f_{IS} > \Delta F_{\mathrm{res}}, \quad (3)$$

где A_{IS}/P_N – отношение (информативный сигнал) / шум на границе КЗ ОИ; μ_{res} – чувствительность технического средства, применяемого нарушителем для перехвата информации; $\Delta\tau_{\mathrm{IS}}$ – продолжительность передачи информации; $\tau_{\mathrm{exp}}, \tau_{\mathrm{и}}$ – времена формирова-

ния нарушителем ТКУИ и реализации перехвата информации соответственно; $\Delta f_{\text{IS}}, \Delta F_{\text{res}}$ – ширина спектра информативного сигнала и полосы пропускания приемника технического средства перехвата (ТСП) информации соответственно.

Защищенность информации определяется как соответствие состава принятых мер защиты информации составу мер, установленному нормативным документом, т.е. от выполнения условий (1)–(3) на границе КЗ ОИ. А применяемые меры защиты либо эффективны в случае выполнения этих условий, либо не эффективны в противном случае [12].

Однако в процессе обработки информации на этапах создания ИСЗИ необходимо учитывать факторы, которые могут повлиять на результаты оценки угроз утечки этой информации, в том числе ее утечки по техническим каналам при реализации перечисленных выше мероприятий:

1. Особенности состава защищаемой информации на каждом из этапов создания ИСЗИ, характеристик ОИ (в том числе размеров КЗ) и динамики реализации процессов обработки этой информации с использованием оборудования различного состава (либо без его использования).

2. Неопределенность сведений о возможностях нарушителя (внутреннего или внешнего) по реализации какого-либо из сценариев перехвата как речевой, так и документальной информации, обусловленных реализацией принципа негласности ведения перехвата информации [5].

3. Неопределенность, случайная направленность и содержание действий нарушителя, выполняемых при реализации различных сценариев перехвата этой информации.

4. Многообразие возможных угроз утечки информации, обрабатываемой на различных этапах создания ИСЗИ, и сложности их оценки в рассматриваемых условиях.

5. Отсутствие в настоящее время методов оценки ущерба при анализе угроз утечки информации, что обусловливает применение принципа неприемлемости любого ущерба [10].

6. Состав актуальных угроз в отношении информации, обрабатываемой на различных этапах создания ИСЗИ, изменяется с учетом того, что угроза считается актуальной, если она может быть реализована и при ее реализации может быть нанесен ущерб обладателю информации [9, 10].

Кроме того, применение расчетно-измерительных методик не позволяет учесть динамику проявления перечисленных факторов при обработке информации в процессе выполнения различных работ даже в рамках отдельного этапа, а также то, что оценку защищенности информации от утечки и эффективность применяемых мер защиты следует проводить с учетом параллельной реализации процессов обработки информации, реализации угроз ее утечки по техническим каналам и применения мер защиты от утечки. При этом отсутствие учета фактора времени приводит, как правило, к завышенным оценкам защищенности информации, поскольку невыполнение условия (1) не означает то, что нарушитель сможет успеть перехватить информативный сигнал в соответствии с (2), а полоса пропускания приемника, используемого в составе ТСП, достаточна для отображения сведений, содержащихся в параметрах этого сигнала.

В соответствии с [4, 9] сценарий определяется как последовательность возможных действий, выполняемых нарушителем, имеющим необходимые ТСП для формирования ТКУИ, или уровень доступа к документам на бумажных носителях или к компьютерам, включенным в ЛВС организации и используемым для создания этих документов и их демонстрации при проведении совещаний. На рис. 2, *б* приведена временная диаграмма, иллюстрирующая один из множества возможных сценариев реализации угрозы утечки речевой информации, соответствующий ситуации, при которой нарушитель имеет возможность периодически применять ТСП в зоне возможного перехвата информации, обрабатываемой в интересах создания ИСЗИ. Динамика реализации процессов ее обработки (рис. 2, *а*) соответствует временной диаграмме, приведенной на рис. 1. Пунктирными линиями выделены фрагменты сообщений в составе информационного процесса $I\,\text{Pr}_{e_{jk}}^{vm}$, которые могут быть перехвачены нарушителем.

На рис. 2, *а* используются такие же обозначения, как и на рис. 1.

На рис. 2, *б* используются следующие обозначения: $\overline{\tau}(CU)$ – среднее время формирования нарушителем канала утечки информации, включающее средние времена выполнения последовательности действий (прибытие в зону возможного приема информативного сигнала, его обнаружение, выбор места, обеспечивающего скрытность применения приемника в составе ТСП, прием сигнала, настройка характеристик приемника, отображение перехваченной информации и др. [5]) в интересах реализации угрозы ее утечки; $\overline{\tau}\left(u_l^{vm}\right), l = \overline{1, L}$ – время реализации l-й попытки перехвата речевого сообщения во время проведения совещания; $\overline{\tau}\left(p_{l,l+1}^{vm}\right)$ – продолжительность паузы между l-й и $(l + 1)$-х попытками перехвата речевого сообщения во время проведения совещания; $\overline{\tau}\left(\text{Pr}_u^{vm}\left(e_{jk}\right)\right)$ – средняя продолжительность реализации угрозы утечки речевой информации во время проведения совещания по результатам выполнения работ в процессе e_{jk} этапа e_j формирования ИСЗИ в составе ОИ.

В [5] обосновано, что применение существующих подходов к оценке угроз утечки информации, обрабатываемой на этапах создания ИСЗИ, защищенности этой информации от утечки, эффективности применяемых мер защиты не позволяет обеспечить адекватность указанных оценок.

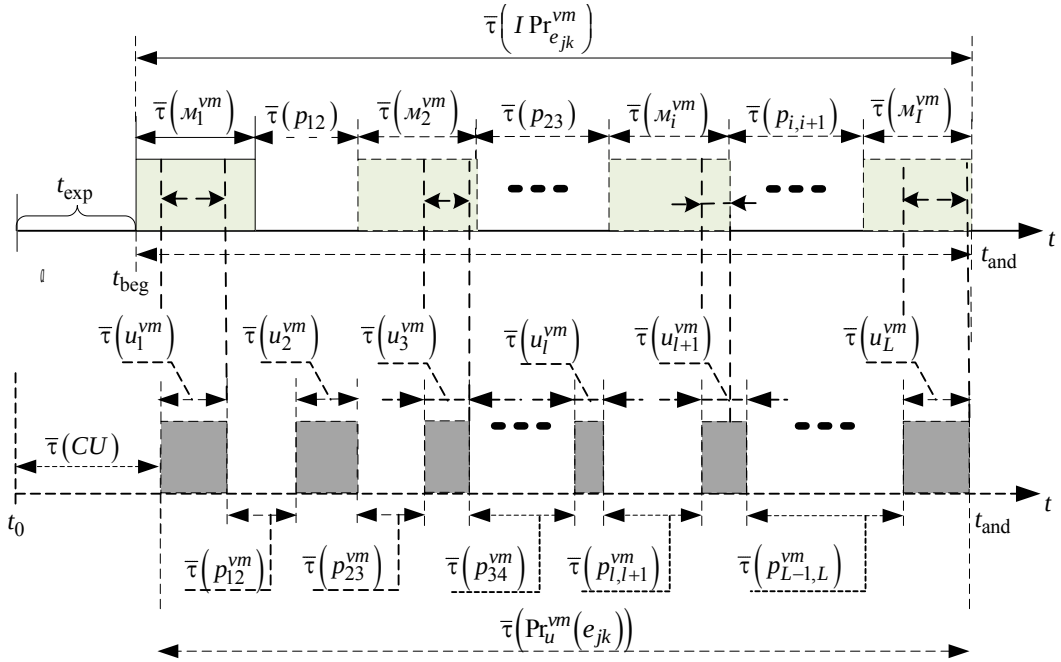


Рис. 2. Временные диаграммы сценария реализации угрозы утечки речевой информации, обрабатываемой при выполнении работ в процессе e_{jk} на этапе e_j, внутренним нарушителем. Без мер защиты

Принципы управления САУЗИ в условиях динамики реализации процессов обработки информации на этапах создания ИСЗИ в составе ОИ, угроз ее утечки по техническим каналам и защиты от утечки

Систему называют адаптивной, если она способна реагировать на изменения внутренних и внешних условий функционирования объекта управления. Управление САУЗИ – это управление применением мер защиты информации в процессе создания ИСЗИ в условиях наличия неполной априорной информации об управляемом процессе (объекте управления), которые изменяются по мере накопления информации и учитываются с целью улучшения качества функционирования системы [6]. САУЗИ подстраивается под условия обработки информации различной физической природы на различных этапах создания ИСЗИ с учетом обстоятельств ее обработки и адекватным образом меняет свое поведение или характеристики, чтобы обеспечить решение стоящих перед нею задач.

В процессе управления САУЗИ могут быть выделены пять этапов, составляющих управленческий цикл: 1) определение цели создания САУЗИ от утечки по техническим каналам и необходимости решения задач управления в различных условиях обстановки; 2) сбор и обработка информации о состоянии объекта защиты в интересах оценки ситуации в условиях динамики управления САУЗИ; 3) принятие решения на выполнение наиболее целесообразных действий в интересах управления процессом функционирования САУЗИ; 4) исполнение принятого решения; 5) контроль исполнения решения [13].

Под управлением САУЗИ от утечки по техническим каналам на ОИ будем понимать организацию процесса формирования органом управления защитой совокупности управляющих воздействий на оборудование объекта и средства защиты, а также команд подразделениям и / или должностным лицам на применение организационных, организационно-технических и технических мер в интересах повышения эффективности защиты информации от утечки на каждом этапе создания ИСЗИ в целом.

С учетом целей выполнения работ, их последовательности и содержания на различных этапах создания ИСЗИ, приведенных в [4], САУЗИ должна обеспечивать решение задач поддержки принятия решений по применению организационных и технических мер защиты информации различной физической природы, обрабатываемой при выполнении работ на каждом из этапов и в процессе создания ИСЗИ в целом, с целью своевременного блокирования угроз ее утечки по техническим каналам.

В соответствии с описанием такого рода угроз меры защиты должны быть направлены, во-первых, на блокирование источника угрозы, выполняющего действия по формированию канала утечки, как на территории ОИ (внутреннего нарушителя), так и на территории, прилегающей к объекту (внешнего нарушителя), во-вторых, на локализацию или скрытие информативных сигналов структурных элементов оборудования, используемого для обработки защищаемой информации, путем применения средств защиты пассивного и / или активного характера соответственно, в-третьих, на противодействие выполнению нарушителями действий по формированию канала утечки в условиях динамики и скрытности выполнения этих действий за счет своевременного их выявления, например, с использованием систем видеонаблюдения, и удаления из зоны возможного перехвата информации силами групп быстрого реагирования (ГБР) [5].

Под организационными понимаются меры по защите информации, предусматривающие установление временных, территориальных и пространственных ограничений на условия использования и режимы работы объекта защиты [14], например, меры, направленные, на поиск и задержание нарушителей на территории ОИ, введение ограничений на посещение помещений объекта и т.п. К организационно-техническим относятся меры организационного характера, реализуемые с применением технических средств, например, контроль и управление доступом на территорию ОИ, обеспечение КЗ, а также поиск закладочных устройств с использованием специальных технических средств и др. К техническим относятся меры с применением технических, программных и программно-технических средств защиты информации пассивного и активного характера [14].

На этапах создания ИСЗИ при отсутствии СЗИ, аттестованной по требованиям о защите информации, в качестве основы для ее формирования могут использоваться меры обеспечения безопасности объектов в составе системы охранного мониторинга (СОМ), включающей совокупность разнородных функционально объединенных датчиков информации (видео-, аудио-, радио-, оптических и др.) о состоянии охраняемого объекта, вычислительных и вспомогательных технических средств ее получения, передачи и хранения в интересах решения задач охраны и предупреждения о возникновении нежелательных ситуаций, создаваемой, как правило, с использованием программно-аппаратных комплексов (ПАК) [15]. Применительно к решению защиты информации, обрабатываемой в интересах создания ИСЗИ как объекта защиты (охраны), меры, реализуемые в составе СОМ, следует рассматривать как превентивно установленные. В процессе решения задач управления в условиях изменения состава объекта защиты на основе анализа собранной и обработанной информации об этих изменениях, о возникновении новых факторов, обусловливающих возможность реализации нарушителем угроз утечки обрабатываемой информации, может быть принято решение на выполнение наиболее целесообразных действий с применением иных дополнительных мер защиты, как организационно-технических, так и технических, в интересах управления процессом функционирования САУЗИ, адаптированных к этим изменениям.

В этих условиях управление САУЗИ осуществляется на двух уровнях (рис. 3).

На первом уровне выбор организационных и организационно-технических мер защиты и управление ими осуществляется только централизованно руководством организации или руководителем подразделения, созданного для проведения работ по созданию ИСЗИ. В качестве объекта управления выступают предварительно установленные меры защиты в составе СОМ, включающей ПАК систем (подсистем) контроля и управления доступом (СКУД), видеонаблюдения, охранной и пожарной сигнализации (СОПС), средства инженерно-технической укрепленности (ИТУ), силы и средства ГБР и др. [14]. С использованием указанных подсистем в составе СОМ, во-первых, обеспечивается КЗ вокруг ОИ, а также контроль и управление доступом на территорию данной зоны. Однако размеры этой зоны могут быть ограничены за счет использования различного рода ограждающих конструкций, усиленных средствами ИТУ: заборов вокруг территории, прилегающей к зданию, принадлежащему организации (с калитками и воротами), контролируемых по периметру с использованием средств СКУД и видеонаблюдения (рубеж охраны *3*); стен, входных дверей, оконных проемов самого здания (рубеж охраны *2*) и помещений, в которых выполняются работы и обрабатывается информация в интересах создания ИСЗИ (рубеж охраны 1) [15].

Для контроля ограждающих конструкций помещений применяются средства СОПС и СКУД. При этом в качестве основных факторов, влияющих на обеспечение защиты информации от утечки, следует рассматривать, во-первых, расположение помещений в пределах здания, во-вторых, архитектурные особенности этого здания (количество этажей, наличие или отсутствие внутреннего двора и др.), в-третьих, размеры территории, прилегающей к зданию и ограниченной заборами, при их наличии или отсутствии, например, в условиях городской застройки.

Указанные факторы, обусловливают выполнение или невыполнение условия (*1*) на границе КЗ, которая может быть реально обеспечена для ОИ. Кроме того, в условиях невозможности обеспечения третьего рубежа охраны важное значение имеют характерные особенности территории, прилегающей ко второму рубежу, в части оценки возможности скрытного применения нарушителем ТСП и выполнения условий (*2*) и (*3*) перехвата информации. В зависимости от вида информации, обрабатываемой при выполнении различных работ в интересах создания ИСЗИ, перечень условий и факторов, создающих опасность реализации угрозы ее утечки, изменяется. В современных СОМ реализация функций ее ПАК осуществляется с использованием элементов искусственного интеллекта.

Данные об условиях и результатах функционирования ПАК и подсистем СОМ, во-первых, фиксируются и накапливаются в базе знаний, во-вторых, используются для поддержки принятия решений по усилению мер защиты первого уровня САУЗИ (в случае их недостаточности) за счет соответствующих мер второго уровня или ослаблению (в случае избыточности) за счет исключения некоторых мер из состава принятых на первом уровне, в-третьих, применяются для обучения и перепрограммирования других ПАК в составах САУЗИ первого и второго уровней с целью повышения эффективности их функционирования с учетом изменяющихся условий и факторов. Однако решение об усилении или ослаблении мер защиты, а также об изменении условий и режимов функционирования принимается в центре управления САУЗИ.

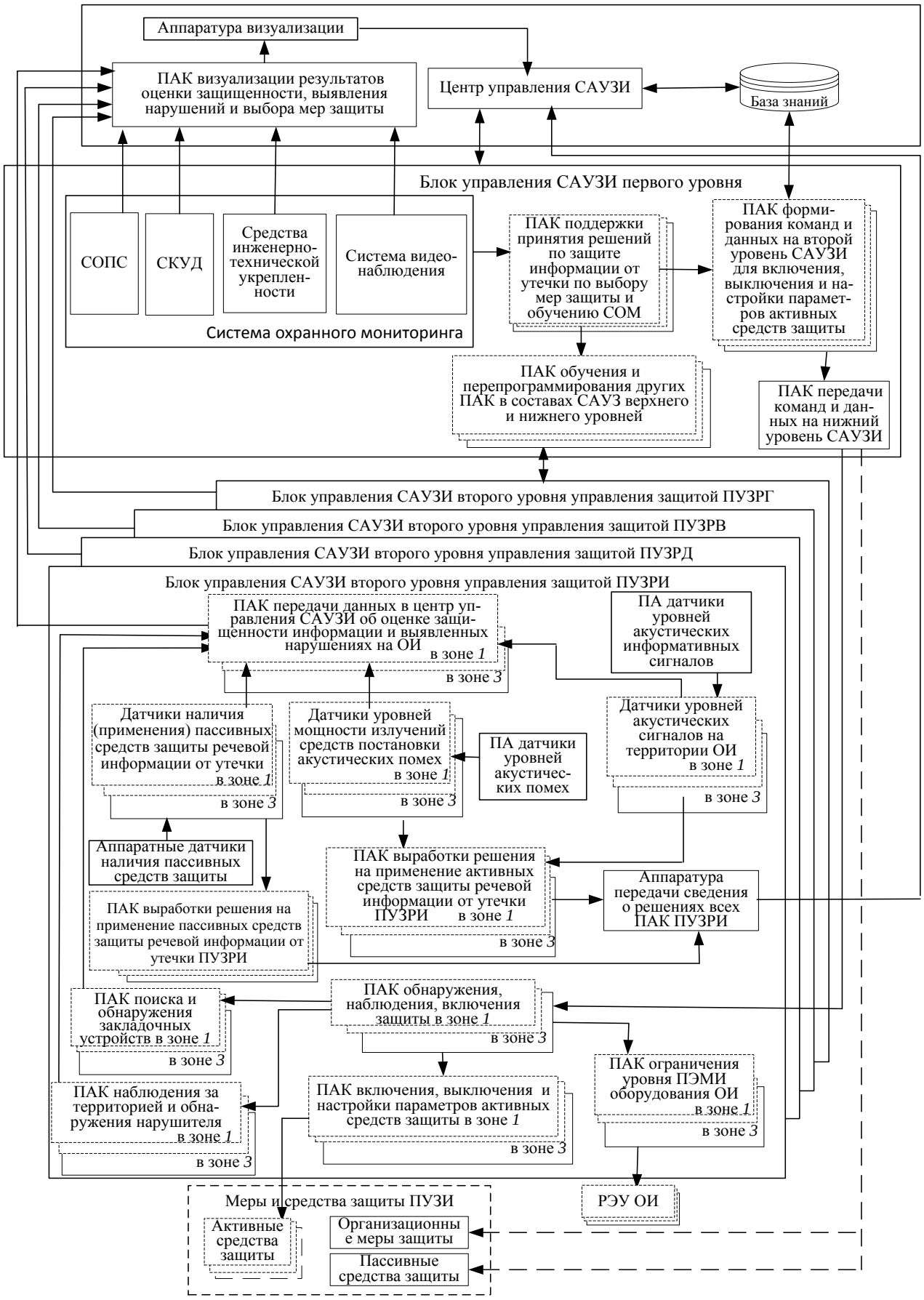


Рис. 3. Пример структуры и состава системы адаптивного управления защитой информации от утечки по техническим каналам на этапе создания ИСЗИ

В частности, на основании решения об усилении или ослаблении мер защиты могут быть сформированы команды и данные для включения и настройки параметров дополнительных пассивных и / или активных средств защиты второго уровня или их выключения. Контроль выполнения этих команд осуществляется ПАК второго уровня управления САУЗИ.

На втором уровне в интересах управления применением технических средств защиты информации пассивного и активного характера в зависимости от видов обрабатываемой информации формируется несколько подсистем (блоков) управления защитой: подсистемы управления защитой речевой (ПУЗРИ), документальной (ПУЗДИ), графической (ПУЗГИ), видовой (ПУЗВИ) информации и др.

Наличие множества условий и факторов, рассмотренных выше, обусловливает необходимость обработки достаточно больших объемов данных, характеризующих состояние объектов защиты, угроз утечки обрабатываемой информации и применяемых мер защиты с учетом изменения их состава в различных зонах защиты, соответствующих рубежам охраны СОМ. Построение такого рода подсистем возможно с использованием ПАК на основе искусственного интеллекта. При этом все подсистемы управления защитой являются объектами управления со стороны центра управления САУЗИ как субъекта управления.

Усиление защиты информации в каждом блоке осуществляется за счет применения, во-первых, дополнительных пассивных технических мер защиты, например, мобильных акустических экранов, штор – жалюзи в оконных проемах и др., во-вторых, организационно-технических мер на основе ПАК наблюдения за территорией и обнаружения нарушителя в зонах *1*, *2* и *3*, в-третьих, технических мер активной защиты, например, генераторов акустического и электромагнитного шума, виброакустических датчиков, ПАК поиска и обнаружения закладочных устройств в зонах и др. При этом решение об усилении / ослаблении защиты за счет организационно-технических и технических мер защиты второго уровня принимается центром управления САУЗИ.

Приоритетными являются, во-первых, меры, реализуемые с использованием ПАК поиска и обнаружения закладочных устройств в соответствующих зонах, во-вторых, пассивные технические меры защиты, управление которыми осуществляется на основании анализа сведений, поступающих от программно-аппаратных (ПА) датчиков их наличия, с использованием ПАК выработки решения на применение. Кроме того, в период реализации информационных процессов по обработке информации на различных этапах создания ИСЗИ может осуществляться наблюдение за территорией с целью своевременного обнаружения нарушителя в зонах *1–3* с использованием соответствующих ПАК.

Данные о результатах реализации этих мер обрабатываются и передаются в центр управления САУЗИ с отображением этих результатов при помощи ПАК визуализации. В случае их недостаточности применяются активные технические средства защиты, управление которыми осуществляется при помощи ПАК выработки решения на применение активных средств защиты информации в составе блока управления САУЗИ соответствующей подсистемы управления защитой.

Циклы управления защитой на первом и втором уровнях управления в существенной степени отличаются, во-первых, составом объектов управления, во-вторых, средствами сбора и обработки информации об их состоянии в условиях динамики управления, в-третьих, характеристиками управляющих воздействий, в-четвертых, средствами исполнения и контроля принятых решений.

На рис. 4 и 5 приведены блок-схемы циклов управления САУЗИ первого и второго уровней, соответствующие приведенным выше их описаниям.

В соответствии с блок-схемой (см. рис. 4) превентивное (предварительное) выявление угроз утечки информации осуществляется путем контроля за появлением нарушителей в зонах *1–3* охраны СОМ [16]. При этом реализуются методы ограничения физического доступа к материальным носителям информации, обрабатываемой в интересах создания ИСЗИ, и оборудованию, используемому для ее обработки.

Оценка защищенности информации от утечки в условиях динамики реализации угроз может быть реализована на основе показателей, учитывающих сценарии выполнения нарушителем действий по перехвату информации в различных условиях обстановки, обусловленных характеристиками зон *1–3* и контролируемых средствами СОМ, предложенных в [4].

Форма представления показателя оценки угрозы утечки информации зависит от сценариев ее реализации нарушителем. Так, в случае, когда нарушитель внутренний и имеет возможность находиться в зоне возможного перехвата информации постоянно, например, при его включении в состав подразделения, выполняющего соответствующие работы в течение *k*-го процесса $k=\overline{1,K}$ на этапе e_j, в качестве такого показателя, по аналогии с [5], будем использовать вероятность $P_1^{\text{o}}(t)$ перехвата хотя бы одного сообщения, содержащего сведения, представляющие интерес для этого нарушителя, за заданное время в условиях отсутствия мер защиты, которая при экспоненциальном приближении рассчитывается по формуле

$$P_1^{\text{o}}(t)=1-\exp\left(-\bar{\mu}^{vm}\cdot p_i^{vm}\cdot t\right), \qquad (4)$$

где $\bar{\mu}^{vm}$ – средняя интенсивность речевых сообщений в составе информационного процесса $I\,\text{Pr}_{e_{jk}}^{vm}$; p_i^{vm} – вероятность того, что в *i*-м речевом сообщении процесса $I\,\text{Pr}_{e_{jk}}^{vm}$ содержатся сведения, представляющие интерес для нарушителя.

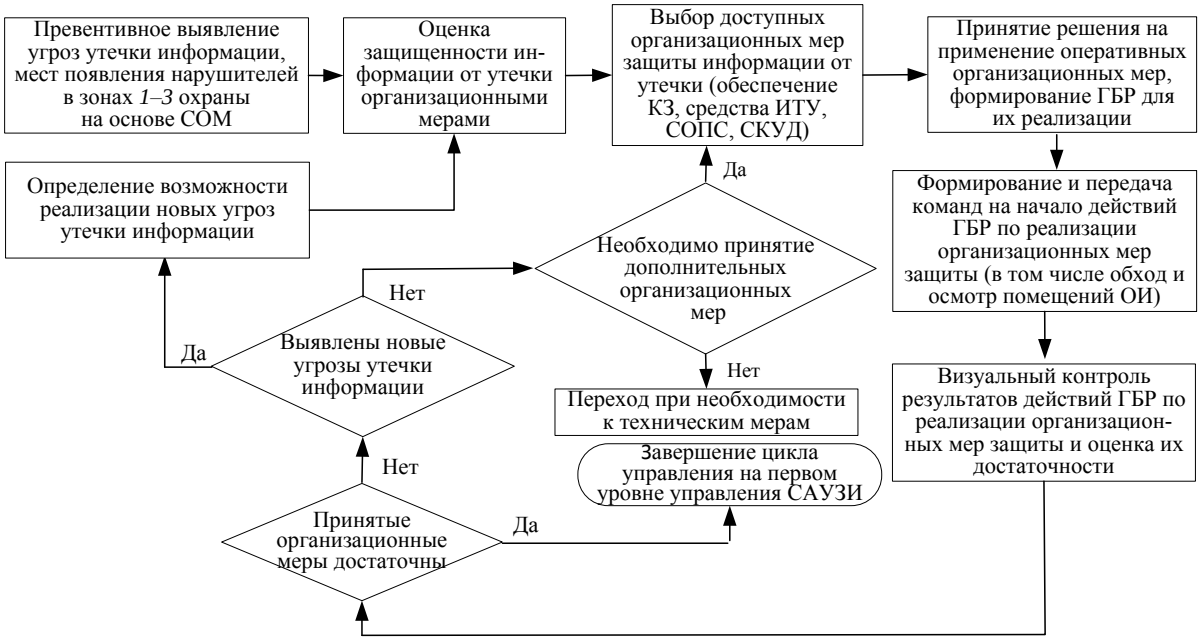


Рис. 4. Блок-схема цикла управления САУЗИ первого уровня

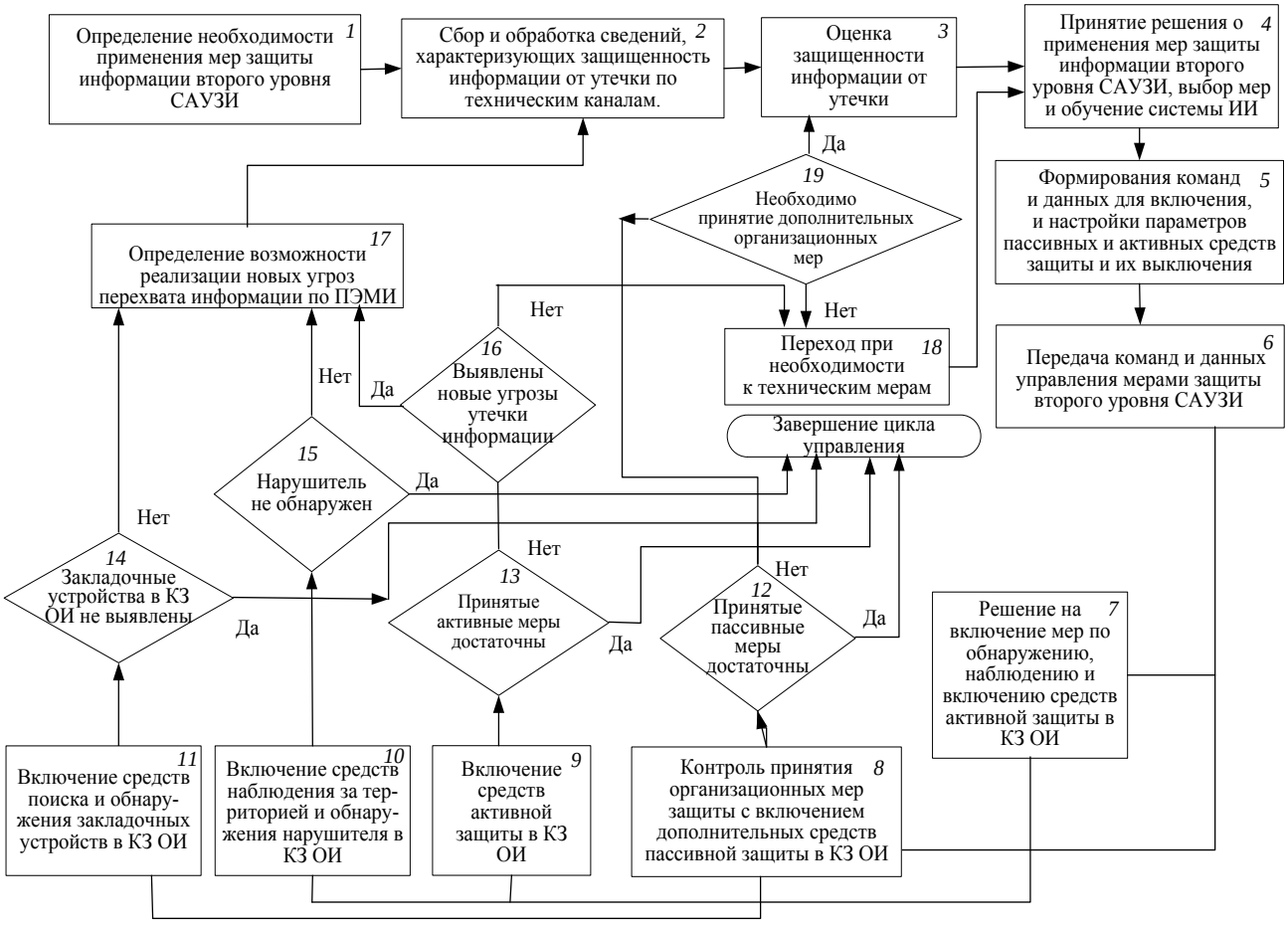


Рис. 5. Блок-схема цикла управления САУЗИ второго уровня

Сценарии постоянного нахождения в зоне возможного перехвата информации могут быть реализованы как внутренним, так и внешним нарушителями различными способами, например, при включении внутреннего нарушителя в состав подразделения, выполняющего работы по созданию ИСЗИ, или путем установки им закладочных устройств в помещениях, в которых выполняются указанные работы, и др., а также в случаях применения внешним нарушителем ТСП за пределами КЗ ОИ, когда размеры такой зоны не соответствуют требованиям о защите информации от утечки и условие (1) не выполняется.

При этом в условиях отсутствия мер защиты вероятность утечки информации фактически зависит от содержания в составе перехваченных сообщений сведений, представляющих интерес для нарушителя.

Усиление мер защиты возможно как за счет применения средств контроля и управления доступом в пределах КЗ ОИ, дополнительно установленных систем видеонаблюдения за пространством в этой зоне или за территорией, к ней прилегающей, а также путем выявления портативных электронных устройств негласного перехвата обрабатываемой информации.

Если нарушитель имеет возможность лишь периодически применять ТСП в зоне возможного перехвата информации, обрабатываемой в интересах создания ИСЗИ (см. рис. 2, *б*), необходимо учитывать поток событий, описываемый средней интенсивностью $\bar{\mu}^{\text{ТСП}}$ применения этого ТСП и средней длительностью $\bar{\tau}\left(u_l^{vm}\right)$ реализации попыток перехвата. Тогда возможность перехвата одного сообщения при отсутствии мер защиты будет определяться вероятностью совпадения этих потоков [5]

$$P_{\text{I}}^{\text{o}}(t)=1-\exp\left[-\bar{\mu}^{vm}\cdot\bar{\mu}^{\text{ТСП}}\left(\bar{\tau}\left(\mathcal{M}_i^{vm}\right)+\bar{\tau}\left(u_l^{vm}\right)\right)\right]p_i^{vm}\cdot t\,. \quad (5)$$

В этих условиях усиление мер защиты может быть достигнуто путем применения организационно-технических мероприятий, направленных на снижение интенсивности и продолжительности применения ТСП в случае нарушения условия (1), а также за счет включения технических средств пассивного и активного характера [11].

На втором уровне целью управления (блок *1*) является усиление мер защиты, реализованных на основе СОМ на первом уровне. Сбор и обработка сведений, характеризующих защищенность информации от утечки по техническим каналам, осуществляется с использованием ПА датчиков различной физической природы в составе соответствующих подсистем управления защитой. Для поддержки принятия решений на применение указанных мер в динамике их реализации необходимо создание специализированного ПАК, реализующего указанные меры (блоки *4–17*) в соответствии с описанием второго уровня управления САУЗИ, приведенным выше. ПАК при этом является объектом управления со стороны центра как субъекта управления.

Рассмотренный подход позволяет реализовать поэтапное формирование СЗИ путем усиления мер защиты, применяемых в составе СОМ, управляемых на первом уровне САУЗИ, дополнительными организационно-техническими и техническими мерами, включаемыми на втором уровне САУЗИ.

С учетом динамики параллельно реализуемых процессов обработки защищаемой информации, угроз ее утечки по техническим каналам и защиты от утечки элементы САУЗИ, реализующие оперативное управление техническими средствами защиты, как пассивного, так и активного характера, могут функционировать параллельно друг другу и / или последовательно, в зависимости от множества логических условий. Для оценки эффективности защиты и эффективности управления ею необходимы соответствующие показатели, учитывающие фактор времени и наличие указанных условий, а также модели для расчета этих показателей. Как показано в [5], для моделирования такого рода процессов целесообразно использовать аппарат составных сетей Петри–Маркова. Разработка этих моделей является предметом дальнейших исследований авторов.

Заключение

1. Возможное получение нарушителем доступа к содержанию информации, используемой в интересах создания ИСЗИ на этапах, предшествующих ее эксплуатации, может использоваться нарушителем для реализации УБИ, обрабатываемой на этапе эксплуатации этой ИСЗИ. При этом в качестве негативного последствия реализации УБИ в процессе создания ИСЗИ рассматривается утечка информации, обрабатываемой на каждом из этапов. При организации и обеспечении защиты этой информации от утечки необходимо учитывать изменения форм ее представления, условий динамики ее обработки, совокупность условий и факторов, создающих опасность реализации угроз утечки по техническим каналам. Указанные изменения могут быть учтены путем управления защитой на основе САУЗИ, создаваемой по централизованному принципу и обеспечивающей управление на двух уровнях путем усиления мер защиты в соответствии с изменяющимися условиями обстановки.

2. Обоснованы возможности применения существующего аппарата теории управления в интересах создания САУЗИ от утечки по техническим каналам на ОИ в условиях изменения состава объекта защиты, внутренних и внешних факторов, характеризующих динамику функционирования такой САУЗИ, а также обоснования направлений решения проблемных вопросов оценки эффективности такого рода системы и эффективности управления ею.

3. Проблемные вопросы, возникающие при создании САУЗИ, связаны, во-первых, с изменениями видов информации, обрабатываемой на различных этапах создания ИСЗИ как объекта защиты, во-вторых, с описанием динамики параллельно реализуемых процессов обработки этой информации, условий и факторов реализации угроз ее утечки по техническим каналам и защиты от утечки, в-третьих, с оценкой эффективности защиты и эффективности управления защитой.

4. Для оценки эффективности управления защитой информации на основе САУЗИ на этапах создания ИСЗИ необходимо соответствующее методическое обеспечение управления защитой. Его создание связано с вопросами обоснования показателей и разработки математических моделей для их расчета с учетом фактора времени и различных логических условий управления защитой информации от утечки по ТКУИ, включающих алгоритмы оценки обстановки на ОИ, в составе которого создается ИСЗИ, и на территории, прилегающей к объекту, а также совокупность возможных алгоритмов выбора целесооб-

разного состава мер защиты в САУЗИ, учитывающих указанные условия.

5. Для оценки эффективности управления защитой информации от утечки на основе САУЗИ предложено использовать количественные показатели, позволяющие определить влияние управления защитой на ее эффективность. Для расчета таких показателей с учетом фактора времени и логических условий, определяющих динамику реализации исследуемых процессов, целесообразно использовать аппарат составных сетей Петри–Маркова. Разработка этих моделей является предметом дальнейших исследований авторов. В качестве основы для формирования графов такого рода сетей могут использоваться разработанные блок-схемы циклов управления САУЗИ для двух уровней.

Литература

1. Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах. Приказ ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://base.garant.ru/ 70391358, свободный (дата обращения: 22.12.2024).

2. ГОСТ Р 51583. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.

3. ГОСТ 34.601–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы: стадии создания. – М.: Стандартинформ, 2009. – 6 с.

4. Авсентьев О.С. Модели обоснования организационно-технического обеспечения мероприятий по созданию СЗИ объектов информатизации / О.С. Авсентьев, В.В. Бутов, А.Г. Вальде // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 5. – С. 93–108. DOI 10.31854/1813-324X-2024-10-5-92-107.

5. Simulation of processes to protect information of informatization objects against leakage through technical channels using an apparatus of Petri–Markov nets / O.S. Avsentiev, A.O. Avsentiev, A.G. Krugov, Yu.K. Yazov // Bulletin of the South Ural StateUniversity. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS). – 2021. – Vol. 14, No. 4. – P. 46–62.

6. Ожиганова М.И. Построение адаптивных систем защиты информации / М.И. Ожиганова, А.О. Калита, Е.Н. Тищенко // НБИ технологии. – 2019. – Т. 13, № 4. – С. 12–21. DOI: 10.15688/NBIT.jvolsu.2019.4.2.

7. Жмурко Д.Ю. Понятие, сущность и классификация адаптивного управления системами с организационной сложностью // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 90 (06) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-suschnost-i-klassifikatsiya-adaptivnogo-upravleniya-sistemami-s-organizatsionnoy-slozhnostyu/viewer, свободный (дата обращения: 20.12.2024).

8. Большой энциклопедический словарь. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Большая Российская энциклопедия; СПб.: Норинт, 2002. – 1456 с.

9. Методика оценки угроз безопасности информации: метод. документ. – Утв. ФСТЭК России 05 февраля 2021 г. – М.: ФСТЭК, 2021. – 83 с.

10. Язов Ю.К. Методология оценки эффективности защиты информации в информационных системах от несанкционированного доступа / Ю.К. Язов, С.В. Соловьев. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. – 258 с.

11.Специальные требования и рекомендации по технической защите конфиденциальной информации (СТР-К). Утв. приказом Гостехкомиссии России от 30.08.2002 № 282 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/InfoSec/RD_FSTEK, свободный (дата обращения: 25.12.2024).

12. Авсентьев А.О. Вербальная модель технического канала утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений на объектах информатизации / А.О. Авсентьев, С.В. Пономаренко, А.Г. Кругов // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2020. – № 1. – С. 9–21.

13. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.

14. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 8 с.

15. Зарубин В.С. Системы охранной безопасности: учеб. пособие / В.С. Зарубин и др. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2012. – 282 с.

16. Язов Ю.К. Проблемные вопросы управления защитой информации от утечки по техническим каналам с применением многоагентных систем / Ю.К. Язов, А.О. Авсентьев // Вопросы кибербезопасности. – 2024. – № 6 (64). – С. 85–97. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-Z-XX-YY.

Авсентьев Олег Сергеевич
Д-р техн. наук, проф. каф. информационной безопасности Воронежского института МВД России
Патриотов пр., 53, г. Воронеж, Россия, 394065
Тел.: +7 (473-2) 64-52-44.
Эл. почта: osaos@mail.ru

Томилова Эльвира Александровна
Адъюнкт Воронежского института МВД России.
Патриотов пр., 53, г. Воронеж, Россия, 394065
Тел.: +7-904-531-35-34.
Эл. почта: tomilovaea09@gmail.com

Avsentiev O.S., Tomilova E.A.

Adaptive Information Security Management Models in the Process of Developing a State Information System

The article considers problematic issues of developing adaptive control models for information security in a state information system during the creation of its security system. These models aim to take into account changes in the representation formats of protected information, the dynamic conditions of its processing, and factors posing a threat of leakage through technical channels. Descriptive models of the investigated processes have been developed. Feasibility of considering these changes and conditions is substantiated through an adaptive information security management system established on a centralized principle, providing two-level control by reinforcing security measures in accordance with changes in the composition of the protected object, internal and external factors characterizing the dynamics of the system's operation, and approaches to address-

ing problematic issues in assessing its effectiveness. To calculate performance evaluation metrics for information security management during the stages of creating a secure information system, considering the time factor and various logical control conditions, the application of composite Petri-Markov nets is proposed. Control cycle flowcharts for two levels has been developed, which are considered as the basis for constructing composite Petri-Markov net graphs.

Keywords: secure information system, adaptive information security management system, information leakage threat, conditions and factors, effectiveness of information security management.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-61-73

References

1. *On the approval of requirements for protecting non-state secret information in state information systems* [Electronic resource]. FSTEC order of Russia dated 11 February 2013, no. 17. Available at: https://base.garant.ru/70391358, free (Accessed: 22.12.2024) (in Russ.).

2. GOST P 51583. [Information security. Procedure for creating automated systems in a secure configuration. General provisions]. M., Standartinform, 2014, 15 p. (in Russ.).

3. GOST 34.601–90. [Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems: stages of creation]. M., Standartinform, 2009, 6 p. (in Russ.).

4. Avsentiev O.S., Butov V.V., Valde A.G. [Models for justifying organizational and technical support for measures to create SIS informatization objects]. *Works of communication institutions*. 2024, vol. 10, no. 5, pp. 93–108. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-5-92-107 (in Russ.).

5. Avsentiev O.S., Avsentiev A.O, Krugov A.G., Yazov Yu.K. Simulation of processes to protect information of informatization objects against leakage through technical channels using an apparatus of Petri–Markov nets. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*, 2021, vol. 14, no. 4, pp. 46–62.

6. Ozhiganova M.I., Kalyta A.O., Tishchenko E.N. [Construction of adaptive information security systems]. *NBI technology.* 2019, vol. 13, no. 4, pp. 12–21. DOI: 10.15688/NBIT.jvolsu.2019.4.2 (in Russ.).

7. Zhmurko D.Ju. [Concept, essence and classification of adaptive management systems with organizational complexity]. *Scientific journal of KubaGAU,* 2013, no. 90 (06) [Electronic resource]. Available at: https://cyberleninka.ru/ article/n/ponyatie-suschnost-i-klassifikatsiya-adaptivnogo-upravleniya-sistemami-s-organizatsionnoy-slozhnostyu/viewer, free (Accessed: December 20.12.2024) (in Russ.).

8. *The Grand Encyclopaedic Dictionary*. 2nd ed., rev. and exp. M.: The Great Russian Encyclopedia; SPb.: Norinth, 2002, 1456 (in Russ.).

9. *Guidance document. Methodology for assessing information security threats.* Approved by CCFTU Russia 5 February 2021 (in Russ.).

10. Yazov Y.Q., Solovyev S.V. *Methodology for evaluating effectiveness of information protection in information systems from unauthorized access: monograph*. Saint-Petersburg: Science-intensive technologies, 2023, 258 p. (in Russ.).

11. *Special requirements and recommendations for the technical protection of confidential information (TPC-K), Approved by Order of the State Technical Commission of Russia dated 30.08.2002* no. 282 [Electronic resource]. Available at: http://www.rfcmd.ru/ sphider/docs/InfoSec/ RD_FSTEK, free (Accessed: 25.12.2024) (in Russ.).

12. Avsentiev A.O., Ponomarenko S.V., Rojkov A.G. Verbal model of the technical channel for information leakage due to side electromagnetic radiation at the data processing facilities. *Bulletin of the Voronezh Institute of the FSIN of Russia*. 2020, no. 1, pp. 9–21 (in Russ.).

13. Korshunov Y.M. *Mathematical foundations of cybernetics: study, a manual for universities*. 2nd ed., rev. and exp. M.: Energy, 1980, 424 p. (in Russ.).

14. GOST R 50922–2006. [Information protection. Basic terms and definitions]. M., Standartinform, 2008. 8 p. (in Russ.).

15. Zabrutin V.S. et al. *Security System*: Training manual. Voronezh, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2012. 282 p. (in Russ.).

16. Yazov Y.K., Avsentiev A.O. Problematic issues of management of information protection against leakage through technical channels using multi-agent systems. *Cybersecurity*, 2024, no. 6 (64), pp. 85–97. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-Z-XX-YY (in Russ.).

Oleg S. Avsentiev
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Information security department, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation
53, Patriotov pr., Voronezh, Russia, 394065
Phone: +7 (473-2) 64-52-44.
Email: osaos@mail.ru

Elvira A. Tomilova
PhD student, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation
53, Patriotov pr., Voronezh, Russia, 394065
Phone: +7-904-531-35-34.
Email: tomilovaea09@gmail.com

УДК 004.627

Ю.В. Шабля

Сжатие информационных объектов с помощью методов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ

Рассматривается задача сжатия данных без потерь с помощью методов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ. Представлена схема кодирования информационных объектов, представляющих собой сложные дискретные структуры с биективным отображением на деревья И/ИЛИ. Кроме того, продемонстрированы особенности реализации процесса кодирования на примере следующих структур: тексты, журналы событий информационных систем, реляционные базы данных, растровые изображения.
Ключевые слова: комбинаторная генерация, дерево И/ИЛИ, кодирование, сжатие данных без потерь, биекция.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-74-79

Развитие информационных технологий и цифровизация всех сфер жизни человека приводят к экспоненциальному росту производимой, обрабатываемой и хранимой информации. Следовательно, существует потребность в развитии существующего и разработке нового математического, алгоритмического и программного обеспечения для организации соответствующих информационных процессов.

Информационные процессы, такие как хранение и обработка информации, тесно связаны с понятием кодирования информации [1]. Кодирование информации реализует переход от одного способа представления информации к другому, при этом допускается восстановление информации в исходной форме. Применение методов кодирования информации может быть вызвано следующими целями:

– преобразование информации в форму, удобную для последующей ее передачи или обработки;

– сжатие данных для организации рационального хранения информации;

– обеспечение свойства конфиденциальности информации (шифрование данных);

– обеспечение свойства целостности информации (помехоустойчивое кодирование).

В рамках данной статьи рассматривается задача кодирования информации с целью сжатия данных. Существует огромное количество методов сжатия данных, каждый из которых имеет свою специфику с точки зрения используемого математического аппарата, а также имеются различные ограничения на их применимость и эффективность. Перечень существующих методов сжатия данных и их описание можно найти в тематических научных монографиях, например в [2, 3]. Кроме того, регулярно появляются новые разработки в области методов сжатия данных. Например, на основе популярной в последние годы темы нейронных сетей и больших языковых моделей был разработан эффективный метод сжатия файлов с текстовыми данными, демонстрирующий лучшую степень сжатия по сравнению с существующими методами [4]. Таким образом, ввиду отсутствия возможности создания универсального и эффективного метода сжатия данных остается актуальной задача разработки новых методов сжатия.

Сжатие данных и комбинаторная генерация

Если обрабатываемый информационный объект (сущность, содержащая информацию) представляет собой описание сложной дискретной структуры, то конечное множество таких структур при фиксированных значениях параметров формирует так называемое комбинаторное множество. Комбинаторная генерация является научным направлением, в рамках которого рассматривается процесс получения алгоритмов генерации элементов комбинаторных множеств [5, 6]. В то же время такие классы алгоритмов комбинаторной генерации, как ранжирование (ranking) и генерация по рангу (unranking), позволяют задать биективное отображение между комбинаторным множеством и ограниченным подмножеством множества целых чисел. Следовательно, на основе алгоритмов комбинаторной генерации можно также организовать процесс кодирования информационных объектов, представляющих собой сложные дискретные структуры. В общем виде схема кодирования с целью сжатия данных на основе алгоритмов комбинаторной генерации была описана в [7]. На рис. 1 схематично изображен процесс кодирования информационного объекта a, принадлежащего множеству A, значением ранга r, полученным с помощью алгоритма ранжирования. Также указано обратное восстановление объекта a из значения ранга r за счет применения алгоритма генерации по рангу.

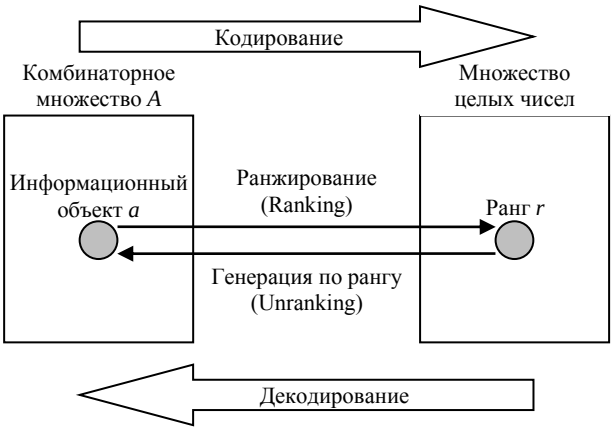


Рис. 1. Кодирование информации с помощью алгоритмов комбинаторной генерации

В рамках работы алгоритма ранжирования задается некоторое упорядочивание элементов рассматриваемого комбинаторного множества. Таким образом, значение ранга *r* представляет собой порядковый номер информационного объекта в упорядоченном ряду всех элементов комбинаторного множества. Обозначим через |*A*| количество всех объектов, содержащихся в комбинаторном множестве *A*. Тогда значение ранга *r* для произвольного объекта *a* комбинаторного множества *A* принадлежит множеству {0, 1, …, |*A*| – 1}. Следовательно, чтобы хранить значение одного ранга *r*, достаточно

$$S_1 = \lceil \log_2 |A| \rceil \text{ бит.}$$

Дополнительно обозначим через S_2 количество бит, требуемых для хранения информационного объекта *a* в исходной форме представления. Следовательно, если $S_2 > S_1$, то в результате кодирования происходит сжатие данных, т.е. получаем значение коэффициента сжатия

$$K = \frac{S_2}{S_1}$$

больше единицы. При этом имеются следующие закономерности касаемо качества сжатия:

– чем сложнее описание структуры информационного объекта, тем больше требуется количества бит памяти для его хранения (т.е. увеличивается значение S_2), что приводит к увеличению коэффициента сжатия;

– чем более разнообразна структура информационных объектов, тем больше элементов содержится в комбинаторном множестве *A* (т.е. увеличивается значение |A| и, как следствие, увеличивается значение S_1), что приводит к уменьшению коэффициента сжатия.

Заметим, что данный вариант сжатия данных за счет выполнения алгоритмов комбинаторной генерации относится к классу методов сжатия без потерь, так как алгоритм генерации по рангу восстанавливает исходный информационный объект без каких-либо изменений.

Пример использования подхода к сжатию данных на основе алгоритмов комбинаторной генерации представлен в [8]. В данном случае была рассмотрена конкретная задача сжатия измерительной информации, обрабатываемой системой геомониторинга подвижных объектов. При этом предложенный алгоритм сжатия базируется на представлении измерительной информации в виде сочетания символов фиксированного алфавита.

Кроме того, имеются предпосылки к созданию универсального метода сжатия данных на основе алгоритмов комбинаторной генерации [9]. В данном случае исследуется возможность построения формальной грамматики, правила вывода которой позволят сформировать последовательность бит рассматриваемого файла. Далее с помощью алгоритма ранжирования для последовательности примененных правил вывода реализуется кодирование файла.

Наличие подобных исследований подтверждает актуальность модернизации существующих и разработки новых методов сжатия данных, в том числе на основе ранее неиспользованного математического аппарата. Целью данного исследования является изучение возможностей разработки методов сжатия данных без потерь с помощью методов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ.

Сжатие данных и комбинаторная генерация на основе деревьев И/ИЛИ

Деревья И/ИЛИ представляют собой древовидную структуру данных, узлы которой относятся к одному из следующих типов узлов [10, 11]:

– ИЛИ-узел: соответствует математической операции сложения натуральных чисел, представляется узлом с конечным количеством узлов-потомков;

– И-узел: соответствует математической операции умножения натуральных чисел, представляется узлом с конечным количеством узлов-потомков, ребра к которым графически объединяются дополнительной линией.

Кроме того, структура дерева И/ИЛИ может содержать конечные узлы (листья), которые не содержат узлов-потомков.

Особенностью деревьев И/ИЛИ является наличие множества вариантов, формируемых заданной структурой дерева И/ИЛИ. Вариант дерева И/ИЛИ представляет собой структуру, полученную из исходной структуры дерева И/ИЛИ путем выбора одного узла-потомка для каждого ИЛИ-узла и удаления всех невыбранных узлов-потомков ИЛИ-узлов, включая их поддеревья. Также для множества вариантов произвольной структуры дерева И/ИЛИ известны правила построения алгоритмов их ранжирования и генерации по рангу [12].

Если для рассматриваемого комбинаторного множества имеется выражение функции мощности, которая состоит из перечня допустимых операций, то по ее виду можно построить соответствующую структуру дерева И/ИЛИ. К допустимым операциям относятся сложение и умножение натуральных чисел, а также композиция с другими функциями, удовлетворяющими данным условиям, в том числе рекурсивная композиция. Количество вариантов такого дерева И/ИЛИ равно количеству элементов рассматриваемого комбинаторного множества. Если задать биективное отображение комбинаторного множества на множество вариантов соответствующей структуры дерева И/ИЛИ, то становится возможной реализация алгоритмов ранжирования и генерации по рангу для исходного комбинаторного множества. Таким образом, вариант дерева И/ИЛИ будет являться некоторой промежуточной формой представления для кодируемого информационного объекта. Заметим, что хранение большого количества вариантов деревьев И/ИЛИ, требующее их оперативной обработки (например, при реализации идентификации и прослеживаемости сложных технических изделий [13]), может быть реализовано с использованием функционала реляционных баз данных [14].

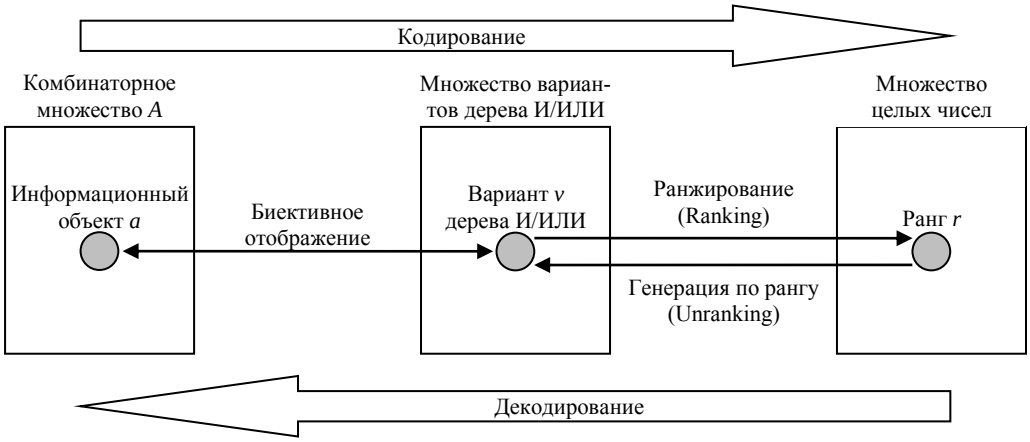


Рис. 2. Кодирование информации с помощью алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ

На рис. 2 схематично изображены процессы кодирования и декодирования информационного объекта *a* с помощью алгоритмов комбинаторной генерации с использованием промежуточной формы представления в виде варианта *v* дерева И/ИЛИ.

Если в результате такого кодирования количество бит, требуемых для хранения вычисленного значения ранга *r*, меньше количества бит, требуемых для хранения информационного объекта *a* в исходной форме представления, то реализуется сжатие данных. Таким образом, используя представленную схему кодирования с помощью методов комбинаторной генерации, можно решать задачу сжатия данных без потерь для информационных объектов, представляющих собой сложные дискретные структуры с биективным отображением на деревья И/ИЛИ. Примерами таких информационных объектов служат как общие математические структуры (перестановки и сочетания элементов множества, подмножества, деревья, решеточные пути, выражения формальных языков и др.), так и структуры, связанные с прикладным программным обеспечением (например, текстовые сообщения, журналы событий информационных систем, реляционные базы данных, растровые изображения). Далее рассмотрим особенности реализации метода сжатия данных на примерах подходящих типов структур.

Сжатие текстовых файлов

С математической точки зрения простой текстовый файл представляет собой конкатенацию символов, взятых из некоторого конечного множества символов (алфавит). То есть текстом является строка $t = t_1 t_2 \ldots t_n$, состоящая из n символов t_i ($i = \overline{1,n}$), принадлежащих алфавиту $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_m\}$, содержащему m различных символов s_j ($j = \overline{1,m}$), $t_i \in S$. Множество всех возможных текстов длины n символов с использованием алфавита m символов формирует комбинаторное множество $A_{n,m}$, мощность которого определяется следующим выражением:

$$\left|A_{n,m}\right| = m^n = \underbrace{m \cdot m \cdot \ldots \cdot m}_{n \text{ раз}}. \qquad (1)$$

Комбинаторное доказательство формулы (1) заключается в том, что каждому символу t_i текста на выбор предоставляется один из m возможных вариантов. При этом аналогичный выбор необходимо осуществить для каждого из n символов текста.

На рис. 3 представлена структура дерева И/ИЛИ, полученная на основе формулы (1). Корневой узел данной структуры является И-узлом и содержит n узлов-потомков, помеченных t_i. При этом каждый такой узел является ИЛИ-узлом и содержит m узлов-потомков, которые также являются конечными узлами.

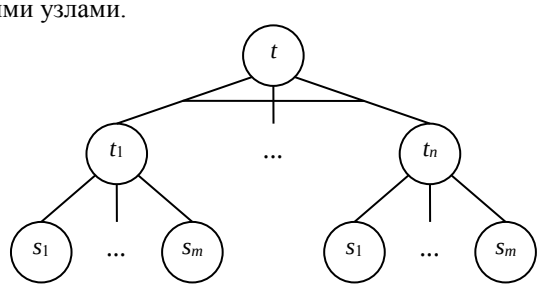


Рис. 3. Структура дерева И/ИЛИ для текста *t* на основе формулы (1)

На рис. 4 в общем виде показана структура варианта дерева И/ИЛИ, представленного на рис. 3. В данном случае у каждого ИЛИ-узла, помеченного t_i, оставлен только один узел-потомок, что соответствует выбору конкретного символа из упорядоченного алфавита $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_m\}$ для i-го символа текста, т.е. $t_i = s_{li}$.

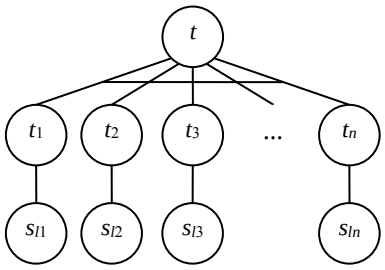


Рис. 4. Структура варианта дерева И/ИЛИ для текста *t* на основе формулы (1)

Таким образом, любой текст $t = t_1 t_2 \ldots t_n$ может быть преобразован в соответствующий ему вариант дерева И/ИЛИ, полученного на основе формулы (1). При этом упорядоченный алфавит $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_m\}$ может быть задан вне зависимости от кодируемого текста (какой-либо универсальный алфавит) или создан на основе самого текста. Тогда ранжирование реализуется следующим образом:

Ranking($t = t_1 t_2 \ldots t_n$, $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_m\}$):
  if $n = 0$ **then** $r := 0$
  else
    $r :=$ значение l, при котором $t_n = s_l$
    for $i := n-1$ **to** 1 **step** -1 **do**
      $l :=$ значение l, при котором $t_i = s_l$
      $r := l + m \cdot r$
  return r

Если кодируемый текст является длинным, то для упрощения вычислительных операций можно реализовать блочное кодирование. В таком случае текст разбивается на блоки (тексты меньшей длины), каждый из которых кодируется путем ранжирования соответствующего варианта дерева И/ИЛИ.

В качестве вычислительного эксперимента было проведено сжатие текстового файла «alice29.txt». Данный файл содержит 152089 символов, составляющих алфавит из 73 уникальных символов. Объем несжатого файла составляет 152089 КБ. При использовании ранжирования с разделением на блоки длиной 8 символов объем файла, содержащего информацию об алфавите и рангах каждого блока, составил 116009 КБ. Следовательно, коэффициент сжатия равен 1,31. Кроме того, полученные после ранжирования файлы также могут быть подвергнуты дополнительному сжатию за счет применения других методов сжатия бинарных файлов.

Сжатие журналов событий информационных систем

Подробное описание исследования, связанного с применением теории комбинаторной генерации на основе структур деревьев И/ИЛИ к задаче сжатия данных журналов событий, представлено в [15]. Простейшая реализация журнала событий представляет собой текстовый файл, который имеет определенную структуру:

– каждая строка является одной записью журнала событий (если зафиксировать архив журнала событий за некоторый промежуток времени, то он содержит *n* различных записей);

– каждая запись журнала событий содержит дату и время зарегистрированного в системе события, а также набор значений атрибутов, характеризующих данное событие (событие определяется набором значений *k* атрибутов).

Кроме того, значениям атрибутов свойственно иметь ограниченное разнообразие возможных значений (так как системой регистрируются типовые события). Это приводит к значительному дублированию информации в файле журнала событий.

Сжатие журнала событий с помощью алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ реализуется следующим образом (рис. 5):

1. Для каждого атрибута (кроме даты и времени) создаются справочники уникальных значений. Дата и время не подвергаются сжатию, так как имеется низкая степень дублирования значений.

2. На основе сформированных справочников для каждой записи набор значений ее атрибутов заменяется на кортеж идентификаторов (т.е. выполняется нормализация записей журнала событий).

3. С помощью алгоритма ранжирования для каждой записи ее кортеж идентификаторов трансформируется в значение ранга соответствующего варианта дерева И/ИЛИ (аналогично работе [16]).

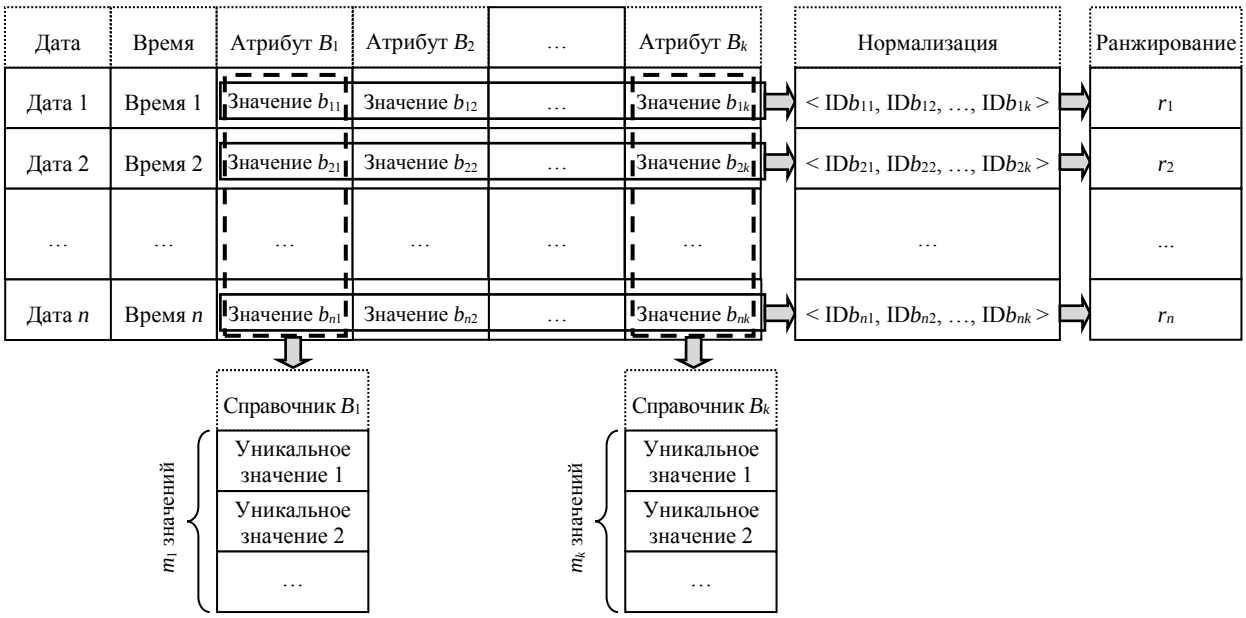


Рис. 5. Кодирование журнала событий с помощью алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ

Таким образом, сжатая версия журнала событий представляет собой комбинацию файлов, содержащих информацию о структуре атрибутов сжатого журнала событий, а также файлов-справочников и файла с датой, временем и вычисленным рангом для каждой записи. Заметим, что отличие процесса сжатия журналов событий от сжатия текстовых файлов заключается в следующем:

– кодируемым блоком текста выступает одна запись журнала событий;

– единый алфавит символов меняется на набор справочников уникальных значений атрибутов.

Сжатие реляционной базы данных

Метод сжатия журналов событий с применением теории комбинаторной генерации на основе структур деревьев И/ИЛИ может быть использован при решении задачи сжатия файла реляционной базы данных. Реляционная база данных представляет собой совокупность иерархически связанных таблиц, при этом структура каждой таблицы аналогична рассмотренной выше структуре журнала событий (таблица содержит множество записей, каждая из которых формируется набором значений соответствующих атрибутов). Таким образом, можно проранжировать записи для каждой таблицы по отдельности. При этом для каждой таблицы формируются справочники уникальных значений атрибутов без учета атрибутов с внешними ключами, так как они ссылаются на первичные ключи, которые уже хранятся в соответствующих справочниках.

Сжатие растровых изображений

Существует большое разнообразие алгоритмов сжатия цифровых изображений, допускающих потери при их обратном восстановлении [17, 18]. Применение методов комбинаторной генерации позволяет организовать сжатие изображений без потерь.

Растровое изображение представляет собой совокупность расположенных определенным образом пикселей, каждый из которых имеет свой цвет. При этом количество пикселей с уникальным цветом обычно намного меньше общего количества пикселей в изображении, что приводит к дублированию хранимой информации. Таким образом, аналогом алфавита текста для изображения выступает использованная в нем палитра (набор пикселей с уникальным цветом). Далее на основе сформированной палитры каждый пиксель изображения заменяется на идентификатор (порядковый номер цвета пикселя в палитре). В результате с помощью алгоритма ранжирования набор идентификаторов трансформируется в значение ранга соответствующего варианта дерева И/ИЛИ. При этом доступно как вычисление единого значения ранга для всего изображения (требует организации работы с типом данных целых чисел произвольной длины), так и вычисление ранга для каждого отдельного блока изображения.

Заключение

Таким образом, представленная схема кодирования с помощью методов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ позволяет решать задачу сжатия данных без потерь для различных классов информационных объектов.

Заметим, что при наличии функции мощности комбинаторного множества, принадлежащей классу полиномиальной вычислительной сложности, соответствующий алгоритм кодирования также будет иметь полиномиальную сложность. Все представленные в статье ситуации кодирования информационных объектов подходят под данное условие, т.е. имеют полиномиальную оценку вычислительной сложности. Кроме того, блочное кодирование может быть реализовано с использованием параллельных вычислений, что также ускорит время работы алгоритмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-71-10052.

Литература

1. Марков А.А. Введение в теорию кодирования. – М.: Наука, 1982. – 192 с.

2. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.

3. Salomon D. Handbook of data compression / D. Salomon, G. Motta. – USA: Springer, 2010. – 1360 p.

4. Bellard F. Lossless data compression with neural networks. – 2019. – 11 p. – URL: https://bellard.org/nncp/nncp.pdf (дата обращения: 01.12.2024).

5. Kreher D.L. Combinatorial algorithms: generation, enumeration, and search / D.L. Kreher, D.R. Stinson. – USA: CRC Press, 1999. – 342 p.

6. Ruskey F. Combinatorial generation. – 2003. – 311 p. – URL: https://page.math.tu-berlin.de/~felsner/SemWS17-18/Ruskey-Comb-Gen.pdf (дата обращения: 01.12.2024).

7. Goldberg A.V. Compression and ranking / A.V. Goldberg, M. Sipser // SIAM Journal on Computing. – 1991. – Vol. 20, No. 3. – P. 524–536.

8. Гришин М.Л. Методы построения информационно-измерительных систем глобального геомониторинга подвижных объектов в реальном времени: дис. … канд. техн. наук. – Тула, 2012. – 168 с.

9. Grammar compression with probabilistic context-free grammar / H. Naganuma, D. Hendrian, R. Yoshinaka, A. Shinohara, N. Kobayashi // 2020 Data Compression Conference. – IEEE, 2020. – 11 p.

10. Кручинин В.В. Метод кодирования информационных объектов на основе деревьев И/ИЛИ / В.В. Кручинин, Б.А. Люкшин // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 1. – С. 170–172.

11. Кручинин В.В. Методы построения алгоритмов генерации и нумерации комбинаторных объектов на основе деревьев И/ИЛИ. – Томск: В-Спектр, 2007. – 200 с.

12. Shablya Y. Method for developing combinatorial generation algorithms based on AND/OR trees and its application / Y. Shablya, D. Kruchinin, V. Kruchinin // Mathematics. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – Article 962.

13. Токарева А.В. Модификация метода идентификации и прослеживаемости сложных технических изделий с применением алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ / А.В. Токарева, Д.В. Кручинин // Вестник СибГУТИ. – 2024. – Т. 18, № 3. – С. 73–85.

14. Шабля Ю.В. Способы хранения структур деревьев И/ИЛИ и их вариантов в оперативной и постоянной

компьютерной памяти / Ю.В. Шабля, А.В. Токарева // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 44–50.

15. Шабля Ю.В. Метод сжатия данных журналов событий на основе теории комбинаторной генерации с применением структур деревьев И/ИЛИ // Современные информационные технологии и ИТ образование. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 564–574.

16. Кручинин В.В. Подходы к созданию защищенного архива на основе разделения секрета / В.В. Кручинин, А.А. Шелупанов // Доклады ТУСУР. – 2008. – № 2, ч. 1. – С. 67–72.

17. Евсютин О.О. Сжатие цифровых изображений, используемых в геоинформационной системе электронного генерального плана промышленного предприятия / О.О. Евсютин, М.М. Милихин // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2. – С. 224–229.

18. Кулбаев С.С. Оценка эффективности сервиса сжатия цифровых изображений на высокопроизводительной вычислительной системе / С.С. Кулбаев, А.А. Немеров, А.С. Крупский // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 4. – С. 142–146.

Шабля Юрий Васильевич
Канд. техн. наук, с.н.с. лаб. алгоритмов и технологий исследования дискретных структур (ЛАТИДС)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-9695-7493
Тел.: +7-906-949-03-07
Эл. почта: syv@fb.tusur.ru

Shablya Y.V.

Compression of information objects using combinatorial generation methods based on AND/OR trees

This article discusses the problem of lossless data compression using combinatorial generation methods based on AND/OR trees. It presents a scheme for encoding information objects that are complex discrete structures with bijective mapping onto AND/OR trees. In addition, the features of the encoding process implementation are demonstrated using the following structures as an example: texts, information system event logs, relational databases, and raster images.

Keywords: combinatorial generation, AND/OR tree, encoding, lossless data compression, bijection.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-74-79

References

1. Markov A.A. *Vvedeniye v teoriyu kodirovaniya* [Introduction to coding theory]. Moscow, Nauka Publishers, 1982, 192 p. (in Russ.).

2. Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M., Yoockin V. *Metody szhatiya dannykh. Ustroystvo arkhivatorov, szhatiye izobrazheniy i video* [Data compression methods. Organization of archivers, image and video compression]. Moscow, Dialog-MIFI, 2003. 384 p. (in Russ.).

3. Salomon D., Motta G. *Handbook of Data Compression*. USA, Springer, 2010, 1360 p.

4. Bellard F. *Lossless Data Compression with Neural Networks*. 2019. 11 p. Available at: https://bellard.org/nncp/nncp.pdf, free (Accessed: December 01, 2024).

5. Kreher D.L., Stinson D.R. *Combinatorial Algorithms: Generation, Enumeration, and Search*. USA, CRC Press, 1999, 342 p.

6. Ruskey F. *Combinatorial Generation*. 2003. 311 p. Available at: https://page.math.tu-berlin.de/~felsner/SemWS17-18/Ruskey-Comb-Gen.pdf, free (Accessed: December 01, 2024).

7. Goldberg A.V., Sipser M. Compression and ranking. *SIAM Journal on Computing*, 1991, vol. 20, no. 3, pp. 524–536.

8. Grishin M.L. *Metody postroyeniya informatsionno-izmeritelnykh sistem globalnogo geomonitoringa podvizhnykh obyektov v realnom vremeni. Diss. kand. nauk* [Methods of constructing information-measuring systems for global geomonitoring of moving objects in real time. Dissertation for the Candidate of Science degree]. Tula, 2012, 168 p. (in Russ.).

9. Naganuma H., Hendrian D., Yoshinaka R., Shinohara A., Kobayashi N. *Grammar compression with probabilistic context-free grammar*. 2020 Data Compression Conference. IEEE, 2020.

10. Kruchinin V.V., Lukschin B.A. [Method of coding of information objects on the basis of trees and or]. *Proceedings* of TUSUR University, 2010, no. 1(21), pp. 170–172 (in Russ.).

11. Kruchinin V.V. *Metody postroyeniya algoritmov generatsii i numeratsii kombinatornykh obyektov na osnove derevyev I/ILI* [Methods for constructing algorithms for generating and numbering combinatorial objects based on AND/OR trees]. Tomsk, V-Spektr, 2007, 200 p. (in Russ.).

12. Shablya Y., Kruchinin D., Kruchinin V. Method for developing combinatorial generation algorithms based on AND/OR trees and its application. *Mathematics*, 2020, vol. 8, no. 6, Article 962.

13. Tokareva A.V., Kruchinin D.V. [Modification of the method for identifying and tracing complex technical products using combinatorial generation algorithms based on AND/OR trees]. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*, 2024, vol. 18, no. 3, pp. 73–85 (in Russ.).

14. Shablya Y.V., Tokareva A.V. [Methods for storing AND/OR tree structures and their variants in RAM and ROM]. *Proceedings of TUSUR University*, 2024, vol. 27, no. 2, pp. 44–50 (in Russ.).

15. Shablya Y.V. [A method for compressing event log da-ta based on combinatorial generation using AND/OR tree structures]. *Modern Information Technologies and IT-education*, 2023, vol. 19, no. 3, pp. 564–574 (in Russ.).

16. Kruchinin V.V., Shelupanov A.A. [Approaches to designing protected archives based on secret division]. *Proceedings of TUSUR University*, 2008, no. 2, pp. 67–72 (In Russ.).

17. Evsutin O.O., Milikhin M.M. [Compression of digital images, used in geo-information system of electronic general plan in an industrial enterprise]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 2, pp. 224–229 (in Russ.).

18. Kulbaev S.S., Nemerov A.A., Krupsky A.S. [Efficiency evaluation of the service of digital image compressing on high-performance computing system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2013, no. 4, pp. 142–146 (in Russ.).

Yuriy V. Shablya
Candidate of Sciences in Engineering, Senior Researcher,
Laboratory of Algorithms and Technologies for Discrete Structures Research, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-9695-7493
Phone: +7-906-949-03-07
Email: syv@fb.tusur.ru

УДК 004.457

П.А. Василевский, Е.В. Булгакова

Анализ существующих подходов к автоматизации применения стандартов CIS Controls и их ограничений

Проводится анализ существующих инструментов автоматизации стандартов CIS Controls на базе bash, включая их функциональные возможности и ограничения при применении в корпоративных средах. Рассматриваются такие инструменты, как Ubuntu Security Guide, JShielder, Aqua Security CIS Benchmarks и JAMF Compliance Reporter. Указанные решения, хотя и эффективны для выполнения требований безопасности, сталкиваются с проблемами масштабирования и централизованного управления, что ограничивает их применение в гетерогенных системах. В заключении статьи обоснована целесообразность использования инструмента, такого как Ansible, обладающего возможностями для централизованного управления и автоматизированного аудита, что позволяет обеспечить непрерывное соблюдение требований CIS в крупных корпоративных инфраструктурах.

Ключевые слова: автоматизация, CIS Controls, Ansible, безопасность информации, bash, корпоративные системы, DevOps.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-80-87

Автоматизация выполнения рекомендаций CIS Controls становится важной задачей для организаций, стремящихся к повышению уровня безопасности своей инфраструктуры. CIS Controls представляют собой набор передовых рекомендаций для защиты информационных систем, разработанных Центром интернет-безопасности (CIS) [1]. Данные рекомендации охватывают основные меры защиты операционных систем, сетевых устройств и приложений, которые служат для снижения рисков и повышения устойчивости к угрозам. Внедрение CIS Controls требует регулярной проверки и настройки множества параметров, что особенно актуально для крупных компаний с разнообразной инфраструктурой, где уровень автоматизации напрямую влияет на эффективность и безопасность [2].

Многие существующие подходы к автоматизации выполнения CIS Controls чаще всего реализуются на основе bash-скриптов, выполняющих ряд стандартных операций для настройки безопасности серверов [3] и контейнеров [4]. Однако с ростом инфраструктуры bash-скрипты сталкиваются с рядом проблем: высокая вероятность ошибок при внесении изменений, необходимость частого обновления скриптов и сложность управления конфигурациями на множестве хостов. Данный ряд проблем приводит к тому, что выполнение требований CIS становится затруднительным и требует значительных ресурсов, особенно в случаях, когда необходимо масштабировать решения на несколько сотен или тысяч серверов.

Bash-скрипты позволяют автоматизировать базовые настройки безопасности: изменение прав доступа, настройку брандмауэров, усиление SSH, установку и настройку антивирусных и мониторинговых инструментов. Однако bash-скрипты часто ограничены в плане расширяемости и требуют дополнительного времени и усилий на адаптацию к разным конфигурациям систем. Кроме того, управление конфигурациями безопасности с помощью bash требует регулярного обновления скриптов и ручного управления, что увеличивает риск несоответствия стандартам безопасности в случае ошибок или изменений.

Использование Ansible в качестве альтернативы позволяет устранить многие ограничения, присущие bash-скриптам, благодаря структурированной системе плейбуков и централизованному управлению конфигурациями. Ansible не требует установки агентов на целевые хосты, что значительно упрощает управление в больших сетях. Благодаря своим функциональным модулям Ansible может обеспечить удобное внедрение CIS Controls, включая управление учетными записями, настройку политики аудита, усиление сетевой безопасности и контроль доступа [7, 8]. Подобные возможности предоставляет и MaxPatrol, позволяя выполнять удаленное сканирование узлов для проверки их конфигураций на соответствие требованиям безопасности CIS. В отличие от Ansible, MaxPatrol ориентирован на комплексный аудит и анализ уязвимостей, поддерживает различные режимы проверки, включая тестирование на проникновение и аудит соответствия стандартам. Несмотря на очевидные преимущества Ansible и MaxPatrol, традиционные bash-инструменты попрежнему остаются распространенными и востребованными.

Выбор подходящих инструментов автоматизации зависит от множества факторов: типа инфраструктуры, требований к масштабу и необходимости поддерживать соответствие стандартам на высоком уровне. Специалисты сталкиваются с необходимостью ответить на вопросы, которые определяют успешное внедрение автоматизации безопасности.

В небольших и средних инфраструктурах актуально использование простых bash-скриптов для выполнения базовых требований безопасности, но возникает вопрос, достаточно ли их возможностей и каким ограничениям они подвержены. В случае облачных и контейнерных сред возникает другая задача – как эффективно использовать специализированные инструменты, ориентированные на обеспечение безопасности контейнеров и облаков, которые

требуют отдельного подхода к настройке и мониторингу. В крупных же корпоративных системах акцент смещается на централизованное управление безопасностью и масштабируемость, что требует решений, позволяющих автоматизировать аудит и обеспечивать непрерывный контроль конфигураций.

С появлением таких универсальных инструментов, как Ansible, встает вопрос, как их использование может упростить соблюдение стандартов безопасности в гетерогенных и сложных инфраструктурах. Данная статья направлена на исследование этих аспектов и поможет определить, какие инструменты лучше подходят для различных типов корпоративных сред и как их можно эффективно использовать для соблюдения CIS Controls.

Локальные инструменты автоматизации безопасности на основе Bash

В малых и средних инфраструктурах часто применяются локальные решения для настройки безопасности, такие как bash-скрипты и другие базовые инструменты. Они позволяют автоматизировать основные процессы настройки безопасности на уровне хоста, хотя имеют ограничения по масштабируемости и гибкости. Эти инструменты могут быть полезны для небольших сред, где требуется быстрое и простое внедрение базовых настроек безопасности. К таким инструментам относятся Ubuntu Security Guide и JShielder.

Ubuntu Security Guide (USG) – это инструмент от компании Canonical для управления безопасностью и аудита серверов на базе операционных систем Ubuntu LTS в соответствии с требованиями CIS Benchmarks и DISA STIG. USG позволяет администраторам автоматизировать процесс настройки безопасности. Данный инструмент ориентирован на версии Ubuntu LTS 18.04, 20.04, что делает его универсальным и гибким инструментом для управления безопасностью корпоративных систем [5].

USG включает в себя возможности аудита и коррекции системных настроек, а также поддержку так называемых tailoring files – профилей, которые позволяют настраивать и модифицировать стандартные требования. Данный подход дает администраторам адаптировать систему под конкретные потребности инфраструктуры, например, когда стандартные профили блокируют использование определенных файловых систем или сервисов, которые критически важны для компании. Tailoring files являются особым преимуществом, поскольку они позволяют соблюдать баланс между безопасностью и требованиями операционной среды [6]

USG позволяет проводить автоматический аудит системного соответствия требованиям CIS и генерацию отчетов, которые показывают степень выполнения стандартов безопасности на сервере. После выполнения аудита инструмент может автоматически применять исправления, которые соответствуют предустановленным профилям, таким как cis_level1_server для серверов и cis_level1_workstation для рабочих станций. Это особенно полезно для организаций, где политики безопасности требуют постоянного соответствия CIS, что минимизирует риски и усилия на ручную настройку и контроль безопасности.

Использование USG также упрощает выполнение требований безопасности в DevOps-процессах и CI/CD-конвейерах, где безопасность и проверка системы должны быть интегрированы в каждый этап разработки.

Несмотря на свои преимущества, USG имеет ряд недостатков, которые могут повлиять на его эффективность в реальных условиях: 1) ручная установка и настройка: каждая машина требует индивидуальной установки и настройки USG, что может стать времязатратным процессом, особенно в больших организациях. Это увеличивает риск ошибок и затрудняет управление безопасностью в инфраструктуре; 2) зависимость от версий: USG ориентирован на конкретные версии Ubuntu LTS, что может ограничить его применение в смешанных средах с другими дистрибутивами.

JShielder представляет собой инструмент, разработанный для автоматизации настройки Linux-серверов в соответствии с рекомендациями CIS. Он позволяет системным администраторам и разработчикам упрощать настройку серверов и обеспечивать их безопасность с минимальным взаимодействием со стороны пользователя. JShielder является скриптом на bash, который выполняет широкий спектр задач, направленных на укрепление безопасности [7, 8].

Основная функциональность JShielder включает настройку имени хоста, обновление системы, создание новых учетных записей администратора и защиту SSH-сервера. Скрипт также настраивает правила IPTABLES для защиты от распространенных атак и обеспечивает защиту от атак методом подбора паролей с помощью установки и настройки Fail2ban. JShielder предоставляет возможности для установки и настройки популярных веб-серверов, таких как Apache и MySQL, а также устанавливает инструменты для аудита безопасности, такие как RootKit Hunter и Tiger, что позволяет эффективно отслеживать и предотвращать угрозы безопасности [9].

Инструмент ориентирован на упрощение процесса настройки серверов и обеспечивания их безопасности для различных дистрибутивов Ubuntu, включая версии 14.04 и 16.04 LTS.

Несмотря на свою функциональность, JShielder имеет недостатки и ограничения: 1) зависимость от конфигураций: JShielder может не учитывать специфические конфигурации систем, что может привести к недостаточной защите в определенных случаях. Администраторы должны быть внимательны к индивидуальным особенностям своих систем и вносить необходимые изменения вручную; 2) совместимость с другими дистрибутивами: JShielder ориентирован на системы Ubuntu, что ограничивает его применение в смешанных средах с другими дистрибутивами Linux. Это может создать сложности для организаций, использующих разнообразные систе-

мы; 3) необходимость установки на каждом хосте: JShielder требует индивидуальной установки на каждом хосте, что может стать времязатратным процессом в больших организациях. Это увеличивает риск ошибок и затрудняет управление безопасностью в инфраструктуре.

Инструменты автоматизации безопасности для облачных и контейнерных сред

Облачные и контейнерные среды требуют особого подхода к безопасности, учитывая их подвижность и гибкость. Специализированные инструменты для таких сред позволяют выполнять аудит и настройку безопасности, а также контролировать соответствие требованиям CIS на уровне контейнеров и виртуальных машин. Данные решения позволяют эффективно управлять безопасностью в мультиоблачных инфраструктурах, что делает их особенно полезными для DevOps и CI/CD-процессов. Одним из таких инструментов является Aqua Security CIS Benchmarks.

Aqua Security CIS Benchmarks – это инструмент, представляющий собой набор стандартов безопасности, созданный специально для защиты контейнеров и облачной инфраструктуры. Данный инструмент служит важным ресурсом для организаций, стремящихся обеспечить безопасность своих приложений и данных, размещённых в контейнерах и облачных средах. Aqua Security предоставляет рекомендации, соответствующие требованиям CIS [10].

Основные характеристики Aqua Security CIS Benchmarks [11–13]: 1) комплексный подход к безопасности контейнеров: Aqua Security CIS Benchmarks охватывает все аспекты безопасности контейнеров, включая конфигурацию, управление доступом и защиту на уровне сети. Это делает его особенно полезным для организаций, которые используют контейнеризацию для развертывания своих приложений в современных DevOps- и CI/CD-процессах; 2) инструменты для автоматизации: Aqua Security предоставляет инструменты для автоматизации применения рекомендаций CIS, что позволяет минимизировать ручной труд. Инструменты автоматизации Aqua помогают в быстром развертывании безопасных контейнеров и управлении безопасностью; 3) аудит и мониторинг: Aqua Security обеспечивает постоянный аудит и мониторинг соответствия требованиям CIS. Это позволяет администраторам оперативно выявлять и устранять уязвимости, что критично для обеспечения безопасности в динамичной среде контейнеров; 4) поддержка мультиоблачной среды: Aqua Security CIS Benchmarks поддерживает работу в мультиоблачных средах, что делает его универсальным инструментом для организаций, использующих несколько облачных платформ.

Несмотря на свои преимущества, Aqua Security CIS Benchmarks также имеет некоторые недостатки: 1) сложность настройки: первоначальная настройка и интеграция с существующими системами могут потребовать значительных усилий, особенно для организаций с ограниченными ресурсами; 2) зависимость от версии: Aqua Security может быть ориентирован на конкретные версии контейнеров и облачных платформ, что может ограничить его применение в разнообразных инфраструктурах.

Централизованные инструменты для аудита и мониторинга безопасности в корпоративных сетях

Для крупных корпоративных сетей, где требуется контроль за большим числом устройств и серверов, важную роль играют инструменты для централизованного аудита и мониторинга. Такие решения помогают отслеживать состояние безопасности, выявлять отклонения от стандартов и своевременно устранять уязвимости. Они также позволяют администраторам управлять конфигурацией безопасности с одного централизованного узла, что особенно важно для масштабируемых и сложных инфраструктур. К таким инструментам относятся JAMF Compliance Reporter и MaxPatrol 8.

JAMF Compliance Reporter – это инструмент для аудита и управления безопасностью корпоративных устройств под управлением macOS и Linux, разработанный для обеспечения соответствия стандартам безопасности CIS [14]. Инструмент позволяет автоматизировать процесс аудита безопасности, оценку и мониторинг состояния устройств. Compliance Reporter ориентирован на корпоративные среды, где устройства macOS и Linux требуют соблюдения единых стандартов безопасности.

Основные характеристики JAMF Compliance Reporter [15]: 1) аудит соответствия требованиям CIS: Compliance Reporter оценивает устройства на предмет соответствия рекомендациям CIS и автоматически создает отчеты о соответствии. Это упрощает мониторинг и позволяет администраторам быстро идентифицировать отклонения от стандартов, своевременно устраняя уязвимости JAMF; 2) автоматизация и интеграция: инструмент предоставляет автоматизированные функции аудита и мониторинга, которые легко интегрируются с существующими процессами управления устройствами. Это позволяет организациям объединять контроль за безопасностью с повседневными операциями по управлению устройствами, что экономит время и ресурсы; 3) уведомления в реальном времени: Compliance Reporter отправляет уведомления в режиме реального времени об изменениях в конфигурациях устройств и потенциальных угрозах безопасности; 4) поддержка работы с macOS.

Ограничения и недостатки: 1) высокая стоимость для крупных организаций: использование JAMF Compliance Reporter в больших корпоративных сетях может быть дорогостоящим, особенно в случаях, когда бюджет на безопасность ограничен; 2) необходимость установки на каждом устройстве: Compliance Reporter должен быть установлен на каждом хосте, что может потребовать значительных временных затрат для больших инфраструктур, особенно когда устройства разбросаны по разным географическим регионам.

Система MaxPatrol 8 от компании Positive Technologies представляет собой продвинутый инструмент для автоматизации аудита информационной безопасности, широко применяемый для проверки соблюдения стандартов безопасности и поиска уязвимостей в сетевой инфраструктуре. Одной из ключевых возможностей MaxPatrol является поддержка стандарта CIS Palo Alto Firewall 8 Benchmark, разработанного Центром интернет-безопасности (CIS) [16].

MaxPatrol 8 использует удаленный доступ с применением сетевых транспортов и учетных данных для сканирования устройств, не требуя установки агента на целевых узлах [17]. Данный подход упрощает внедрение системы в крупные сети и позволяет выполнять аудит устройств с минимальными изменениями в инфраструктуре. Основные режимы работы системы включают тестирование на проникновение (PenTest), аудит и проверку на соответствие (Compliance) [16–18]. В режиме Compliance MaxPatrol автоматически определяет и применяет стандарты безопасности, подходящие для каждой системы, анализируя её параметры, такие как версия операционной системы и установленные приложения.

Применение MaxPatrol позволяет автоматизировать процессы аудита и проверки конфигураций на соответствие требованиям безопасности, что ускоряет процесс выявления уязвимостей и упрощает отслеживание изменений в настройках. Система поддерживает создание подробных отчетов, что делает её удобной для использования в крупных корпоративных сетях.

Важно отметить, что MaxPatrol 8 является коммерческим продуктом, требующим приобретения лицензии для использования [17, 18].

Универсальные инструменты автоматизации безопасности и управления конфигурациями

Универсальные инструменты, такие как Ansible, позволяют эффективно управлять конфигурациями безопасности в гетерогенных средах, поддерживая настройку множества хостов одновременно и автоматизируя повторяемые процессы. Они особенно востребованы в масштабируемых инфраструктурах, где критична поддержка централизованного управления и совместимость с CI/CD-процессами. Такие решения позволяют стандартизировать процессы настройки и обеспечить гибкость в выполнении требований безопасности. Одним из таких инструментов является Ansible.

Ansible – это инструмент автоматизации, который позволяет централизованно управлять конфигурациями, безопасностью и состоянием инфраструктуры. Благодаря использованию декларативного подхода к управлению, Ansible обеспечивает простоту, масштабируемость и высокую адаптивность, особенно в средах с множеством хостов, таких как корпоративные инфраструктуры [19]. В отличие от традиционных bash-скриптов и специализированных инструментов, таких как Ubuntu Security Guide, JShielder, Aqua Security CIS Benchmarks и JAMF Compliance Reporter, Ansible решает сразу несколько ключевых задач и проблем, связанных с автоматизацией настроек безопасности и управлением соответствием требованиям CIS Controls.

Во-первых, централизованное управление и автоматизированное развертывание на нескольких хостах. Для традиционных инструментов, работающих на Bash, каждый хост требует индивидуального запуска и настройки, что может стать проблемой в масштабных инфраструктурах. Ansible использует архитектуру без необходимости агента (agentless) и позволяет выполнять команды и playbooks одновременно на нескольких серверах, что значительно сокращает время и снижает риск ошибок при массовом развертывании. Администратору не нужно вручную устанавливать или запускать инструмент на каждом устройстве, как в случае с другими решениями, что значительно упрощает процесс [20].

Вторым преимуществом Ansible являются декларативный подход и повторяемость. Ansible использует плэйбуки, которые описывают желаемое состояние системы и автоматически приводят её к этому состоянию. Это отличается от императивного подхода, используемого в большинстве bash-скриптов, где требуется точно прописывать каждый шаг настройки. С помощью плэйбуков Ansible позволяет создать стандартизированные шаблоны настройки, что особенно полезно при управлении безопасностью на большом количестве серверов. Это помогает избежать ошибок, свойственных ручным или пошаговым скриптам, и обеспечивает повторяемость и воспроизводимость результатов на всех узлах.

Третье ключевое преимущество – интеграция Ansible с CI/CD процессами и DevOps-подходом. Ansible можно легко встроить в CI/CD-конвейеры, что позволяет автоматизировать проверки безопасности и корректировки конфигураций на каждом этапе разработки. Например, в отличие от Ubuntu Security Guide, который нацелен на узкие задачи и нуждается в индивидуальной настройке, Ansible предоставляет гибкие и расширяемые роли, которые могут быть включены в процессы сборки, тестирования и развертывания. Это снижает вероятность человеческих ошибок и упрощает соблюдение стандартов безопасности в непрерывных процессах разработки и выпуска [21].

Кроме того, Ansible поддерживает расширяемость и модульность. Например, специализированные инструменты, такие как Aqua Security CIS Benchmarks или JAMF Compliance Reporter, сосредоточены на выполнении узкоспециализированных задач. Ansible, в свою очередь, поддерживает библиотеку готовых ролей и модулей для интеграции с различными системами и сервисами, позволяя адаптировать безопасность для различных операционных систем и приложений. Это делает Ansible более универсальным и удобным для разноплановых корпоративных инфраструктур, где требуется гибкость и возможность подстраиваться под изменения [22, 23].

Использование Ansible снижает зависимость от конкретных дистрибутивов и версий. Ansible легко адаптируется к разным окружениям и версиям ОС. Это делает его более удобным для использования в гетерогенных средах, позволяя администраторам управлять безопасностью независимо от используемой версии операционной системы.

С помощью Ansible администраторы могут автоматизировать выполнение рекомендаций CIS на всех уровнях системы: от конфигурации сети до контроля доступа и управления логированием. Например, Ansible позволяет централизованно управлять политиками паролей, настройками SSH и протоколами защиты сетевых подключений, что соответствует требованиям CIS к управлению доступом. Автоматическое применение изменений и проверка соответствия этим требованиям на нескольких хостах упрощают аудит безопасности и минимизируют вероятность ошибок, вызванных ручными настройками, тем самым создавая более согласованную систему безопасности [21, 23, 24].

Популярность и востребованность Ansible подтверждаются его устойчивым ростом в запросах Google, согласно Google Trends. На графике видно, что с 2015 г. интерес к Ansible заметно вырос, особенно в последние годы (рис. 1).



Рис. 1. Динамика популярности Ansible

Таким образом, Ansible не только преодолевает ограничения, присущие специализированным bash-скриптам и инструментам, но и предоставляет функционал, который улучшает безопасность и управляемость систем. За счет своей гибкости, масштабируемости и интеграции с CI/CD-процессами Ansible является оптимальным выбором для автоматизации CIS Controls в современных корпоративных средах.

Исследование применения инструментов автоматизации для реализации CIS Controls

Для анализа реализации базовых требований CIS Controls (IG1) были выбраны несколько инструментов автоматизации безопасности, совместимых с ОС Linux. В исследовании участвовали пять серверов на различных версиях операционных систем: три сервера на базе Ubuntu (версии 20.04, 22.04 и 18.04 LTS) и два сервера на Debian (версии 11 и 12). Выбор этих дистрибутивов обусловлен их частым использованием в современных корпоративных и IT-инфраструктурах. В отличие от таких решений, как Aqua Security CIS Benchmarks и JAMF Compliance Reporter, которые ориентированы на более узкие области (контейнерные среды и macOS, соответственно), выбранные инструменты обладают большей универсальностью и применимостью к корпоративным средам.

Например, Aqua Security CIS Benchmarks демонстрирует высокую эффективность для контейнеров, а JAMF Compliance Reporter – для macOS, однако их функционал ограничивается этими специфическими платформами. Важно отметить, что JAMF Compliance Reporter может показывать лучшие результаты для macOS, а Aqua Security CIS Benchmarks – для контейнеров, однако их узкая направленность ограничивает их применение в средах с несколькими дистрибутивами Linux. Выбор Ansible, USG и JShielder продиктован необходимостью анализа инструментов, которые способны охватить более широкий спектр систем.

Выбор базовых требований уровня IG1 был обусловлен тем, что он охватывает основные требования к безопасности, необходимые для базовой защиты информационных систем.

Для наглядности оценки эффективности автоматизации учитывалось общее время настройки серверов с использованием каждого из инструментов (рис. 2).

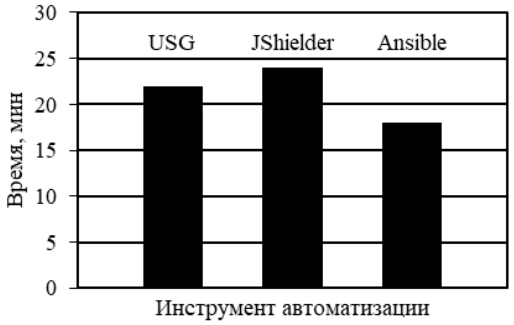


Рис. 2. Время настройки серверов

На графике видно, что Ansible выполнил настройку всех пяти серверов за меньшее время, чем Ubuntu Security Guide и JShielder, которые настраивали только два сервера. Это подчеркивает эффективность Ansible для автоматизации и настройки CIS Controls в крупных инфраструктурах. Результаты проведенного исследования представлены в табл. 1.

Сравнительный анализ инструментов автоматизации CIS Controls

Для наглядного представления функциональных возможностей и особенностей применения различных инструментов автоматизации CIS Controls в корпоративных средах ниже приведена сравнительная таблица. В табл. 2 представлены ключевые параметры, такие как масштабируемость, поддержка CI/CD, централизованное управление и требования к установке агентов.

Таблица 1

Исследование инструментов автоматизации CIS IG1 согласно требованиям на различных дистрибутивах

Номер и имя контроля	Ansible	USG	JShielder
	Серверы		
	Ubuntu 20.04, 22.04, 18.04; Debian 11, 12	Ubuntu 18.04, 20.04	Ubuntu 18.04, 20.04
Настройки разделов (Control 1.1)			
1.1.2.1.3 nosuid на /tmp	Настроено	Не выполнено	Настроено
1.1.2.2.2 nodev на /dev/shm	Настроено	Не выполнено	Настроено
1.1.2.3.1 Отдельный раздел для /home	Настроено	Не выполнено	Не выполнено
1.1.2.5.4 noexec на /var/tmp	Настроено	Не выполнено	Настроено
Политика паролей (Control 3.4)			
Мин. длина, сложность, срок действия	Настроено	Настроено частично	Настроено частично
Контроль сетевых портов (Control 4.1)			
4.1.1 Установка UFW	Настроено	Настроено	Настроено
4.1.3 Включение UFW	Настроено	Настроено	Настроено
4.1.6 Настройка правил для портов	Настроено	Не выполнено	Настроено
SSH Конфигурации (Control 5.1)			
5.1.1 Права на /etc/ssh/sshd_config	Настроено	Не выполнено	Не выполнено
5.1.2 Права на SSH private host key	Настроено	Не выполнено	Не выполнено
5.1.4 Настройка доступа sshd	Настроено	Настроено	Настроено
5.1.14 Настройка LogLevel для sshd	Настроено	Настроено	Настроено
5.1.20 Отключение PermitRootLogin	Настроено	Настроено	Настроено
Настройка логирования (Control 6.4)			
6.4.1.2 Включен auditd	Настроено	Настроено	Настроено
6.4.3.12 Логирование входа и выхода	Настроено	Не выполнено	Не выполнено
6.4.4.1 Права доступа к лог-файлам	Настроено	Не выполнено	Не выполнено

Таблица 2

Сравнение масштабируемости и управляемости инструментов для корпоративных инфраструктур

Инструмент	Масштабируемость	Поддерживаемые ОС	Поддержка CI/CD	Централизованное управление	Потребность в установке
Ubuntu Security Guide	Ограниченная	Ubuntu 16.04, 18.04 LTS, 20.04 LTS	Ограниченная	Нет	Установка на каждом устройстве
JShielder	Ограниченная	Ubuntu 14.04, 16.04	Нет	Нет	Установка на каждом устройстве
Aqua Security CIS Benchmarks	Высокая	Контейнеры, мультиоблачные среды	Ограниченная	Да	Требуются агенты
JAMF Compliance Reporter	Средняя	macOS	Нет	Нет	Установка на каждом устройстве
Ansible	Высокая	Разные ОС, сетевые устройства, контейнеры	Да	Да	Не требуется
MaxPatrol 8	Высокая	Разные ОС, сетевые устройства, контейнеры	Ограниченная	Да	Не требуется

Результаты сравнения применимы к различным типам систем, так как основаны на критериях, характеризующих основные аспекты работы инструментов, таких как масштабируемость, поддержка CI/CD, централизованное управление и требования к установке. Данные параметры описывают ключевые характеристики, которые определяют использование инструментов в облачных, контейнерных, традиционных и других корпоративных инфраструктурах, позволяя соотнести их возможности с потребностями конкретных типов систем.

Заключение

В данной статье рассмотрены существующие инструменты на основе bash для автоматизации CIS Controls и их ограниченные возможности при использовании в крупных корпоративных инфраструктурах. Проведенный анализ показал, что такие инструменты, как Ubuntu Security Guide, JShielder, Aqua Security CIS Benchmarks и JAMF Compliance Reporter, имеют ограничения, связанные с ручной установкой, сложностью масштабирования и недостаточной поддержкой гетерогенных корпоративных сред. Данные ограничения особенно заметны в динамичных системах, требующих высокой гибкости и автоматизации.

Ansible, напротив, предлагает декларативный подход к настройке безопасности, централизованное управление и поддержку CI/CD, что делает его эффективным инструментом для масштабных инфраструктур. Однако Ansible также имеет свои ограничения. Например, его применение требует глубокого знания языка YAML, настройки модулей и написания плейбуков, что может стать барьером для команд без достаточного опыта работы с данным инструментом. Кроме того, для достижения высокой эффективности необходима интеграция Ansible с существующими системами управления и автоматизации, что требует времени и ресурсов.

Сравнительное исследование Ansible, USG и JShielder подтвердило, что Ansible способен полностью реализовать требования CIS Controls на различных платформах, включая Debian, чего не могут достичь его аналоги. Тем не менее настройка Ansible требует значительных усилий на этапе внедрения, что ещё раз подчёркивает его ограниченную применимость в небольших организациях с ограниченными ресурсами.

Таким образом, Ansible, несмотря на свои преимущества, не лишен ограничений, связанных с необходимостью адаптации и обучения. Его использование наиболее эффективно в условиях крупных и сложных систем, где автоматизация и стандартизация критически важны для соответствия требованиям безопасности.

Литература

1. Gros S. Prompting LLM to Enforce and Validate CIS Critical Security Control // Laboratory for Information Security and Privacy, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb. – 2020. – P. 1–7.

2. Mohiuddin A. Proceedings of the 29th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies – 2024: Prompting LLM to Enforce and Validate CIS Critical Security Control / A. Mohiuddin, W. Jinpeng // Association for Computing Machinery. – 2024. – P. 93–104.

3. CIS Debian Linux 12 Benchmark v1.0.1-04-15-2024. – Washington.: Center for Internet Security, 2024. – 1011 p.

4. CIS Docker Benchmark v1.6.0-06-14-2023. – Washington: Center for Internet Security, 2023. – 388 p.

5. Mavrogiannopoulos N. CIS compliance with Ubuntu LTS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://discourse.ubuntu.com/t/cis-compliance-with-ubuntu-lts/26084, свободный (дата обращения: 28.10.2024).

6. Mavrogiannopoulos N. CIS benchmark compliance: Introducing the Ubuntu Security Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ubuntu.com/blog/cis-security-compliance-usg, свободный (дата обращения: 28.10.2024).

7. Limniotis K. Threat Actors' Attack Strategies. Deliverable D2.5, Cyber-Trust Consortium / K. Limniotis, N. Kolokotronis. – Belgium: Horizon–2020, 2018. – 131 p.

8. Jsitech J.S. JShielder Automated Hardening Script for Linux Servers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/Jsitech/JShielder, свободный (дата обращения: 28.10.2024).

9. Esage A.G. JShielder Automated Hardening Script for Linux Servers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.securitynewspaper.com/2018/04/14/jshielder-automated-hardening-script-linux-servers, свободный (дата обращения: 28.10.2024).

10. Ultimate Guide Top 20 Docker Security Best Practices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://harmoneyleads.com/Demystify-Demo/pdf/AquaSecurityTop20DockerSecurityBestPractices.pdf, свободный (дата обращения: 28.10.2024).

11. CIS Software Supply Chain Security Guide v1.0. – Washington: Center for Internet Security, 2022. – 66 p.

12. Aqua security receives the 2023. – California: Frost & Sullivan, 2024. – 8 p.

13. Murugiah S. Application Container Security Guide / S. Murugiah, J. Morello // National Institute of Standards and Technology. – 2017. – P. 1–63.

14. CIS-for-macOS-Catalina-CP VS debian-cis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.libhunt.com/compare-CIS-for-macOS-Catalina-CP-vs-debian-cis, свободный (дата обращения: 29.10.2024).

15. jamf CIS for macOS Sierra-Script and Configuration Profile Remediation / jamf [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/jamf/CIS-for-macOS-Sierra-CP, свободный (дата обращения: 29.10.2024).

16. Automation of information security audit in the Information System on the example of a standard «CIS Palo Alto 8 Firewall Benchmark» / P. Perminov, T. Kosachenko, A. Konev, A. Shelupanov // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 2085–2088.

17. Panasenko L. Max Patrol 8. Обзор инструмента для управления уязвимостями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/compa-nies/tssolution/articles/454976, свободный (дата обращения: 06.11.2024).

18. MaxPatrol 8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/products/mp8/#overview, свободный (дата обращения: 06.11.2024).

19. Geerling J. Ansible for DevOps. Server and configuration management for humans. – Victoria: Leanpub, 2018. – 33 p.

20. Likitha S. Automation of Server Configuration Using Ansible // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. – 2022. – Vol. 10. – P. 4109–4113.

21. Berton L. Red Hat Ansible Automation Platform. – London: BPB Online, 2024. – 369 p.

22. Kouao A. Implementing security benchmarks with Red Hat Ansible Automation Platform [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.redhat.com/en/blog/implementing-security-benchmarks-red-hat-ansible-automation-platform, свободный (дата обращения: 29.10.2024).

23. Bird J. DevOpsSec Securing Software through Continuous Delivery. – California: O'Reilly Media, 2016. – 86 p.

24. Tumbarella S. Systems Hardening Using the CIS Benchmarks & Ansible Copy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://foghornconsulting.com/2021/08/23/system-hardening-with-ansible-copy, свободный (дата обращения: 29.10.2024).

Василевский Павел Антонович
Аспирант каф. «Безопасность телекоммуникаций» (БТК)
Московского технического университета
связи и информатики (МТУСИ)
Авиамоторная ул., 8, г. Москва, Россия, 111024
Тел.: +7-910-936-58-40
Эл. почта: vasilevskiy.pavel@bk.ru

Булгакова Елена Валерьевна
Канд. юрид. наук, доцент, зам. зав. каф. БТК МТУСИ
Авиамоторная ул., 8, г. Москва, Россия, 111024
Тел.: +7-926-841-59-17
Эл. почта: koordinator-proekta@mail.ru

Vasilevskiy P.A., Bulgakova E.V.

Analysis of existing approaches to application automation for CIS Controls standards and their limitations

This article analyzes the existing Bash-based tools for automation of CIS Controls standards, focusing on their capabilities and limitations when applied in corporate environments. Tools such as Ubuntu Security Guide, JShielder, Aqua Security CIS

Benchmarks, and JAMF Compliance Reporter are examined. While effective for meeting security requirements, these solutions face scalability and centralized management challenges, limiting their use in heterogeneous systems. The article concludes with the rationale for using a tool such as Ansible, that has centralized management and automated auditing capabilities, to enable non-continuous CIS compliance in large enterprise infrastructures.

Keywords: automation, CIS Controls, Ansible, information security, Bash, corporate systems, DevOps.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-80-87

References

1. Gros S. Prompting LLM to Enforce and Validate CIS Critical Security Control. *Laboratory for Information Security and Privacy, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb*, 2020, pp. 1–7.

2. Mohiuddin A., Jinpeng W. Prompting LLM to Enforce and Validate CIS Critical Security Control. *Association for Computing Machinery*, 2024, pp. 93–104.

3. CIS Debian Linux 12 Benchmark v1.0.1-04-15-2024. Washington.*: Center for Internet Security*, 2024, 1011 p.

4. CIS Docker Benchmark v1.6.0-06-14-2023. Washington.: *Center for Internet Security*, 2023, 388 p.

5. Mavrogiannopoulos N. CIS compliance with Ubuntu LTS. Available at: https://discourse.ubuntu.com/t/cis-compliance-with-ubuntu-lts/26084, free (accessed: October 28, 2024).

6. Mavrogiannopoulos N. CIS benchmark compliance: Introducing the Ubuntu Security Guide. Available at: https://ubuntu.com/blog/cis-security-compliance-usg, free (accessed: October 28, 2024).

7. Limniotis K., Kolokotronis N. Threat Actors' Attack Strategies. Deliverable D2.5, Cyber-Trust. Belgium: *Horizon 2020*, 2018, 131 p.

8. Jsitech J.S. JShielder Automated Hardening Script for Linux Servers. Available at: https://github.com/Jsitech/JShielder, free (accessed: October 28, 2024).

9. Esage A.G. JShielder Automated Hardening Script for Linux Servers. Available at: https://www.securitynewspaper.com/2018/04/14/jshielder-automated-hardening-script-linux-servers/, free (accessed: October 29, 2024).

10. Ultimate Guide Top 20 Docker Security Best Practices. Available at: https://harmoneyleads.com/Demystify-Demo/pdf/AquaSecurityTop20DockerSecurityBestPractices.pdf, free (accessed: October 28, 2024).

11. CIS Software Supply Chain Security Guide v1.0. Washington: *Center for Internet Security*, 2022, 66 p.

12. Aqua security receives the 2023. California: *Frost & Sullivan*, 2024, 8 p.

13. Murugiah S., Morello J. Application Container Security Guide. *National Institute of Standards and Technology*, 2017, pp. 1–63.

14. CIS-for-macOS-Catalina-CP VS debian-cis. Available at: https://www.libhunt.com/compare-CIS-for-macOS-Catalina-CP-vs-debian-cis, free (accessed: October 29, 2024).

15. CIS for macOS Sierra–Script and Configuration Profile Remediation. Available at: https://github.com/jamf/ CIS-for-macOS-Sierra-CP, free (accessed: October 29, 2024).

16. Perminov P., Kosachenko T., Konev A., Shelupanov A. [Automation of information security audit in the Information System on the example of a standard «CIS Palo Alto 8 Firewall Benchmark»]. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 2085–2088 (in Russ.).

17. Panasenko L. *Max Patrol 8*. Overview of the Vulnerability Management. Available at: https://habr.com/ru/companies/tssolution/articles/454976/, free (accessed: November 06, 2024) (in Russ.).

18. MaxPatrol 8. Available at: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/products/mp8/#overview, free (accessed: November 06, 2024) (in Russ.).

19. Geerling J. Ansible for DevOps. Server and configuration management for humans. Victoria: *Leanpub*, 2018, 33 p.

20. Likitha S. Automation of Server Configuration Using Ansible. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2022, vol. 10, pp. 4109–4113.

21. Berton L. Red Hat Ansible Automation Platform. London: BPB Online, 2024, 369 p.

22. Kouao A. Implementing security benchmarks with Red Hat Ansible Automation Platform. Available at: https://www.redhat.com/en/blog/implementing-security-benchmarks-red-hat-ansible-automation-platform, free (accessed: October 29, 2024).

23. Bird J. DevOpsSec Securing Software through Continuous Delivery. California: *O'Reilly Media*, 2016, 86 p.

24. Tumbarella S. Systems Hardening Using the CIS Benchmarks & Ansible Copy. Available at: https://foghornconsulting.com/2021/08/23/system-hardening-with-ansible-copy/, free (accessed: October 29, 2024).

Pavel A. Vasilevskiy
Postgraduate student, Department of Telecommunications Security, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI)
8a, Aviamotornaya st., Moscow, Russia, 111024
Phone: +7-910-936-58-40
Email: vasilevskiy.pavel@bk.ru

Elena V. Bulgakova
Candidate of Sciences in Law, Associate Professor, Deputy Head of the Department of Telecommunications Security, MTUCI
8a, Aviamotornaya st., Moscow, Russia, 111024.
Phone: +7-926-841-59-17
Email: koordinator-proekta@mail.ru

УДК 004.85

К.С. Сарин

Метод разделения данных для построения прогностических моделей машинного обучения

Представлен метод разделения данных на обучающую и валидационную выборки для построения прогностических моделей машинного обучения. Метод направлен на сохранение близости выборок к исходным данным. Под близостью подразумевается минимальное отклонение характеристик признаков данных. Сохранение близости позволяет уменьшить потерю информации при построении моделей по сравнению со случайным разделением и тем самым повысить обобщающую прогностическую способность. С помощью обучающих данных осуществляется построение множества альтернативных моделей с различными по сложности структурными характеристиками, а с помощью валидационных выбирается наиболее точная модель. Проведены эксперименты по построению нечетких классификаторов с разделением данных. Применение метода показало повышение точности классификации и интерпретируемости моделей по сравнению со случайным разделением и без разделения исходных данных.

Ключевые слова: машинное обучение, классификация, бинарные алгоритмы оптимизации, нечеткий классификатор.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-88-96

Важной задачей машинного обучения является задание сложности структуры прогностической модели. Понятие сложности структуры связано с количественным составом компонент модели, определяющих общее количество ее параметров [1–3]. Например, сложность нейронной сети может быть определена количеством слоев и нейронов в них [4]. Сложность моделей на основе деревьев решений определяется максимальной глубиной дерева [5]. Сложность нечетких систем может быть определена количеством правил и общим количеством используемых термов [6]. Чем выше сложность модели, тем больше составных компонент и параметров включено в нее. Большая часть вводимых мер сложности зависит от модели, и сравнения этих мер возможны только между моделями одного типа [3, 4, 7].

Сложные по структуре модели, как правило, имеют более высокую точность прогноза, в то время как простые модели за счет меньшего количества параметров не всегда способны в достаточной мере определить зависимость между признаками и целевым значением. Кроме этого, сложные модели часто требуют больше вычислительных ресурсов, поэтому на выбор уровня сложности также могут повлиять практические соображения, такие как доступная вычислительная мощность и временные ограничения. Также сложность модели неразрывно связана с понятием интерпретируемости в таких моделях, как нечеткие системы и деревья решений [8]. Если интерпретируемость имеет решающее значение, то предпочтение отдается простым моделям, которые являются более интерпретируемыми и облегчают понимание и объяснение процессов принятия решений, связанных с ними [9].

Если целью построения прогностической модели является высокая точность, это не означает, что для ее достижения необходимо выбрать высокую сложность. Когда модель слишком сложна, она способна очень точно делать прогноз для обучающих данных, улавливая небольшие изменения значений признаков. Таким образом, модель становится чрезмерно адаптированной к конкретным данным и, как следствие, теряет обобщающую способность, понижая точность за пределами обучающего набора данных. Такое поведение модели машинного обучения получило название переобучение [10, 11]. Причиной переобучения часто является высокая сложность модели, поэтому важно правильно подобрать ее уровень для предотвращения падения обобщающей способности.

Обычно сложность структуры задается гиперпараметрами модели до ее построения. В таком случае, чтобы подобрать подходящую по сложности структуру, исключающую переобучение, проводят поиск, состоящий из серии запусков алгоритма построения модели и проверки эффективности с различными комбинациями гиперпараметров. При этом построение модели проводится на обучающей выборке, а проверка эффективности – на валидационной, которые создаются случайным образом из исходного набора [12]. Чтобы такой итерационный поиск гиперпараметров был эффективным, применяют специальные методы поиска и обнаружения эффективной комбинации [13, 14]. Наиболее популярными являются решетчатый поиск, случайный поиск и байесовская оптимизация. Решетчатый поиск является полным перебором фиксированного набора значений гиперпараметров для поиска оптимальной комбинации [15]. Случайный поиск отличается от решетчатого поиска тем, что поиск выполняется не полным перебором комбинаций, а случайным образом, учитывая ограничения времени на выполнение и ресурсы [16]. Байесовская оптимизация проводит поиск на основе модели гауссова процесса [17].

Перечисленные методы такого итерационного подхода являются весьма трудозатратными, поскольку после каждой предложенной комбинации в процессе поиска необходимо запустить алгоритм

обучения и проверить эффективность модели. Этот недостаток отсутствует в другом подходе подбора сложности структуры. Согласно этому подходу, формирование структуры происходит в процессе работы алгоритма обучения вместе с оптимизацией параметров, а уменьшение величины ее сложности является одной из целей построения. Здесь алгоритмом построения является многокритериальный алгоритм оптимизации, где целями являются увеличение точности прогноза и уменьшение сложности структуры модели. Алгоритм возвращает множество недоминируемых по Парето моделей согласно этим критериям.

Данный подход был применен в [18–21] для построения нечетких классификаторов. Для этого применялся многокритериальный эволюционный алгоритм оптимизации, где помимо увеличения критерия точности так же целью являлось уменьшение критерия сложности структуры модели, а именно количества нечетких правил и общего количества термов. При выборе классификатора с лучшей прогностической способностью среди моделей, построенных алгоритмом, авторы выбирали модель с лучшей точностью, оцениваемой на обучающих данных. Валидационная выборка для выбора модели не использовалась. Для построения применялись все исходные данные, а это, как было показано выше, может быть причиной выбора переобученной модели, чрезмерно адаптированной к обучающим данным.

Чтобы бороться с переобучением, в обоих подходах необходимо разделять исходные данные на обучающую и валидационную выборки. Обычно разделение проводят случайным образом, но это может повлечь потерю важной информации для моделирования наблюдаемого процесса, особенно при малом количестве образцов, что негативно отразится на обобщающей способности прогностической модели. Необходимо сохранить близость выборок к исходным данным. Под близостью в настоящей работе подразумевается минимальное отклонение от исходных данных характеристик полученных выборок. В качестве таких характеристик могут выступать среднее значение и среднеквадратичное отклонение по признакам данных.

Для решения указанной выше проблемы в настоящем исследовании предлагается метод разделения исходных данных на обучающую и валидационную выборки с помощью бинарных метаэвристических алгоритмов. Метод позволяет сохранить близость выборок к исходным данным, минимизировать потерю информации по сравнению со случайным разделением и может быть применен для построения моделей как в итерационном подходе с подбором гиперпараметров, так и с помощью многокритериальной оптимизации.

Цель работы заключается в повышении эффективности построения прогностических моделей с помощью применения метода разделения данных на обучающую и валидационную выборки с сохранением близости к исходным данным. Метод апробирован при построении нечетких классификаторов с помощью многокритериального алгоритма оптимизации. Проведены эксперименты на 38 наборах данных, которые показали статистически значимое повышение точности классификации по сравнению со случайным разделением и без разделения исходных данных.

Метод разделения данных

Для того чтобы минимизировать отклонение характеристик признаков, в методе применяется бинарный алгоритм оптимизации, который формирует обучающую и валидационную выборки, близкие к исходной. Введение валидационной выборки позволит исключить выбор переобученной модели среди моделей с различными по сложности структурными свойствами и увеличит обобщающую способность. Схема построения прогностических моделей с применением разделения данных представлена на рис. 1.

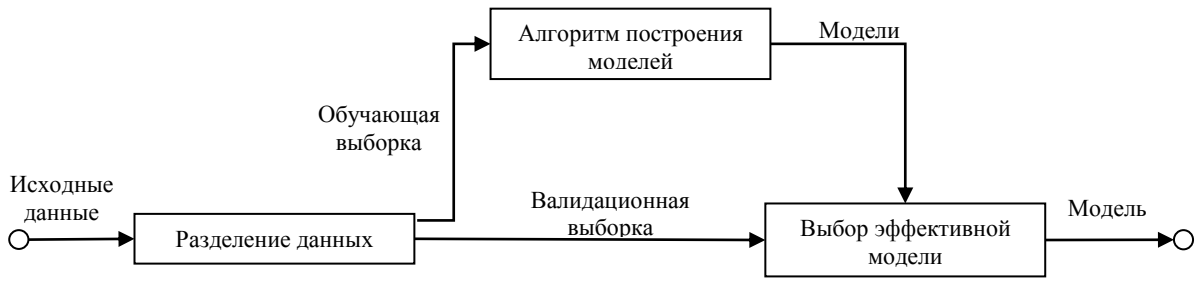


Рис. 1. Схема построения прогностических моделей с разделением данных

Бинарный алгоритм оптимизации. В общем виде работа метаэвристических алгоритмов оптимизации представляет итерационный процесс, в котором генерируются новые решения и отбираются лучшие из имеющихся и новых. Генерация новых решений осуществляется на основе стратегии работы алгоритма, связанной с выбором метафоры (образчика наблюдаемого процесса или явления живой и неживой природы). Итерационный процесс продолжается до наступления определённых условий, которыми могут выступать, например, заданное количество итераций, достижение необходимого результата или отсутствие улучшения целевых значений на протяжении определенного количества итераций.

Применяемые в методе разделения алгоритмы являются бинарными, т.е. поиск оптимального решения осуществляется в бинарном пространстве,

когда переменная может принимать только два дискретных значения. Изменения, которым необходимо подвергнуть алгоритм, связаны с ограничениями, накладываемыми на отношение количества образцов обучающей и валидационной выборки. Данное отношение является параметром метода и задается до начала его выполнения. После генерации новых решений необходимо их корректировать, чтобы удовлетворять ограничениям.

Вектор решения. С каждой переменной вектора решений связан образец исходных данных. Чтобы закодировать, к какой выборке относится образец, условимся, что переменные могут принимать значение 0 или 1. Если значение переменной 0, то соответствующий образец будет включен в обучающую выборку, а если 1, то в валидационную. Количество элементов в векторе будет соответствовать числу образцов исходных данных.

Изменения вектора решений. Изменения, которым должны подвергаться векторы решений популяции после генерации, касаются ограничений, которые накладываются на полученные обучающие и валидационные выборки. Ограничения связаны с удовлетворением отношения между количеством образцов выборок, которое должно быть фиксированным и задаваться до начала выполнения метода. В процессе работы метаэвристического алгоритма получаемые сгенерированные векторы решений могут не удовлетворять этим условиям, поэтому требуется их корректировка.

Пусть необходимо получить выборки с отношением образцов обучающих и валидационных данных a:b. Количество образцов в обучающей выборке, удовлетворяющее данному отношению, определяется следующим образом:

$$c = \text{round}\left(\frac{am}{a+b}\right), \quad (1)$$

где m – количество образцов в исходной выборке. Тогда количество образцов в валидационной будет $m–c$.

Если решается проблема классификации и выборки предполагаются стратифицированные, т.е. отношение между числом образцов классов должно соответствовать исходной выборке, то необходимо определить количество обучающих и валидационных образцов каждого класса:

$$c_i = \text{round}\left(\frac{am_i}{a+b}\right), \quad (2)$$

где c_i – количество образцов i-го класса в обучающей выборке; m_i – всего количество образцов i-го класса в исходном наборе данных; $i = 1, \ldots, k$, где k – количество классов. Количество валидационных образцов i-го класса будет соответствовать значению $m_i – c_i$.

Если после генерации новых решений количество образцов не удовлетворяет значениям (1) и (2), то нужно скорректировать значения векторов решений, выбрав элементы превалирующей выборки случайным образом и заменив их значения на противоположные. Количество выбранных элементов определяется разностью между фактическим значением количества образцов выборки и необходимым.

Целевая функция оптимизации. Поскольку целью работы метода является сохранение близости полученных выборок к исходной выборке, целевая функция бинарного алгоритма должна количественно оценивать эту близость. Одним из вариантов меры близости выборок, а также целевой функции является наибольшее суммарное отклонение значений характеристик признаков. Такая функция принимает следующий вид:

$$f_1 = \max_{j=1,\ldots,n}\left(\sum_{i=1}^{nf}\frac{\left|F_i(X_j^{\text{tra}}) - F_i(X_j)\right|}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} + \frac{\left|F_i(X_j^{\text{val}}) - F_i(X_j)\right|}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}\right), \quad (3)$$

где n – количество признаков в исходных данных; X_j, X_j^{tra}, X_j^{val} – это множества значений j-го признака исходной, обучающей и валидационной выборок соответственно; $F_i(X)$ – i-я характеристика множества X ($i = 1, \ldots, nf$). В работе применены две характеристики ($nf = 2$): F_1 – среднее значение, F_2 – среднеквадратичное отклонение. Чтобы отклонения были одного порядка, их значения нормируются путем деления на разность между максимальным $x_j^{\max}$ и минимальным $x_j^{\min}$ значением j-го признака.

Другой вариант целевой функции может быть сосредоточен только на увеличении близости обучающей выборки к исходной. За счет исключения близости валидационной выборки может быть повышена близость обучающей и тем самым построена модель на данных, приближенных к исходным. Такой вариант целевой функции, в которой учитывается только близость обучающей выборки, представлен ниже:

$$f_2 = \max_{j=1,\ldots,n}\left(\sum_{i=1}^{nf}\frac{\left|F_i(X_j^{\text{tra}}) - F_i(X_j)\right|}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}\right). \quad (4)$$

В бинарном алгоритме оптимизации каждая из этих функций должна быть минимизирована. В экспериментальной части работы приведено сравнение эффективности применения этих функций при построении нечетких классификаторов.

Выбор модели. Алгоритм построения моделей создает множество моделей, имеющих различную сложность структуры. С точки зрения прогностической способности выбор эффективной модели будет заключаться в оценке критерия эффективности каждой из них. Модель с лучшим результатом эффективности будет выбрана в качестве результирующей. При этом предлагается два варианта выборки данных для выбора модели. Первый использует только валидационные данные. Второй вариант использует исходный набор, т.е. включает как обучающую, так и валидационную выборки. Сравнение эффективности этих вариантов для построения нечетких классификаторов приведено в экспериментальной части работы.

Эксперимент

Предлагаемый в работе метод был применен для построения нечетких классификаторов, и в данном разделе представлены результаты эксперимента. Разделение данных проводилось дискретным алгоритмом оптимизации на основе распределения вероятностей с трансформацией целевых значений [22]. Данный алгоритм показал высокую эффективность поиска в бинарном пространстве. Нечеткие классификаторы строились с помощью гибридного алгоритма смешанной многокритериальной оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания [23]. В качестве критериев оптимизации выступали точность классификации, количество правил и общее количество нечетких термов, используемых в базе правил. Формирование структуры классификатора проводится в процессе работы алгоритма вместе с оптимизацией параметров. Архитектура классификатора описана в [24]. Целью эксперимента является оценка эффективности метода разделения при построении нечетких классификаторов по сравнению со случайным разделением и без разделения данных путем выбора модели с наилучшей точностью на обучающих данных.

Реализация осуществлялась на языке MatLab в среде программирования MatLab R2022b. Эксперимент проводился на персональном компьютере под управлением операционной системы Windows 10 с 8 Гб оперативной памяти и процессором Intel Core i7-12700.

Для экспериментов были использованы 38 наборов данных из репозитория KEEL (http://keel.es). Количество признаков в наборах варьирует от 2 до 90; количество образцов – от 80 до 19020; количество классов – от 2 до 15. Три набора являются синтетическими, т.е. специально разработанными для проверки эффективности классификаторов, остальные собраны из реальных проблемных областей.

Методика проведения эксперимента осуществлялась по схеме 10-кратной перекрестной проверки и соответствует методике, приведенной в [18–20]. Для каждого из 10 разбиений данных метод запускался три раза. Таким образом, критерий эффективности оценивался средним значением по тридцати запускам метода на каждом наборе данных. В качестве критериев эффективности применялись показатель точности – процент верно классифицированных образцов и показатель интерпретируемости – количество правил, общее количество используемых в классификаторе нечетких термов, количество используемых признаков.

В табл. 1 приведены значения точности в ходе проведения эксперимента. Для обозначения альтернативных методов в таблицах используется: MI – разделение данных не проводится, выбирается классификатор с лучшей точностью на фронте Парето; Random – обучающая и валидационная выборки формируются случайным образом; V – итоговый классификатор выбирается на основе валидационной выборки; V+T – итоговый классификатор выбирается на основе всей исходной выборки; f_1 – целевая функция (3); f_2 – целевая функция (4). Отношение количества образцов обучающей и валидационной выборок соответствовало значению $a{:}b$ = 3:1, выборки стратифицированные.

Для демонстрации скорости сходимости дискретного алгоритма при разделении данных на рис. 2 представлены графики значений целевой функции f_2 на итерациях алгоритма. Приведены средние значения целевой функции по тридцати запускам алгоритма. Графики представлены для наборов данных hepatitis, banana, wine и glass.

В табл. 2 приведены значения показателей интерпретируемости в ходе проведения эксперимента. Представлены результаты только для варианта метода с целевой функцией f_2 (4) и выбора итогового классификатора на Парето-фронте с помощью всей исходной выборки, поскольку, как будет показано ниже, такое сочетание функции и выборки показало лучшую точность классификации. В качестве альтернативного метода приведены результаты без разделения данных.

Результаты случайного разделения не приведены, поскольку они одного уровня с методом разделения. В таблице введены следующие обозначения: #R – количество правил, #T – общее количество нечетких термов в классификаторе, #F – количество используемых признаков.

Обсуждение результатов и выводы

Для того чтобы оценить значимость различий критериев эффективности при построении классификаторов, применяют статистический анализ, в частности, непараметрические тесты [25–27]. Для парных сравнений результатов эксперимента использовался тест знаковых рангов Уилкоксона, который основан на вычислении разности между показателями эффективности. Для проведения теста использовался уровень значимости $\alpha = 0{,}05$. Нулевая гипотеза H_0 говорит об отсутствии статистической разницы в результатах эффективности показателей классификаторов обоих методов. Альтернативная гипотеза H_1 говорит об обратном.

Статистический анализ точности классификации показывает значимое преимущество точности классификации двух вариантов предлагаемого метода по сравнению с методом без разделения данных на обучение и валидацию (MI). Результаты теста приведены в табл. 2. Сочетание целевой функции (3) или (4) для разделения исходной выборки и выбора наиболее точного классификатора на Парето-фронте с помощью всей исходной выборки показало превосходящие результаты, т.е. точность классификации при использовании предлагаемого метода статистически значимо превосходит аналоги. Также данные сочетания показали статистически значимое преимущество в точности классификации по сравнению со случайным разделением исходных данных на обучающие и валидационные. Результаты теста приведены в табл. 3, 4.

Таблица 1

Результаты точности классификации (%) в ходе проведения эксперимента

№	Наборы данных	Альтернативы			Метод разделения данных			
		MI	Random		V		V+T	
			V	V+T	f_1	f_2	f_1	f_2
1	appendicitis	84,70	82,27	83,09	82,58	84,21	84,45	86,00
2	australian	83,91	85,02	84,59	84,83	85,07	84,69	84,73
3	balance	87,73	82,61	82,61	89,28	88,58	89,23	88,32
4	banana	73,53	76,26	76,33	77,40	77,52	77,32	80,04
5	bands	67,33	63,73	65,47	64,85	65,56	66,94	66,67
6	cleveland	54,93	55,92	57,06	56,83	55,76	54,13	56,37
7	contraceptive	50,38	51,53	51,89	53,46	54,63	53,97	52,33
8	dermatology	93,75	87,87	89,39	92,53	92,81	93,28	93,00
9	ecoli	76,52	74,42	75,42	77,29	77,49	79,38	77,79
10	glass	61,67	60,92	61,40	63,54	63,17	63,23	64,11
11	haberman	71,67	72,30	73,93	72,98	71,77	72,08	72,96
12	hayes-roth	77,92	77,71	80,21	77,50	76,04	79,58	78,75
13	heart	80,25	79,38	80,00	79,01	79,51	77,90	79,01
14	hepatitis	85,19	83,87	85,11	82,86	84,79	83,79	83,79
15	ionosphere	90,43	88,04	88,90	88,43	88,34	89,46	89,85
16	iris	96,00	95,11	95,11	96,67	96,00	96,00	95,56
17	magic	83,00	82,42	82,47	83,01	83,21	83,03	82,96
18	mammographic	82,81	82,92	83,56	83,08	82,63	83,56	82,93
19	movement_libras	44,63	37,69	38,24	43,06	44,07	42,69	44,26
20	newthyroid	93,80	93,64	94,11	93,33	92,40	95,04	94,28
21	page-blocks	94,47	94,26	94,32	94,38	94,36	94,55	94,38
22	phoneme	79,33	79,54	79,61	79,75	79,48	79,78	79,58
23	pima	74,20	76,14	75,19	74,62	75,19	74,28	74,54
24	ring	81,19	80,84	81,02	86,60	86,74	86,75	86,98
25	satimage	82,58	79,78	79,84	82,55	82,66	82,65	82,62
26	sonar	75,54	73,38	73,37	73,83	71,75	72,21	73,46
27	spambase	88,21	87,10	87,24	90,05	90,46	90,14	90,51
28	spectfheart	79,04	78,41	79,17	79,93	79,06	79,45	78,56
29	tae	51,41	49,74	53,31	50,64	51,54	53,50	55,03
30	thyroid	94,26	94,26	94,31	94,29	94,32	94,32	94,33
31	titanic	77,15	78,51	78,59	78,89	78,63	78,98	78,77
32	twonorm	87,13	86,95	87,30	89,75	89,85	90,00	89,47
33	vehicle	65,85	61,44	61,87	66,52	65,65	67,54	66,68
34	vowel	42,79	33,50	34,01	44,24	43,43	44,28	43,87
35	wdbc	94,84	94,72	94,55	92,91	93,61	93,78	94,02
36	wine	94,00	94,54	93,78	93,42	93,22	93,59	94,17
37	wisconsin	95,63	95,67	96,05	95,58	95,82	95,37	95,83
38	yeast	53,17	52,25	52,68	53,17	52,97	53,44	53,73

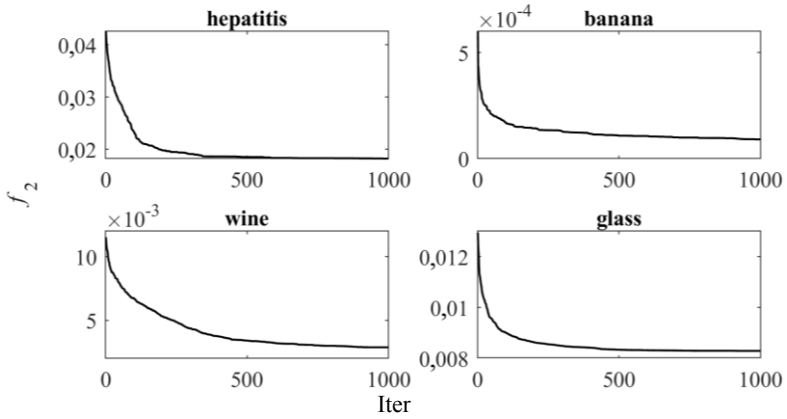


Рис. 2. Графики зависимости значений целевой функции от итерации в процессе работы дискретного алгоритма при разделении данных

Таблица 2

Результаты интерпретируемости классификаторов в ходе проведения эксперимента

№	Набор данных	MI			Метод разделения данных		
		#R	#T	#F	#R	#T	#F
1	appendicitis	3,03	4,97	3,90	2,83	4,27	3,67
2	australian	6,90	12,53	8,90	6,80	11,00	8,27
3	balance	2,50	5,80	4,00	2,43	4,93	4,00
4	banana	4,50	6,73	2,00	5,00	8,50	2,00
5	bands	9,00	15,27	11,03	8,80	15,57	11,33
6	cleveland	10,83	27,00	11,70	11,20	26,93	11,40
7	contraceptive	6,57	16,00	7,37	7,17	17,80	7,70
8	dermatology	12,10	23,57	16,43	10,83	20,70	15,30
9	ecoli	11,90	24,50	6,90	11,43	22,63	6,87
10	glass	9,70	19,47	8,23	9,23	17,13	8,30
11	haberman	3,17	4,40	2,43	3,00	3,80	2,40
12	hayes-roth	7,67	11,37	3,57	7,47	10,67	3,57
13	heart	7,73	13,80	9,37	7,53	13,10	9,00
14	hepatitis	4,87	8,07	7,03	4,00	6,30	5,53
15	ionosphere	8,80	13,20	11,33	8,60	11,90	10,43
16	iris	3,67	4,37	2,63	3,33	4,00	2,63
17	magic	7,77	15,77	8,07	8,10	16,53	8,20
18	mammographic	4,63	7,53	4,27	4,87	7,87	4,40
19	movement_libras	21,43	62,37	44,77	21,73	62,43	45,67
20	newthyroid	4,27	7,77	4,47	3,57	6,00	3,97
21	page-blocks	9,30	17,97	8,67	9,03	16,73	8,43
22	phoneme	5,17	9,97	5,00	5,50	10,03	4,93
23	pima	7,07	13,20	7,07	6,87	12,33	7,00
24	ring	12,23	16,83	13,17	11,93	16,03	13,43
25	satimage	15,00	38,10	23,40	14,37	36,50	23,53
26	sonar	8,30	17,87	16,20	7,23	14,80	13,13
27	spambase	8,10	15,87	14,53	8,73	16,80	15,33
28	spectfheart	5,63	12,33	11,00	5,20	10,90	9,80
29	tae	5,90	11,93	4,87	5,37	10,70	4,93
30	thyroid	6,37	12,63	10,20	6,43	12,27	10,03
31	titanic	3,00	3,00	3,00	2,63	3,10	3,00
32	twonorm	11,43	29,80	18,43	11,77	29,57	18,10
33	vehicle	9,70	22,87	13,30	9,87	23,23	12,83
34	vowel	12,77	36,23	11,27	13,53	37,67	11,43
35	wdbc	6,17	10,80	9,40	4,87	8,73	8,03
36	wine	5,57	7,70	6,40	4,10	5,40	4,87
37	wisconsin	5,80	9,73	6,80	5,30	7,97	6,23
38	yeast	10,33	23,97	7,93	10,63	24,27	7,97

Статистический анализ значений показателей интерпретируемости не выявил различий в количестве нечетких правил при применении метода. Количество нечетких термов и признаков классификаторов, созданных предлагаемым методом, оказалось значимо меньше. Данные результаты свидетельствуют о повышении уровня интерпретируемости построенных классификаторов по сравнению с построением без разделения.

Заключение

В работе предложен метод разделения данных на обучающую и валидационную выборки для построения прогностических моделей машинного обучения. Разделение проводится с помощью бинарных метаэвристических алгоритмов с целью сохранения близости полученных выборок к исходным данным. Введены меры близости, основанные на отклонениях таких характеристик данных, как среднее значение и среднеквадратичное отклонение. Данные меры используются в качестве целевой функции для бинарного алгоритма оптимизации.

Таблица 3

Статистические сравнения точности классификации

Пары сравнений	Сумма рангов		*p*-value	Гипотеза H_0 ($\alpha = 0{,}05$)
	+	–		
MI и (V, f_1)	294	409	0,3843	Принимается
MI и (V, f_2)	307	396	0,5029	Принимается
MI и (V+T, f_1)	216	487	0,0414	Отвергается
MI и (V+T, f_2)	192,5	548,5	0,0099	Отвергается
Random(V) и (V+T, f_1)	122	619	<0,001	Отвергается
Random(V+T) и (V+T, f_1)	176,5	526,5	0,0083	Отвергается
Random(V) и (V+T, f_2)	77,5	663,5	<0,001	Отвергается
Random(V+T) и (V+T, f_2)	171	570	0,0039	Отвергается

Таблица 4

Статистические сравнения интерпретируемости MI и метода разделения

Показатель	Сумма рангов		*p*-value	Гипотеза H_0 ($\alpha = 0{,}05$)
	+	–		
#R	498,5	242,5	0,0629	Принимается
#T	580,5	160,5	0,0023	Отвергается
#F	408,5	152,5	0,0220	Отвергается

Предложенное разделение данных применяется для построения и выбора моделей из множества альтернативных вариантов с различными по сложности структурами. Метод позволил уменьшить потерю информации при построении нечетких классификаторов многокритериальным алгоритмом оптимизации и тем самым повысить точность прогноза по сравнению со случайным разделением. Кроме этого, использование валидационной выборки повысило точность прогноза по сравнению с построением без разделения данных, и улучшило показатели интерпретируемости классификаторов, а именно, понижено общее количество используемых нечетких термов и признаков. Результаты эксперимента говорят об эффективности предлагаемого метода при построении нечетких классификаторов многокритериальными алгоритмами оптимизации.

Автор выражает глубокую признательность И.А. Ходашинскому, профессору Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, за обсуждение настоящего исследования и предоставление ряда ценных советов и замечаний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00168, https://rscf.ru/project/24-21-00168/.

Литература

1. Hu X. Model complexity of deep learning: a survey / X. Hu, L. Chu, J. Pei, W. Liu, J. Bian // Knowledge and Information Systems. – 2021. – Vol. 63. – P. 2585–2619.

2. Constructing Complexity Metrics for Measuring Generalization Ability of Deep Learning Models / W. Wen, W. Ke, J. Feng, S. Liu, Z. Xu, X. Sheng // 2024 10th International Conference on Big Data and Information Analytics (BigDIA), Chiang Mai, Thailand. – 2024. – P. 9–16.

3. Bulso N. On the complexity of logistic regression models / N. Bulso, M. Marsili, Y. Roudi // Neural Computation. – 2019. – Vol. 31, No. 8. – P. 1592–1623.

4. Measuring Model Complexity of Neural Networks with Curve Activation Functions / X. B. Hu, W. Liu, J. Bian, J. Pei // Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2020. – P. 1521–1531.

5. Buhrman H. Complexity measures and decision tree complexity: a survey / H. Buhrman, R. De Wolf // Theoretical computer science. – 2002. – Vol. 288, No. 1. – P. 21–43.

6. Gacto M.J. Interpretability of linguistic fuzzy rule-based system: An overview of interpretability measures / M.J. Gacto, R. Alcala, F. Herrera // Information Science. – 2011. – Vol. 181. – P. 4340–4360.

7. Hanin B. Complexity of linear regions in deep networks / B. Hanin, D. Rolnick // International conference on machine learning, PMLR. – 2019. – P. 2596–2604.

8. Ortigossa E. S. EXplainable Artificial Intelligence (XAI) – From Theory to Methods and Applications / E.S. Ortigossa, T. Goncalves, L. G. Nonato // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 80799–80846.

9. Chehreghani M. H. A Review on the Impact of Data Representation on Model Explainability // ACM Computing Surveys. – 2024. – Vol. 56. – P. 1–21.

10. Ying X. An Overview of Overfitting and its Solutions // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1168, No. 2. – P. 1–6.

11. Understanding and Mitigating Overfitting in Prompt Tuning for Vision-Language Models / C. Ma, Y. Liu, J. Deng, L. Xie, W. Dong, C. Xu // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2022. – Vol. 33. – P. 4616–4629.

12. Monica A. Survey on Hyperparameter Optimization of Machine Learning Models / A. Monica, P. Agrawal // 2024 2nd International Conference on Disruptive Technologies (ICDT), Greater Noida, India. – 2024. – P. 11–15.

13. Yang L. On Hyperparameter Optimization of Machine Learning Algorithms: Theory and Practice / L. Yang, A. Shami // Neurocomputing. – 2020. – Vol. 415. – P. 295–316.

14. Simple Deterministic Selection-Based Genetic Algorithm for Hyperparameter Tuning of Machine Learning Models / I.D. Raji, H. Bello-Salau, I.J. Umoh, A.J. Onumanyi, M.A. Adegboye, A.T. Salawudeen // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 1186.

15. Bergstra J. Algorithms for hyper-parameter optimization / J. Bergstra, R. Bardenet, Y. Bengio, B. Kegl // Proceedings Advances in Neural Information Processing Systems. – 2011. – P. 2546–2554.

16. James B. Random search for hyper-parameter optimization / B. James, B. Yoshua // Journal of Machine Learning Research. – 2012. – Vol. 13, No. 1. – P. 281–305.

17. Snoek J. Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms / J. Snoek, H. Larochelle, R. Adams // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2012. – Vol. 4. – P. 2951–2959.

18. Multiobjective genetic fuzzy rule selection of single granularity-based fuzzy classification rules and its interaction with the lateral tuning of membership functions / R. Alcala, Y. Nojima, F. Herrera, H. Ishibuchi // Soft Computing. – 2011. – Vol. 15. – P. 2303–2318.

19. Fazzolari M. Multi-objective evolutionary method for learning granularities based on fuzzy discretization to improve the accuracy-complexity trade-off of fuzzy rule-based classification systems: D-MOFARC algorithm / M. Fazzolari, R. Alcala, F. Herrera // Applied Soft Computing. – 2014. – Vol. 24. – P. 470–481.

20. Alcala-Fdez J. A Fuzzy Association Rule-Based Classification Model for High-Dimensional Problems With Genetic Rule Selection and Lateral Tuning / J. Alcala-Fdez, R. Alcala, F. Herrera // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2011. – Vol. 19, No. 5. – P. 857–872.

21. Alcala R. A proposal for the genetic lateral tuning of linguistic fuzzy systems and its interaction with rule selection / R. Alcala, J. Alcala-Fdez, F. Herrera // IEEE Transactions of Fuzzy System. – 2007. – Vol. 15, No. 4. – P. 616–635.

22. Sarin K.S. Discrete Optimization Algorithm Based on Probability Distribution with Transformation of Target Values // Programming and Computer Software. – 2024. – Vol. 50, No. 6. – P. 445–456.

23. Сарин К.С. Гибридный алгоритм смешанной многокритериальной оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2024. – № 2. – С. 87–105.

24. A three-stage fuzzy classifier method for Parkinson's disease diagnosis using dynamic handwriting analysis /

K. Sarin, M. Bardamova, M. Svetlakov, N. Koryshev, R. Ostapenko, A. Hodashinskaya, I. Hodashinsky // Decision Analytics Journal. – 2023. – Vol. 5. – P. 100274.

25. Demsar J. Statistical Comparisons of Classifiers over Multiple Data Sets // Journal of Machine Learning Research. – 2006. – Vol. 7. – P. 1–30.

26. Garsia S. An Extension on «Statistical Comparisons of Classifiers over Multiple Data Sets» for all Pairwise Comparisons / S. Garsia, F. Herrera // Journal of Machine Learning Research. – 2008. – Vol. 9. – P. 2677–2694.

27. Garsia S. Advanced nonparametric tests for multiple comparisons in the design of experiments in computational intelligence and data mining: Experimental analysis of power / S. Garsia, A. Fernandez, J. Luengo, F. Herrera // Information Sciences. – 2010. – Vol. 180. – P. 2044–2064.

Сарин Константин Сергеевич
Канд. техн. наук, доцент каф. компьютерных систем
в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID 0000-0003-3264-7768
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: konstantin.s.sarin@tusur.ru

Sarin K.S.

Data splitting method for building machine learning models

A method for splitting into training and validation samples for constructing predictive machine learning models is presented. The method is aimed at maintaining the proximity of samples to the original data. Proximity means minimal deviation of the characteristics of data features. Preserving proximity allows reducing information loss when constructing models, compared to random division, and thereby increasing the generalizing predictive ability. Using training data, many alternative models with structural characteristics of varying complexity are constructed, and the most accurate model is selected using validation data. Experiments were conducted to construct fuzzy classifiers with data division. The application of the method showed an increase in the accuracy of classification and interpretability of models compared to random division and without division of the original data.

Keywords: machine learning, classification, binary optimization algorithms, fuzzy classifier.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-88-96

References

1. Hu X, Chu L., Pei J., Liu W., Bian J. Model complexity of deep learning: a survey. *Knowledge and Information Systems*, 2021, vol. 63, pp. 2585–2619.

2. Wen W., Ke W., Feng J., Liu S., Xu Z., Sheng X. Constructing Complexity Metrics for Measuring Generalization Ability of Deep Learning Models. *2024 10th International Conference on Big Data and Information Analytics (BigDIA)*, Chiang Mai, Thailand, 2024, pp. 9–16.

3. Bulso N., Marsili M., Roudi Y. On the complexity of logistic regression models. *Neural Computation*, 2019, vol. 31, no. 8, pp. 1592–1623.

4. Hu X. B., Liu W., Bian J., Pei J. Measuring Model Complexity of Neural Networks with Curve Activation Functions. *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2020, pp. 1521–1531.

5. Buhrman H., De Wolf R. Complexity measures and decision tree complexity: a survey. *Theoretical computer science*, 2002, vol. 288, no. 1, pp. 21–43.

6. Gacto M.J., Alcala R., Herrera F. Interpretability of linguistic fuzzy rule-based system: An overview of interpretability measures. *Information Science*, 2011, vol. 181, pp. 4340–4360.

7. Hanin B., Rolnick D. Complexity of linear regions in deep networks. *International conference on machine learning, PMLR*. 2019. pp. 2596–2604.

8. Ortigossa E.S., Goncalves T., Nonato L.G. EXplainable Artificial Intelligence (XAI) – From Theory to Methods and Applications. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 80799–80846.

9. Chehreghani M.H. A Review on the Impact of Data Representation on Model Explainability. *ACM Computing Surveys*, 2024, vol. 56, pp. 1–21.

10. Ying X. An Overview of Overfitting and its Solutions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1168, no. 2, pp. 1–6.

11. Ma C., Liu Y., Deng J., Xie L., Dong W., Xu C. Understanding and Mitigating Overfitting in Prompt Tuning for Vision-Language Models. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2022, vol. 33, pp. 4616–4629.

12. Monica Agrawal P. A Survey on Hyperparameter Optimization of Machine Learning Models. *2024 2nd International Conference on Disruptive Technologies (ICDT)*, Greater Noida, India, 2024, pp. 11–15.

13. Yang L., Shami A. On Hyperparameter Optimization of Machine Learning Algorithms: Theory and Practice. *Neurocomputing*, 2020, vol. 415, pp. 295–316.

14. Raji I.D., Bello-Salau H., Umoh I.J., Onumanyi A.J., Adegboye M.A., Salawudeen A.T. Simple Deterministic Selection-Based Genetic Algorithm for Hyperparameter Tuning of Machine Learning Models. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 1186.

15. Bergstra J., Bardenet R., Bengio Y., Kegl B. Algorithms for hyper-parameter optimization. *Proceedings Advances in Neural Information Processing Systems*, 2011, pp. 2546–2554.

16. James B., Yoshua B. Random search for hyper-parameter optimization. *Journal of Machine Learning Research*. 2012, vol. 13, no. 1, pp. 281–305.

17. Snoek J., Larochelle H., Adams R. Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012, vol. 4, pp. 2951–2959.

18. Alcala R., Nojima Y., Herrera F., Ishibuchi H. Multiobjective genetic fuzzy rule selection of single granularity-based fuzzy classification rules and its interaction with the lateral tuning of membership functions. *Soft Computing*, 2011, vol. 15, pp. 2303–2318.

19. Fazzolari M., Alcala R., Herrera F. Multi-objective evolutionary method for learning granularities based on fuzzy discretization to improve the accuracy-complexity trade-off of fuzzy rule-based classification systems: D-MOFARC algorithm. *Applied Soft Computing*, 2014, vol. 24, pp. 470–481.

20. Alcala-Fdez J., Alcala R., Herrera F. A Fuzzy Association Rule-Based Classification Model for High-Dimensional Problems With Genetic Rule Selection and Lateral Tuning. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, vol. 19, no. 5, pp. 857–872.

21. Alcala R., Alcala-Fdez J., Herrera F. A proposal for the genetic lateral tuning of linguistic fuzzy systems and its interaction with rule selection. *IEEE Transactions of Fuzzy System*. 2007, vol. 15, no. 4, pp. 616–635.

22. Sarin K.S. Discrete Optimization Algorithm Based on Probability Distribution with Transformation of Target Values. *Programming and Computer Software*, 2024, vol. 50, no. 6, pp. 445–456.

23. Sarin K.S. [Mixed-integer multiobjective optimization algorithm based on cuckoo search methaheuristic with genetic crossover operator]. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2024, no. 2, pp. 87–105 (in Russ.).

24. Sarin K., Bardamova M., Svetlakov M., Koryshev N., Ostapenko R., Hodashinskaya A., Hodashinsky I. A three-stage fuzzy classifier method for Parkinson's disease diagnosis using dynamic handwriting analysis. *Decision Analytics Journal*, 2023, vol. 5, pp. 100274.

25. Demsar J. Statistical Comparisons of Classifiers over Multiple Data Sets. *Journal of Machine Learning Research*, 2006, vol. 7, pp. 1–30.

26. Garsia S., Herrera F. An Extension on «Statistical Comparisons of Classifiers over Multiple Data Sets» for all Pairwise Comparisons. *Journal of Machine Learning Research*, 2008, vol. 9, pp. 2677–2694.

27. Garsia S., Fernandez A., Luengo J., Herrera F. Advanced nonparametric tests for multiple comparisons in the design of experiments in computational intelligence and data mining: Experimental analysis of power. *Information Sciences*, 2010, vol. 180, pp. 2044–2064.

Konstantin S. Sarin
Cand. Sc. (Technology), Associate Professor,
Associate Professor of Department of Computer Systems in Control and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-3264-7768
Phone: +7 (382-2) 41-47-17
Email: konstantin.s.sarin@tusur.ru

УДК 004.8.681.5

А.М. Емельянов, Ю.М. Козлова, И.С. Надеждин

Синтез нейросетевого алгоритма управления для автоматизированной системы управления каскадом центробежных экстракторов

Рассматривается разработка нейросетевого алгоритма управления для автоматизированной системы управления каскадом центробежных экстракторов с нейросетевым регулятором, обученным по методу обратного распространения ошибки через прямой нейроэмулятор с эталонной моделью. Была проведена идентификация объекта управления, приведенное среднеквадратическое отклонение составляет 1,63%. Показатели качества системы управления с нейрорегулятором превосходят систему управления с ПИД-регулятором. Разработанная автоматизированная система управления экстракционным блоком на базе нейросетевого регулятора была проверена на грубость.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, экстракция, искусственная нейронная сеть, нейросетевой регулятор.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-97-102

Современные технологические процессы невозможно представить без автоматизированных систем управления (АСУ), поскольку их разработка и внедрение диктуются необходимостью повышения эффективности, безопасности и устойчивости. Это имеет особое значение для отраслей химической, атомной, нефтяной и газовой промышленности, где безопасность играет ключевую роль из-за рисков взрывов, пожаров, вредного воздействия на здоровье человека.

Достижения последних лет в области электроники, электротехники и микроэлектроники привели к существенным изменениям в теории и практике проектирования автоматизированных систем управления. В управлении технологическими процессами наибольшее применение находят системы управления на базе ПИ- и ПИД-регуляторов [1, 2]. Процесс развития таких систем управления движется в сторону применения ПИ- и ПИД-регуляторов с нечеткой логикой [3]. Активно развивается и применяется метод управления на основе прогнозирующей модели процесса [4].

Одним из актуальных направлений в области управления и оптимизации технологических процессов многие исследователи считают применение методов искусственного интеллекта. В связи с развитием микрокомпьютерной техники и технологий все большее распространение приобретают нейроалгоритмы управления. Регуляторы на базе искусственных нейронных сетей (ИНС) могут использоваться для оптимизации работы автоматизированных систем управления, их адаптации к изменяющимся условиям и повышения эффективности управления. Способность нейронных сетей к самообучению избавляет от необходимости использовать сложный математический аппарат, в отличие от многих традиционных методов адаптивного и оптимального управления, например, метода на основе прогнозирующей модели процесса [5].

В современной научной литературе имеется большое количество работ, посвященных разработке и исследованию нейросетевых регуляторов. Из рассмотренных работ выделяется два основных направления применения ИНС в рамках синтеза систем управления. Первое направление заключается в том, что искусственная нейронная сеть прямо влияет на объект управления [6–9]. Второе направление заключается в создании нейросетевого блока автоподстройки ПИД-регулятора [10–12]. Нейросеть определяет коэффициенты ПИД-регулятора, учитывая любые внешние возмущения или изменения параметров объекта управления.

Целью данной работы является разработка нейросетевого алгоритма управления для автоматизированной системы управления каскадом центробежных экстракторов для повышения качества стабилизации концентрации урана в экстракте.

В рамках работы [13] была разработана комбинированная модель процесса экстракции целевых компонентов с применением нейросетевых технологий. В работе [14] разработанная математическая модель была проверена на адекватность с помощью экспериментальных данных. В работе [15] был разработан нейросетевой алгоритм управления. В данной работе будет реализован и углубленно изучен нейросетевой регулятор и будет проведено его сравнение с регуляторами других структур.

Разработка автоматизированной системы управления экстракционным блоком

Для синтеза автоматизированной системы управления была проведена идентификация объекта управления. Для этого на ранее разработанной и верифицированной комбинированной математической модели процесса экстракции [13, 14] был проведен вычислительный эксперимент: управляющее воздействие (расход водной фазы) было изменено в виде ступеньки. В результате вычислительного эксперимента была получена кривая разгона, по кото-

рой была определена передаточная функция объекта управления:

$$W_{об}(s) = \frac{0,2958}{1077,0968s + 1}, \quad (1)$$

где s – комплексная переменная.

Приведенное среднеквадратическое отклонение идентификации составляет 1,63%.

В данной работе был разработан нейросетевой регулятор по методу обратного распространения ошибки через прямой нейроэмулятор с эталонной моделью. Нейроэмулятором является нейросеть, полностью повторяющая поведение обобщенного объекта управления. Схема обучения нейроэмулятора представлена на рис. 1, схема обучения нейрорегулятора – на рис. 2.

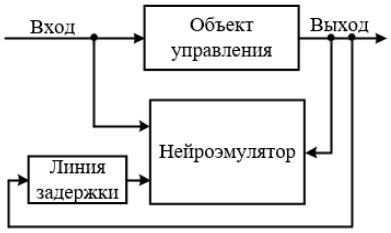


Рис. 1. Схема обучения нейроэмулятора

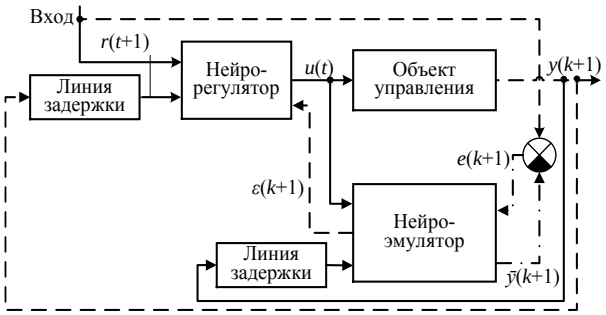


Рис. 2. Схема обучения нейрорегулятора

Структура разработанного нейрорегулятора представляет собой ИНС, состоящую из двух слоев с 60 и 40 нейронами соответственно, и показанана на рис. 3. Разработанная ИНС имеет два сигнала обратной связи. Первый сигнал – обратная связь с нейрорегулятора, а именно управляющее воздействие. Вторым сигналом является обратная связь с объекта управления, измеряемым датчиком концентрации урана в экстракте [16].

На рис. 4 представлена функциональная схема разработанной автоматизированной системы управления каскадом центробежных экстракторов с использованием нейросетевого регулятора, перистальтического насоса и датчика концентрации. Управляющей переменной является сигнал 4–20 мА, который поступает на вход перистальтического насоса. Выходной переменной является концентрация урана в экстракте [4].

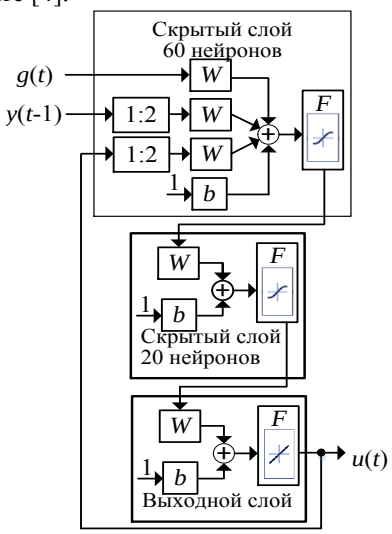


Рис. 3. Структурная схема нейрорегулятора

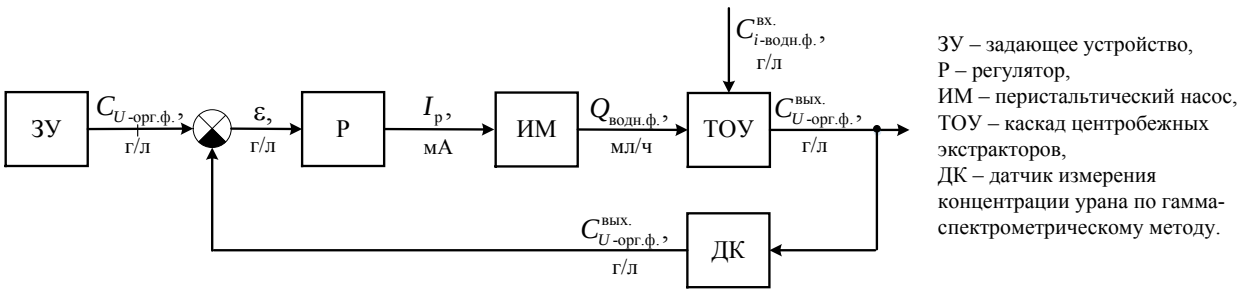


Рис. 4. Функциональная схема автоматизированной системы управления каскадом центробежных экстракторов

Для исследования разработанной АСУ с нейросетевым алгоритмом управления была проведена серия вычислительных экспериментов, в которых АСУ с нейрорегулятором сравнивалась по качеству управления с АСУ с ПИД-регулятором и АСУ с МРС-регулятором. ПИД-регуляторы, параметры которых были определены с помощью метода оптимального модуля, метода Lambda Tuning и встроенного функционала Simulink – «PID Tuner», были реализованы в цифровом виде в программной среде MatLab/Simulink. МРС-регулятор был синтезирован и реализован в программной среде MatLab/Simulink. Для приблизительного сопоставления сложности вычисления управляющего воздействия нейросетевым регулятором и МРС-регулятором горизонт прогнозирования был ограничен 15 значениями. Горизонт управления МРС-регулятора составляет 2 значения. Программно-аппаратная реализация МРС-регулятора является трудоемкой из-за необходимости многошагового прогнозирования нескольких переменных технологического процесса. Такие значения горизонта управления и прогнозирования позволят реализовать данный регулятор на современном программируемом логическом контроллере (ПЛК) и сравнить с нейрорегулятором и ПИД-регулятором [17].

Исследование разработанной автоматизированной системы управления с помощью компьютерного моделирования

Разработанные ранее нейросетевой регулятор и MPC-регулятор также были реализованы в пакете MatLab/Simulink. Изменение концентрации урана в экстракте при единичном ступенчатом управляющем сигнале для АСУ со всеми ранее разработанными регуляторами представлены в относительных единицах на рис. 5.

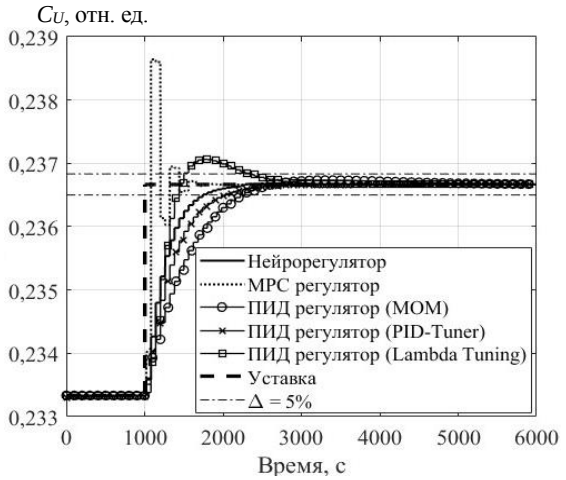


Рис. 5. Реакция АСУ с рассматриваемыми регуляторами на ступенчатое управляющее воздействие

Для переходных процессов, представленных на рис. 5, были рассчитаны показатели качества, а именно время регулирования, перерегулирования и интегральный квадратичный критерий, которые представлены в табл. 1.

Как видно из графиков переходных процессов (см. рис. 5) и рассчитанных показателей качества (см. табл. 1) по единичному управляющему воздействию, разработанный нейрорегулятор имеет лучшие показатели качества, чем рассмотренные ПИД-регуляторы и MPC-регулятор. MPC-регулятор имеет на 40% меньше времени регулирования, чем нейросетевой регулятор, но при этом значение перерегулирования не удовлетворяет целям управления.

Таблица 1

Показатели качества рассмотренных АСУ по управляющему воздействию

Регулятор	*QIC*	$t_{рег._упр.}$, с	σ, %
Нейрорегулятор	149,86	740	0,19
MPC-регулятор	103,10	440	59,17
ПИД-регулятор (MOM)	259,83	1280	1,89
ПИД-регулятор (PID-Tuner)	171,53	1340	11,94
ПИД-регулятор (Lambda Tuning)	196,41	1040	–

Далее был проведен вычислительный эксперимент, в рамках которого на объект управления подавалось единичное ступенчатое возмущающее воздействие. Изменение концентрации урана в экстракте при единичном ступенчатом возмущающем воздействии для АСУ со всеми разработанными регуляторами представлено в относительных единицах на рис. 6. Возмущение представлено в другом масштабе, ось ординат для него представлена справа на рис. 6.

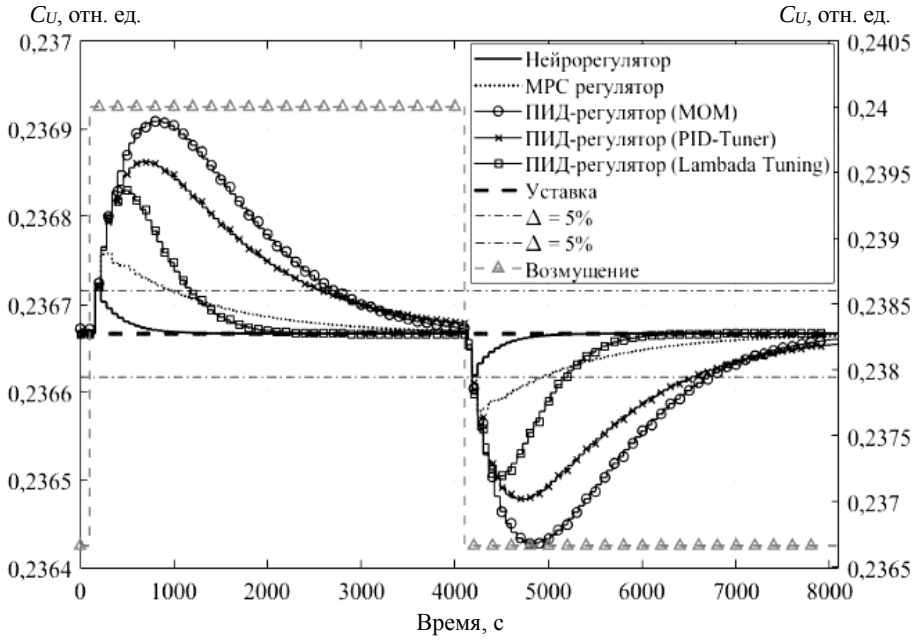


Рис. 6. Реакция АСУ с рассматриваемыми регуляторами на ступенчатое управляющее воздействие

Для переходных процессов, представленных на рис. 6, были рассчитаны показатели качества, а именно время регулирования, динамический коэффициент регулирования (R_d) и интегральный квадратичный критерий, которые сведены в табл. 2.

Как видно из графиков переходных процессов (см. рис. 6) и рассчитанных показателей качества (см. табл. 2) для единичного ступенчатого возмущающего воздействия, разработанный нейрорегулятор имеет время регулирования на 85% меньше и дина-

мический коэффициент регулирования на 42% меньше, чем лучший результат из рассматриваемых регуляторов (MPC-регулятор).

Таблица 2

Показатели качества рассмотренных АСУ по возмущающему воздействию

Регулятор	*QIC*	$t_{рег.\ возм}$, с	R_d
Нейрорегулятор	0,015	120	0,054
MPC-регулятор	0,335	780	0,093
ПИД-регулятор (MOM)	6,065	2520	0,240
ПИД-регулятор (PID-Tuner)	1,304	1080	0,165
ПИД-регулятор (Lambda Tuning)	3,862	2220	0,199

Важным показателем разработанной АСУ является её стабильная работа при изменении параметров объекта управления. Для этого необходимо провести вычислительные эксперименты, в процессе которых определить время регулирования и перерегулирования по управляющему воздействию и время регулирования, и динамический коэффициент регулирования по возмущающему воздействию для АСУ с рассматриваемыми регуляторами при поочередном изменении коэффициента передачи и постоянной времени объекта управления на ±20%. Области грубости рассмотренных АСУ по управлению представлены на рис. 7, а по возмущению – на рис. 8.

Таким образом, можно сделать вывод, что АСУ с нейросетевым регулятором проходит проверку на грубость, при этом отрабатывая возмущения при нестабильных параметрах объекта наилучшим образом по сравнению с другими рассмотренными АСУ. По управляющему воздействию, как и при номинальных параметрах, MPC-регулятор имеет немного лучшее время регулирования, при этом уступая в значениях перерегулирования.

Для создания макета автоматизированной системы управления блоком центробежных экстракторов была разработана уточненная в плане аппаратных решений функциональная схема автоматизированной системы управления экстракционным блоком на базе нейросетевого регулятора, представленная на рис. 9, где ЗУ – задающее устройство, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, I²C-AI418ML – преобразователь 4–20 мА в I²C, MB77.07 – микрокомпьютер с нейроядром, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, DFR0972 – преобразователь I²C в 4–20 мА, ИМ – перистальтический насос Cole Parmer Masterflex L/S 77301-30, ТОУ – технологический объект управления (каскад центробежных экстракторов), ДК – датчик концентрации урана в экстракте, СКС-07П-Г37; ЦА – цифровой процессор импульсных сигналов DWSS-01.

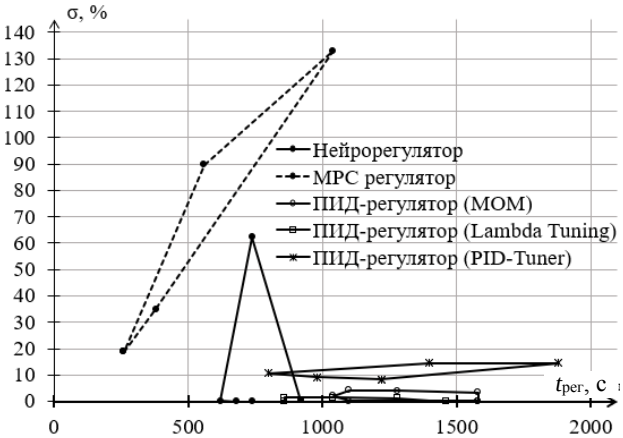


Рис. 7. Области грубости рассматриваемых АСУ по управлению

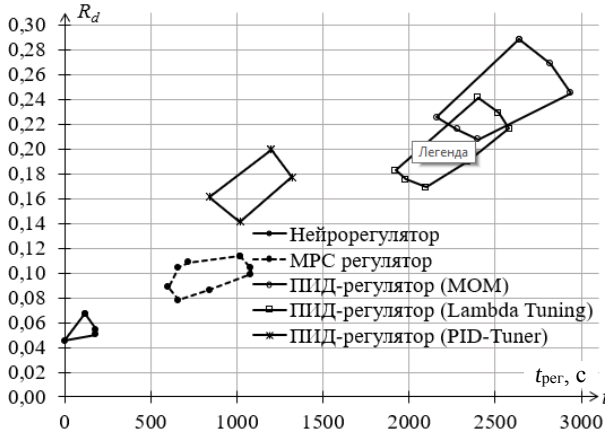


Рис. 8. Области грубости рассматриваемых АСУ по возмущению

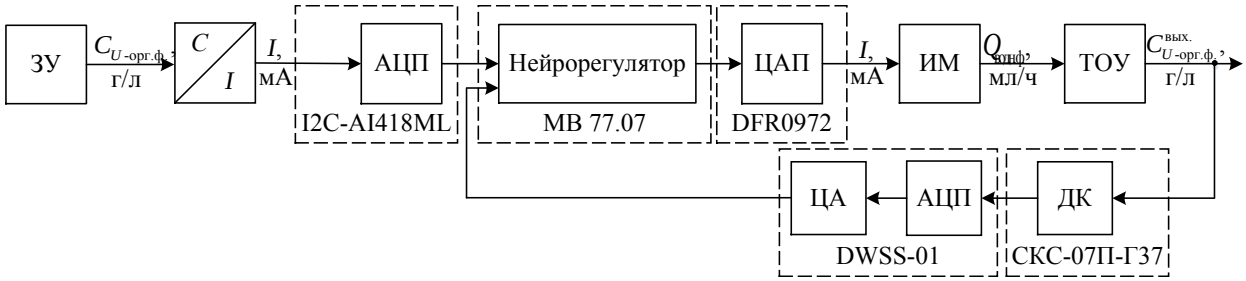


Рис. 9. Функциональная схема макета автоматизированной системы управления блоком центробежных экстракторов

Заключение

Таким образом, была разработана автоматизированная система управления блоком центробежных экстракторов на базе нейросетевого регулятора, синтезированого по методу обратного распространения ошибки через прямой нейроэмулятор с эталонной моделью. Разработанная АСУ с нейросетевым регулятором была сравнена с системами управления на основе ПИД-регуляторов, показав при этом лучшие показатели качества по управляющему (см. табл. 1)

и возмущающему (см. табл. 2) воздействиям. Системы управления были проверены на грубость, доказав устойчивость АСУ с нейрорегулятором к нестабильности параметров объекта управления. В работе предложена функциональная схема для реализации разработанной АСУ на базе отечественного микрокомпьютера МВ77.07.

Исследование поддержано программой Национального исследовательского Томского политехнического университета (ПИШ-НИР-2024-005).

Литература

1. Куо Б.С. Теория и проектирование цифровых систем управления / Б.С. Куо; пер. с англ. В.Г. Дунаева, Б.И. Копылова, А.Н. Косилова; под ред. П.И. Попова. – М.: Машиностроение, 1986. – 447 с.

2. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2004. – 747 с.

3. Александров А.Г. Адаптивный ПИД-регулятор – ЧАР-ПИД-1 / А.Г. Александров, М.В. Паленов, И.Г. Резков // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 9. – С. 58–61.

4. Manenti F. Considerations on nonlinear model predictive control techniques // Computers and Chemical Engineering. – 2011. – No. 35. – P. 2491–2509.

5. Омату С. Нейроуправление и его приложения. – Кн. 2: Нейроконтроллеры и их применение / С. Омату, М. Халид, Р. Юсоф; пер. с англ. Н.В. Батина, под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 271 с.

6. Patil S.R. Auto tuned PID and neural network predictive controller for a flow loop pilot plant / S.R. Patil, S.D. Agashe // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Vol. 72. – P. 754–760.

7. Кузнецов А.В. Разработка методики синтеза нейроконтроллера частоты вращения ротора малоразмерного газотурбинного двигателя с учётом ограничений по расходу топлива / А.В. Кузнецов, Г.М. Макарьянц // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 93–102.

8. Кобзев А.А. Динамическая коррекция управляющего воздействия в робототехнических системах на базе нейросетевой технологии с онлайн-обучением / А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, Н.А. Новикова, О.С. Сидорова // Modern High Technologies. – 2018. – № 12. – С. 282–288.

9. Quasi-optimal control of a solar thermal system via neural networks / J. Friese, N. Brandt, A. Schulte, C. Kirches, et al. // Energy and AI. – 2023. – Vol. 12. – Article number: 100232.

10. Jung S. Hardware Implementation of a Real-Time Neural Network Controller With a DSP and an FPGA for Nonlinear Systems / S. Jung, S. Kim // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54, No. 1. – P. 265–271.

11. Jiang X. Design of a BP neural network PID controller for an air suspension system by considering the stiffness of rubber bellows / X Jiang, T. Cheng // Alexandria Engineering Journal. – 2023. – Vol. 74. – P. 65–78.

12. Санталов А.А. Нейросетевая настройка адаптивного ПИД-регулятора мощности гидроагрегата // Вестник УлГТУ. – 2021. – № 3. – С. 30–34.

13. Надеждин И.С. Разработка искусственной нейронной сети для комбинированной модели процесса экстракции урана / И.С. Надеждин, А.М. Емельянов, С.Н. Ливенцов // Атомная энергия. – 2023. – Т. 135, № 1. – С. 183–187.

14. Козлова Ю.М. Комбинированная модель процесса экстракционного аффинажа с применением нейросетевых технологий / Ю.М. Козлова, А.М. Емельянов, И.С. Надеждин // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – Томск: В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2024. – Ч. 2. – С. 119–122.

15. Емельянов А.М. Синтез нейросетевого регулятора для автоматизированной системы управления каскадом центробежных экстракторов / А.М. Емельянов, Ю.М. Козлова, И.С. Надеждин // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XX Междунар. науч.-практ. конф. (20–22 ноября 2024 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), ТУСУР, 2024. – С. 320–322.

16. Горюнов А.Г. Система автоматического управления каскадом центробежных экстракторов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2012. – № 40. – С. 257–290.

17. Колодин А.А. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирущей модели / А.А. Колодин, В.В. Елшин // Вестник Самарского государственного технического университета. – Сер.: Технические науки. – 2021. – Т. 29, № 1(69). – С. 36–45.

Емельянов Алексей Михайлович
Аспирант отд. ядерно-топливного цикла
Инженерной школы ядерных технологий (ИШЯТ)
Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-7091-659X
Тел.: +7-952-801-61-06
Эл. почта: ame8@tpu.ru

Козлова Юлия Максимовна
Студентка отд. ядерно-топливного цикла
Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-874-86-52
Эл. почта: ymk5@tpu.ru

Надеждин Игорь Сергеевич
Канд. техн. наук, доцент ИШЯТ НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-4264-1765
Тел.: +7-923-423-68-85
Эл. почта: kun9@tpu.ru

Emelyanov A.M., Kozlova Yu. M., Nadezhdin I.S.

Synthesis of a neural network controller for an automated system controlling a cascade of centrifugal extractors

The paper considers the synthesis of an automated control system for a cascade of centrifugal extractors with a neural network controller trained by the method of error back propagation through a direct neuroemmulator with a reference model. The identification of the control object was carried out, the given standard deviation is 1.63%. The quality indicators of the control system with a thermostat are superior to the control system with a PID controller. The developed automated control system for the extraction unit based on a neural network controller has been tested for rudeness.

Keywords: automated control system, extraction, artificial neural network, neural network controller.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-97-102

References

1. Kuo B. *Teoriya i proektirovanie cifrovyh sistem upravleniya.* [Theory and design of digital control systems]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1986, 447 p. (in Russ.).

2. Besekersky, V.A., Popov, E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg. «Profession» Publ., 2004, 747 p. (in Russ.).

3. Alexandrov A.G. Adaptive PID controller – CHAR-PID-1. *Automation in Industry*, 2011, no. 9, pp. 58–61 (in Russ.).

4. Manenti F. Considerations on nonlinear model predictive control techniques. *Computers and Chemical Engineering*, 2011, no. 35, pp. 2491–2509.

5. Omatu S., Khalid M., Yusof R. Nejroupravlenie i ego prilozheniya. Kn. 2. Nejrokontrollery i ih primenenie [Neurocontrol and its applications. Book 2. Microcontrollers and their applications]. Moscow, IPRZhR Publ., 2000. 271 p. (in Russ.).

6. Patil S.R., Agashe S.D. Auto tuned PID and neural network predictive controller for a flow loop pilot plant. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 72, pp. 754–760.

7. Kuznetsov A.V., Makaryants G.M. [Development of a technique for the synthesis of a neurocontroller of the rotor speed of a small-sized gas turbine engine, considering fuel consumption restrictions]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 93–102 (in Russ.)

8. Kobzev A.A., Lekareva A.V., Novikova N.A., Sidorova O.S. [Dynamic correction of control action in robotic systems based on neural network technology with online training]. *Modern High Technologies*, 2018, no. 12, pp. 282–288 (in Russ.).

9. Friese J., Brandt N., Schulte A., Kirches C., et. al. Quasi-optimal control of a solar thermal system via neural networks. *Energy and AI*, 2023, Vol. 12, Article number: 100232.

10. Jung S., Kim S. Hardware Implementation of a Real-Time Neural Network Controller with a DSP and an FPGA for Nonlinear Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, Vol. 54, no. 1, pp. 265–271.

11. Jiang X., Cheng T. Design of a BP neural network PID controller for an air suspension system by considering the stiffness of rubber bellows. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, vol. 74, pp. 65–78.

12. Santalov A.A. [Neural network configuration of an adaptive PID power regulator of a hydraulic unit]. *Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*, 2021, no. 3, pp. 30–34 (in Russ.).

13. Nadezhdin I.S., Emelyanov A.M., Liventsov S.N. [Development of an artificial neural network for a combined model of the uranium extraction process]. *Atomic Energy*, 2023, vol. 135, no. 1, pp. 183–187 (in Russ.).

14. Kozlova Yu.M., Emelyanov A.M., Nadezhdin I.S. *Kombinirovannaya model' processa ekstrakcionnogo affinazha s primeneniem nejrosetevyh tekhnologij* [A combined model of the extraction refining process using neural network technologies]. Sbornik izbrannyh statej nauchnoj sessii TUSUR [*Proceedings of International Scientific Conference for Bachelor, Master, Postgraduate Students and Young Researchers «TUSUR Scientific Session»*]. Tomsk, V-Spektr (IP V.M. Bochkareva), 2024, vol. 2, pp. 119–122 (in Russ.).

15. Emelyanov A.M., Kozlova Yu.M., Nadezhdin I.S. Sintez nejrosetevogo regulyatora dlya avtomatizirovannoj sistemy upravleniya kaskadom centrobezhnyh ekstraktorov [Synthesis of a neural network controller for an automated control system for a cascade of centrifugal extractors]. *Proceedings of the XX International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*. Tomsk: V-Spektr (IP V.M. Bochkareva), TUSUR, 2024, vol. 1, pp. 320–322.

16. Goryunov A.G. [Automatic cascade control system for centrifugal extractors]. *Large-Scale Systems Control*, 2012, no. 40, pp. 257–290 (in Russ.).

17. Kolodin A.A., Elshin V.V. [Development and research of a regulator based on a predictive model]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2021, vol. 29, no. 1(69), pp. 36–45 (in Russ).

Aleksey M. Emelyanov
Postgraduate student, Division for Nuclear-Fuel Cycle,
School of Nuclear Science and Engineering,
Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-7091-659X
Phone: +7-952-801-61-06
Email: ame8@tpu.ru

Yulia M. Kozlova
Student, Division for Nuclear-Fuel Cycle,
School of Nuclear Science and Engineering,
Tomsk Polytechnic University.
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-874-86-52
Email: ymk5@tpu.ru

Igor S. Nadezhdin
Candidate of Sciences in Engineering,
Associate Professor, School of Nuclear Science
and Engineering, Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-4264-1765
Phone: +7-923-423-68-85
Email: kun9@tpu.ru

УДК 004.93`12

В.А. Клековкин, Н.Г. Марков, С.Г. Небаба

Обнаружение и классификация малоразмерных летающих объектов на изображениях с использованием сверточных нейронных сетей семейства YOLOv5

Исследована эффективность двух моделей сверточных нейронных сетей YOLOv5s и YOLOv5x семейства YOLOv5, выбранных в результате анализа основных известных моделей таких сетей для решения задачи обнаружения и классификации малоразмерных летающих объектов на изображениях. Сформированы два набора данных (датасета) с размеченными RGB-изображениями летающих объектов трех классов: птицы, беспилотные летательные аппараты вертолетного и самолетного типов. При этом первый датасет содержит изображения с объектами малых размеров (площадью до 32×32 пикселей), а второй датасет, используемый для проведения сравнительных исследований – изображения с объектами разных размеров. Модели сетей обучены с использованием каждого из датасетов, а затем исследованы с применением их тестовых выборок. Выявлено, что обе модели сетей вне зависимости от категории размеров объектов показывают скорость вычисления, значительно превышающую пороговое значение метрики FPS, равное 25. Показано, что в случае летающих объектов малых размеров модель YOLOv5s по точности классификации по метрике $AP_{0.5}$ для объектов класса «Птица» не достигает требуемого порогового значения 0,9, а модель YOLOv5x превышает его и ее можно использовать в системах компьютерного зрения. Для летающих объектов разных размеров обе модели удовлетворяют сформулированным требованиям по точности классификации объектов на изображениях и по скорости их вычисления и рекомендованы к использованию в системах компьютерного зрения реального времени.

Ключевые слова: система компьютерного зрения, сверточная нейронная сеть YOLOv5, обнаружение и классификация летающих объектов, беспилотные летательные аппараты вертолетного и самолетного типа, птица.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-103-110

Сегодня разработка систем компьютерного зрения (СКЗ) различного назначения актуальна во всем мире. СКЗ востребованы при решении ряда прикладных задач, среди которых: мониторинг опасных технологических объектов [1], анализ медицинских изображений [2], управление наземным и воздушным автономным транспортом и др. Задача создания СКЗ для обнаружения летающих объектов (ЛО) заслуживает особого внимания. Подобная система разрабатывается с целью мониторинга воздушного пространства над предприятиями с опасными технологическими объектами и зонами ограничения полетов. Под ЛО в данном контексте подразумеваются различные пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (БПЛА), птицы и т.д. В последние годы мониторинг воздушного пространства с целью обнаружения и распознавания ЛО начинают осуществлять с помощью различных СКЗ на основе методов машинного обучения. Анализ изображений, фиксируемых на входе таких СКЗ с помощью специальных видеокамер, чаще всего должен осуществляться в режиме реального времени [3].

Авторы [1–3] считают, что высокоточные СКЗ реального времени необходимо создавать на основе современных моделей сверточных нейронных сетей (СНС). Однако перед проектированием таких СКЗ реального времени следует выбрать из числа известных моделей СНС наиболее перспективную для реализации в СКЗ модель (модели). Затем необходимо провести комплексные исследования ее (их) на предмет удовлетворения выдвинутым требованиям. Такими требованиями, в первую очередь, выступают минимальные значения скорости вычисления модели СНС и точности распознавания ЛО. Решение о программной или аппаратной реализации в составе СКЗ наиболее эффективной модели принимается в случае, если результаты исследований модели (моделей) удовлетворяют вышеобозначенным требованиям [4]. Однако результаты первых исследований различных моделей СНС применительно к созданию СКЗ показали, что наиболее сложной для таких моделей является обнаружение и классификация на изображениях ЛО малых размеров (площадью до 32×32 пикселей). В работах [5–7] показано, что проблема низкой точности обнаружения и классификации малоразмерных объектов на изображениях моделями нейронных сетей по сравнению с точностью обнаружения и классификации этими же моделями более крупных объектов существует и является актуальной.

В данной работе рассматривается задача обнаружения и классификации на изображениях малоразмерных ЛО 3 классов: «БПЛА самолетного типа», «БПЛА вертолетного типа» и «птиц». В качестве объектов комплексного исследования выступают две наиболее перспективные для создания СКЗ (с точки зрения проведенного анализа архитектур СНС) модели СНС семейства YOLOv5, проводится сравнение их эффективности. Исследования проводятся с использованием созданных двух наборов размеченных изображений (датасетов). Первый датасет содержит изображения с малоразмерными ЛО, а второй – изображения с ЛО различных размеров. Это позволяет провести дополнительные исследования выбранных двух моделей СНС с использованием второго датасета и выполнить сравнительный

анализ полученных результатов исследований в случае изображений с малоразмерными объектами с результатами для изображений с объектами различных размеров.

Задача объектного детектирования летающих объектов

Объектное детектирование (англ. – Object Detection) как задача компьютерного зрения включает в себя этапы обнаружения объектов на изображении, их локализацию (определение координат пикселей, соответствующих объектам на изображении) и определение класса каждого из объектов. Далее под термином «детектирование» будем понимать процесс последовательного решения этих трех подзадач, входящих в задачу объектного детектирования. При мониторинге воздушного пространства, в том числе с помощью современных СКЗ, объектное детектирование (по отношению к ЛО в кадре) является одной из наиболее часто решаемых задач.

В процессе проектирования СКЗ, рассчитанных на мониторинг воздушного пространства в режиме реального времени (и участвующих в принятии оперативных решений на основании получаемой информации о ЛО), выдвигается ряд требований к модели СНС, которую предполагается использовать для решения задачи детектирования ЛО. Основные требования к модели СНС – высокая скорость вычислений модели и высокая точность детектирования ЛО на изображениях – противоречат друг другу, так как для повышения точности детектирования требуются более ресурсоемкие модели СНС, скорость вычисления которых заметно меньше, чем у более компактных моделей. Кроме того, следует учитывать, что на изображениях, получаемых при мониторинге воздушного пространства с помощью СКЗ, могут одновременно присутствовать несколько ЛО разных классов. Это важно учитывать при выборе из перечня потенциально перспективных моделей СНС для решения задачи детектирования ЛО наиболее перспективной модели.

При проектировании СКЗ, функционирующих в режиме реального времени, сложнее всего удовлетворить требованию высокой скорости вычислений [1, 5]. Подобные СКЗ должны как обнаруживать и классифицировать ЛО, так и отслеживать перемещение каждого ЛО в пространстве. Важно отметить, что требуемый масштаб реального времени, в котором должна функционировать СКЗ, зависит в том числе и от скорости перемещения ЛО в воздушном пространстве. Как правило, большую часть вычислительных ресурсов СКЗ, функционирующих в режиме реального времени, занимает вычисление модели СНС [1, 3]. Из этого следует, что внедрение в такие СКЗ наиболее эффективных по скорости вычисления моделей СНС крайне актуально. В рамках данного исследования в качестве критерия оценки минимальной достаточной скорости детектирования объектов на изображении было выбрано количество анализируемых изображений/кадров в секунду (англ. Frames Per Second, FPS). Согласно [3, 5], эта величина для большинства СКЗ реального времени должна быть не менее 25.

Наиболее общепринятыми метриками оценки точности детектирования объектов на изображении являются: $AP_{0,5}$ (англ. Average Precision, средняя точность классификации) для каждого класса объектов и $mAP_{0,5}$ (англ. mean Average Precision) – усредненное значение $AP_{0,5}$ по всем классам. Метрики $AP_{0,5}$ и $mAP_{0,5}$ зависят от выбора порогового значения IoU (метрики, показывающей долю пересечения двух рамок: ограничивающей реальный объект на изображении и ограничивающей область, обнаруженную моделью СНС). Для метрик $AP_{0,5}$ и $mAP_{0,5}$ соответствующее значение IoU выбрано равным 0,5 [5, 6].

Итоговую точность детектирования ЛО на изображениях можно считать достаточной, если значения метрики $AP_{0,5}$ для каждого класса ЛО и метрики $mAP_{0,5}$ по всем классам объектов выше заданного порогового значения. В соответствии с работой [2] это пороговое значение было решено задать на уровне 0,9. В практических задачах, связанных с мониторингом воздушного пространства, способность одновременно детектировать ЛО разных масштабов критически важна для СКЗ. Детектирование крупных объектов на изображениях с помощью моделей СНС может достигать высокой точности, но детектирование малоразмерных объектов остается задачей, не имеющей общего эффективного решения.

Разница между точностью детектирования объектов больших и малых размеров остается существенной [2, 5–7]. Детектирование ЛО, относительные и абсолютные размеры которых на изображениях малы, представляет особую сложность. К таким объектам относятся птицы и БПЛА на значительном удалении от СКЗ, при этом их контуры обладают высокой степенью схожести, что делает их распознавание нетривиальной задачей.

В данном исследовании поставлены следующие условия решаемой задачи. Модель СНС, на основе которой проектируется СКЗ реального времени, должна позволять на RGB-изображениях размером 416×416 пикселей детектировать (с соблюдением вышеизложенных требований к СКЗ и, соответственно, к модели СНС по точности и скорости вычислений) ЛО 3 классов:

– «БПЛА вертолётного типа» (helicopter-type_uav);

– «БПЛА самолётного типа» (aircraft-type_uav);

– «Птица» (bird).

Размеры ЛО (по занимаемой ими площади на изображениях) в рамках работы, согласно более ранним исследованиям [6], были разделены на 3 категории:

– малые (площадь объекта на изображении меньше или равна 32×32 пикселям);

– средние (площадь от 33×33 до 96×96 пикселей включительно);

– большие (площадь 97×97 пикселей и более).

Такое деление объектов на изображении размером 416×416 пикселей на 3 категории по занимаемой каждым из них площади принято в широко известном датасете MS COCO [8].

Таким образом, были сформулированы следующие задачи: анализ известных моделей СНС и выбор наиболее перспективных моделей для детектирования ЛО на изображениях; исследование выбранных моделей СНС и выявление наиболее эффективных из них при создании СКЗ реального времени, предназначенных для детектирования малоразмерных ЛО. Другими словами, ставится задача поиска моделей СНС, которые бы решали проблему низкой точности детектирования малоразмерных ЛО. Дополнительно эти модели СНС необходимо исследовать в случае детектирования на изображении ЛО разных категорий по размерам, в том числе, когда на изображении присутствуют ЛО трех категорий одновременно. Это позволит провести сравнительный анализ результатов основных и дополнительных исследований и сформировать рекомендации по использованию исследуемых моделей в СКЗ реального времени. При этом выявленная эффективная модель СНС должна удовлетворять сформулированным выше требованиям по точности и скорости детектирования ЛО на изображении, а также должна решать задачу детектирования как одиночных, так и нескольких ЛО на изображении, в том числе разных классов и различных категорий по размерам.

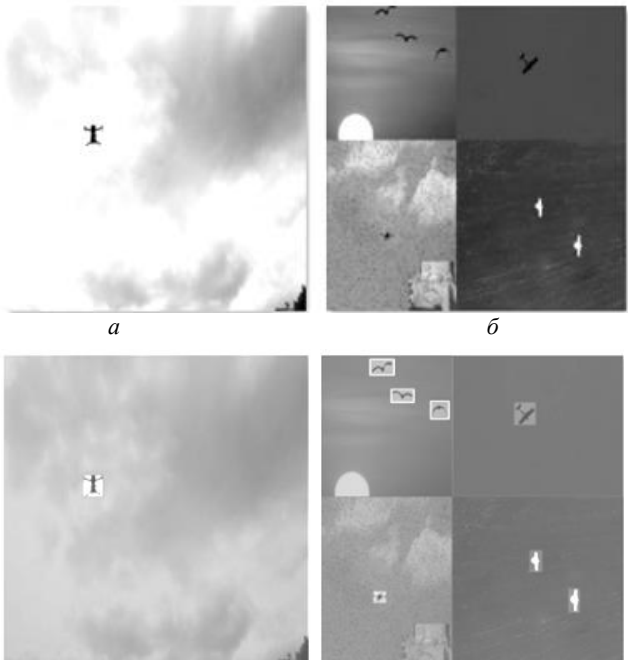
Формирование датасетов

Для решения поставленной задачи сначала необходимо было сформировать два набора размеченных изображений (два датасета): первый – с изображениями ЛО только малого размера, второй – с изображениями ЛО различных размеров. Затем было проведено обучение выбранных моделей СНС и комплексные исследования обученных моделей на тестовых выборках каждого из этих датасетов.

При создании датасетов учитывалось, что размеченные RGB-изображения каждого датасета должны удовлетворять требованиям, изложенным при постановке задачи. С учетом этого осуществлялся поиск исходных изображений с ЛО указанных трех классов и трех категорий по размерам. При подборе изображений также требовалось, чтобы они максимально охватывали все встречающиеся в реальных условиях съемки сценарии расположения ЛО в воздушном пространстве, в том числе имели различный фон, такой как: ясное небо, участки земной поверхности, горная и лесистая местность, облака. Размер изображений в датасетах был приведен к фиксированному, равному 416×416 пикселей, с помощью масштабирования.

Число исходных изображений было сравнительно небольшим, поэтому для увеличения объема датасетов часть таких изображений была подвергнута аугментации. Применялись традиционные методы аугментации: поворот изображения на заданный угол (до 15°), зеркальное отображение по горизонтали и вертикали, мозаичное размещение объектов на изображении. Для изображений с малоразмерными объектами, в основном, использовался метод копипастинга с различными стратегиями вставки объектов [9]. Исходные изображения из сформированного датасета с малоразмерными объектами, имеющие различный фон, представлены на рис. 1. Стоит отметить, что часть объектов на изображениях из-за используемого фона имеют невысокую контрастность. Например, такой малоконтрастной является часть ЛО на фоне облачного неба.

Каждое изображение размечено, и его аннотация сформирована в отдельный файл с помощью системы Roboflow [10]. На рис. 1, *а*, *б* представлены примеры исходных изображений, на рис. 1, *в*, *г* – соответствующие им размеченные изображения из датасета с малыми объектами.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Примеры изображений из датасета с объектами малых размеров. Исходные: *а* – один объект; *б* – несколько объектов разных классов. Размеченные: *в* – один объект; *г* – несколько объектов разных классов

Число размеченных объектов в датасете с изображениями ЛО малых размеров с помощью алгоритмов аугментации было увеличено до 4538, при этом распределение по классам ЛО стало следующим:

– «БПЛА вертолетного типа» – 1434 объекта;
– «БПЛА самолетного типа» – 1667 объектов;
– «Птица» – 1437 объектов.

Число размеченных объектов в датасете с разномасштабными ЛО после аугментации было увеличено до 7419, с распределением по классам ЛО:

– «БПЛА вертолетного типа» – 2775 объектов;
– «БПЛА самолетного типа» – 2560 объектов;
– «Птица» – 2084 объекта.

Диаграммы на рис. 2 показывают распределение количества ЛО на изображениях датасета с объектами малых размеров и на изображениях датасета с разномасштабными объектами соответственно. На горизонтальной оси показано количество ЛО на одном изображении, а на вертикальной оси – количество таких изображений в датасете.

Диаграмма на рис. 2, *а* демонстрирует, что основная часть датасета содержит изображения с одним ЛО малых размеров или с числом ЛО на одном изображении от 2 до 5.

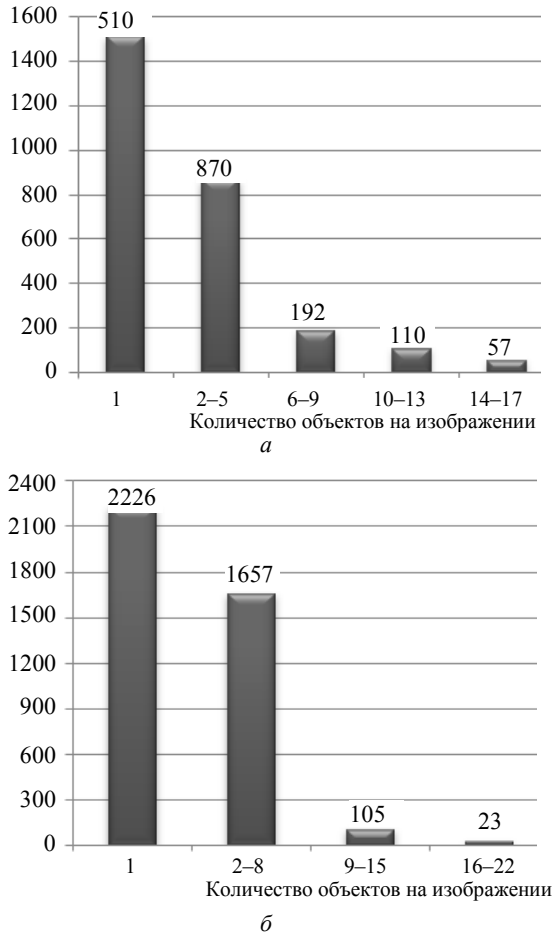


Рис. 2. Зависимость числа изображений от количества объектов на одном изображении датасета: *а* – с объектами малых размеров; *б* – с разномасштабными объектами

Как следует из диаграммы на рис. 2, *б*, основная часть второго датасета аналогично первому датасету содержит изображения с одним ЛО или с числом ЛО на одном изображении от 2 до 8.

Каждый датасет был разделен на 3 выборки: обучающую (70% объема датасета), валидационную (20%) и тестовую (10%).

Выбор моделей СНС для исследований

Среди моделей СНС для детектирования объектов на изображениях выделяют одноэтапные и двухэтапные детекторы. Двухэтапные детекторы, такие как R-CNN [7] и ее модификации Faster R-CNN, Mask R-CNN [11] по оценке [2], несмотря на достаточно высокую точность детектирования объектов, не удовлетворяют требованию по скорости детектирования. Модель LeNet5 [1] и ее модификация [3] показали низкую точность детектирования на изображениях с несколькими ЛО.

Анализ моделей СНС в [1, 2] позволяет считать, что наиболее подходящими для детектирования ЛО, с учетом требования к быстродействию, являются модели класса YOLO [12]. Модели СНС этого класса относятся к одноэтапным детекторам, кроме того, эти модели дают весьма высокую точность детектирования объектов [2, 12].

Предлагается рассматривать и исследовать эффективность моделей СНС класса YOLO с наиболее современными архитектурами, начиная с моделей семейства YOLOv5 [13] и заканчивая уже известными по ряду решенных прикладных задач моделями YOLOv7 [6, 13, 14] и YOLOv8 [15, 16]. Появившиеся недавно модели YOLOv9, YOLOv10 и YOLOv11 исследовались только на датасете MS COCO [8] и пока недостаточно апробированы при решении прикладных задач, по этой причине здесь они не рассматриваются.

Известно, что модели семейства YOLOv5 незначительно уступают по точности детектирования объектов нескольких классов на изображениях более современным моделям класса YOLO, например, моделям YOLOv7 и YOLOv8, в то же время превосходят почти все эти модели по производительности [13, 15, 16]. Как показано выше, среди требований, имеющих значение при решении задачи обнаружения и классификации объектов в воздушном пространстве, равнозначным с требованием высокой точности классификации является требование высокой скорости вычисления модели СНС.

Кроме того, точность классификации обученных и тестируемых на известном датасете MS COCO моделей нейронных сетей не всегда свидетельствует о том, что в конкретной задаче при обучении этих моделей на узкоспециализированном датасете результаты по точности классификации останутся аналогичными результатам, полученным на датасете MS COCO. Все изложенное позволило выбрать в качестве объекта исследования и для потенциального применения в СКЗ реального времени в качестве перспективной модели СНС YOLOv5. Модель YOLOv5s выбрана для проведения исследований как наиболее удовлетворяющая требованию по скорости вычисления, а YOLOv5x выбрана как показывающая наиболее высокую точность классификации объектов среди всех версий семейства YOLOv5 [17].

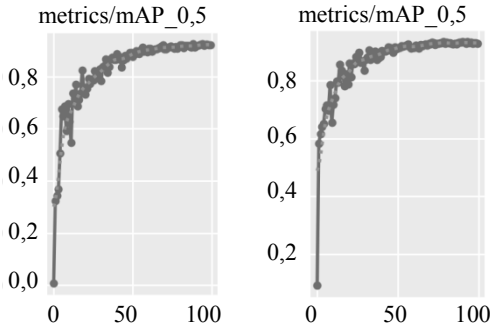
Проверка двух выбранных моделей на предмет соответствия описанным выше требованиям, предъявляемым к СКЗ реального времени и, соответственно, к реализуемой в такой системе модели СНС, предполагает проведение их обучения, валидации и исследования их эффективности на тестовых выборках каждого датасета.

Обучение, валидация и исследование моделей YOLOv5s и YOLOv5x

Обучение, валидация и исследование эффективности двух выбранных моделей СНС семейства YOLOv5 проводились с использованием разработанных датасетов и фреймворка PyTorch. Компьютер для оценки быстродействия моделей СНС обладал следующими характеристиками: процессор Intel Core i9-11900KF, объем оперативной памяти 64 ГБ, видеокарта NVIDIA Quadro RTX 6000 с объемом видеопамяти 24 ГБ.

При обучении моделей YOLOv5s и YOLOv5x были проведены эксперименты для подбора оптимального значения гиперпараметра batch_size и числа эпох обучения на датасете с ЛО малых размеров. Выявлено, что при гиперпараметре batch_size, равном 32, и при количестве эпох, равном 100, достигаются лучшие результаты по точности классификации по метрикам $AP_{0,5}$ и $mAP_{0,5}$ для каждой из исследуемых моделей. На рис. 3 приведены графики зависимости значений метрики $mAP_{0,5}$ от количества эпох (batch_size равен 32) при валидации моделей на датасете с объектами малых размеров. Можно отметить, что при 100 эпохах обучения для каждой модели достигается эффект плато, вследствие чего и было выбрано количество эпох, равное 100.

Аналогичные результаты получены при обучении и валидации этих моделей на датасете с ЛО разных размеров на изображениях. Отметим, что вне зависимости от обучаемой модели время на ее обучение меньше при использовании датасета с малыми объектами.



а *б*

Рис. 3. Зависимость значений метрики $mAP_{0,5}$ на валидационной выборке датасета с малоразмерными объектами от количества эпох обучения моделей:
а – для модели YOLOv5s; *б* – для модели YOLOv5x

Результаты комплексных исследований моделей СНС на изображениях с ЛО малых и разных размеров

ЛО малых размеров. В ходе первого эксперимента было проведено исследование (тестирование) обученных и прошедших валидацию моделей YOLOv5s и YOLOv5x по точности классификации малоразмерных ЛО. Число изображений в тестовой выборке датасета с такими объектами – 279. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты тестирования моделей YOLOv5 по метрикам AP и mAP на датасетах с ЛО малых и разных размеров

Класс	Размеры объектов			
	малые		разные	
	YOLOv5s	YOLOv5x	YOLOv5s	YOLOv5x
БПЛА самолетного типа	0,941	0,942	0,951	0,959
Птица	0,861	0,904	0,919	0,917
БПЛА вертолетного типа	0,955	0,957	0,982	0,968
Все классы	0,919	0,931	0,951	0,948

На рис. 4 приведены примеры детектирования ЛО на двух изображениях из тестовой выборки датасета с ЛО малых размеров моделью YOLOv5s. Из рис. 4, *а* и *б* можно видеть, что модель успешно справляется с детектированием объектов малого размера: из класса «БПЛА вертолётного типа» (helicopter-type_uav) с точностью 0,9 и из класса «БПЛА самолетного типа» (aircraft-type_uav) с точностью 0,9. Однако из рис. 4, *а* следует, что два объекта класса «Птица» (bird) детектируются с точностью 0,85 и 0,86, что не превышает пороговое значение 0,9.



а *б*

Рис. 4. Примеры детектирования ЛО на изображениях из тестовой выборки с объектами малых размеров

Комплексность исследований моделей предполагает проведение второго эксперимента по оценке усредненной скорости вычислений каждой из моделей. В табл. 2 приведены его результаты. При оценке усредненной скорости вычислений в виде показателя FPS учитывались значения Inference – среднее время, необходимое для вычисления модели на одном изображении, и NMS (англ. Non-Maximum Suppression) – среднее время вычисления и устранения повторяющихся обнаружений и выбора наиболее релевантных обнаруженных объектов на одном изображении. Значения усредненной скорости вычислений FPS каждой модели получены с учетом затрат времени на анализ 279 изображений тестовой выборки первого датасета.

Таблица 2

Результаты исследования моделей YOLOv5 по усредненной скорости вычисления моделей на датасетах с объектами малых и разных размеров

Модель СНС	Размеры объектов					
	малые	разные	малые	разные	малые	разные
	Inference, мс		NMS, мс		FPS	
YOLOv5s	4,5	4,5	0,4	0,3	204	208
YOLOv5x	9,0	9,1	0,4	0,3	106	106

ЛО разных размеров. Третий эксперимент по исследованию обученных и прошедших валидацию моделей YOLOv5s и YOLOv5x по точности классификации ЛО проводился с использованием тестовой выборки датасета с объектами разных размеров. Эта выборка включала 417 изображений. Результаты исследования моделей по точности классификации представлены также в табл. 1.

Таблица 2 содержит результаты четвертого эксперимента: исследования моделей по скорости вычислений на датасете с объектами разных размеров. Приведены значения усредненной скорости вычислений FPS каждой модели, полученные по результа-

там расчета среднего времени на анализ одного изображения. Расчет среднего времени проводился с учетом времени на анализ каждого из 417 изображений тестовой выборки второго датасета.

Анализ полученных результатов

Анализируя приведенные в табл. 1 и 2 результаты исследования моделей YOLOv5s и YOLOv5x, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, из табл. 1 следует, что модель YOLOv5x демонстрирует более высокие результаты по точности классификации объектов малых размеров по каждой из метрик $AP_{0,5}$ и $mAP_{0,5}$, чем модель YOLOv5s. Например, разница точности этой модели по метрике $mAP_{0,5}$ по сравнению с YOLOv5s составляет 0,012. По метрике $mAP_{0.5}$ обе модели показывают результаты выше порогового значения 0,9. Модель YOLOv5x превышает это пороговое значение по метрике $AP_{0,5}$ для каждого класса ЛО, результаты же модели YOLOv5s по метрике $AP_{0,5}$ для класса «Птица» ниже этого порога. Следовательно, рекомендовать к использованию в СКЗ по точности классификации ЛО малых размеров можно только модель YOLOv5x. Эта модель, превышая по точности классификации весьма высокий заданный порог 0,9, позволяет решить обозначенную выше проблему низкой точности детектирования малоразмерных ЛО.

Во-вторых, результаты, представленные в табл. 1, демонстрируют, что модели YOLOv5s и YOLOv5x имеют близкие результаты по метрикам оценки точности классификации и успешно справляются с классификацией на изображениях ЛО разных размеров. Модель YOLOv5x дает несколько лучшие результаты по метрике $AP_{0,5}$ для объектов класса «БПЛА самолетного типа», но уступает модели YOLOv5s по точности детектирования ЛО классов «БПЛА вертолетного типа» и «Птица». По метрике $mAP_{0,5}$ модель YOLOv5s на 0,003 дает более точный результат, чем YOLOv5x. Более того, обе модели значительно превышают по метрикам $AP_{0.5}$ и $mAP_{0.5}$ заданный порог 0,9, что позволяет рекомендовать их к использованию в качестве основы в СКЗ, предназначенных для детектирования ЛО разных размеров.

В-третьих, по результатам из табл. 2 можно сделать вывод, что средняя скорость вычисления обеих моделей, YOLOv5s и YOLOv5x, значительно превышает пороговое значение FPS, равное 25. Модель YOLOv5s по метрике FPS почти в 2 раза эффективнее, чем модель YOLOv5x.

Отметим, что размер ЛО на изображениях практически не влияет на скорость вычисления моделей. Обе модели удовлетворяют указанному в постановке задачи требованию высокой скорости вычислений и могут быть рекомендованы к применению в составе СКЗ реального времени.

Результаты исследования моделей YOLOv5s и YOLOv5x и сделанные по ним выводы позволяют сформулировать практические рекомендации по применению этих моделей в СКЗ реального времени. Если проектируемая СКЗ предназначена для детектирования на изображениях ЛО различных размеров, то можно рекомендовать любую из исследуемых моделей. При этом, если масштаб реальном времени СКЗ требует очень высокой скорости вычисления модели, то необходимо использовать модель YOLOv5s. Если СКЗ реального времени предназначена для детектирования на изображениях ЛО малых размеров, то следует использовать только модель YOLOv5x.

Заключение

Анализ результатов ряда исследований по точности объектного детектирования ЛО на изображениях показал, что существует проблема низкой точности обнаружения и классификации таких объектов, имеющих малые размеры.

Проведенный анализ основных классов моделей СНС для детектирования объектов на изображениях позволил выбрать в качестве перспективных для реализации в СКЗ реального времени модели YOLOv5s и YOLOv5x. Был создан датасет с размеченными изображениями ЛО малых размеров, а также датасет с изображениями ЛО разных размеров.

По результатам обучения, валидации и исследования выбранных моделей YOLOv5s и YOLOv5x на этих датасетах показано, что в случае ЛО малых размеров модель YOLOv5x дает результаты по метрикам $AP_{0,5}$ и $mAP_{0,5}$ точности детектирования (классификации) таких объектов, превышающие весьма высокий заданный порог 0,9. Модель YOLOv5s по метрике $AP_{0,5}$ для объектов класса «Птица» не достигает этого порога и поэтому в отличие от первой модели не может использоваться в качестве основы в СКЗ для детектирования малоразмерных ЛО.

В случае детектирования ЛО разных размеров на изображениях точность несколько выше у модели YOLOv5s, при этом обе модели с большим запасом преодолевают заданный порог 0,9 и могут использоваться в составе СКЗ.

Из результатов исследований скорости вычислений следует, что обе выбранные для сравнения модели YOLOv5s и YOLOv5x значительно превышают по средней скорости вычисления пороговое значение FPS, равное 25. С точки зрения этого показателя обе модели могут использоваться в составе СКЗ реального времени. Модель YOLOv5s по метрике FPS показала себя почти в 2 раза эффективнее, чем модель YOLOv5x.

По результатам проведенных исследований моделей YOLOv5s и YOLOv5x сформулированы практические рекомендации по применению этих моделей в составе СКЗ реального времени. При детектировании на изображениях ЛО различных размеров в зависимости от приоритетности требований к точности или скорости детектирования объектов при создании конкретной СКЗ реального времени может быть рекомендована модель, наиболее соответствующая этому требованию.

Литература

1. Zoev I.V. Intelligent computer vision system for unmanned aerial vehicles for monitoring technological objects of

oil and gas industry / I.V. Zoev, N.G. Markov, S.E. Ryzhova // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330, No. 11. – P. 34–49. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2346.

2. Review of deep learning: Concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions / L. Alzubaidi, J. Zhang, A.J. Humaidi, A. Al-Dujaili, Y. Duan, O. Al-Shamma, J. Santamaría, M.A. Fadhel, M. Al-Amidie, L. Farhan // Journal of Big Data. – 2021. – Vol. 8, No. 53. – P. 1–77. DOI: 10.1186/s40537-021-00444-8.

3. Клековкин В.А. Модель сверточной нейронной сети LeNet5 для обнаружения и классификации объектов воздушного пространства на изображениях / В.А. Клековкин, Н.Г. Марков // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1, № 2. – С. 11–16. DOI: 10.18799/29495407/2023/2/17.

4. Markov N.G. FPGA hardware implementation of the YOLO subclass convolutional neural network model in computer vision systems / N.G. Markov, I.V. Zoev, E.A. Mytsko // Proceedings of the 2022 International Siberian Conference on Control and Communication (SIBCON–2022). – 2022. – P. 1–5.

5. Небаба С.Г. Сверточные нейронные сети семейства YOLO для мобильных систем компьютерного зрения / С.Г. Небаба, Н.Г. Марков // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 615–631. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-3-615-631.

6. Accurate UAV Small Object Detection Based on HRFPN and EfficentVMamba / S. Wu, X. Lu, C. Guo, H. Guo // Sensors 2024. – 2024. – Vol. 24, No. 5. – P. 4966. DOI: 10.3390/s24154966.

7. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation / R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2014. – P. 580–587. DOI: 10.48550/arXiv.1311.2524.

8. Microsoft COCO: Common objects in context / T.Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, C.L. Zitnick // Computer Vision–ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6–12, 2014, Proceedings, Part V 13. – Springer International Publishing, 2014. – P. 740–755. DOI: 10.48550/arXiv.1405.0312.

9. Augmentation for small object detection / M. Kisantal, Z. Wojna, J. Murawski, J. Naruniec, K. Cho // CVPR 2019. – 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1902.07296, свободный (дата обращения: 19.07.2024).

10. Roboflow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://roboflow.com, свободный (дата обращения: 15.06.2024).

11. Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – P. 2980–2988.

12. Bochkovskiy A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection / A. Bochkovskiy, C.Y. Wang, H.Y.M. Liao // Journal arXiv, preprint arXiv: 2004.10934v1. – 2020. – P. 1–17. DOI: 10.48550/arXiv.2004.10934.

13. Olorunshola O.E. A Comparative Study of YOLOv5 and YOLOv7 Object Detection Algorithms / O.E. Olorunshola, M.E. Irhebhude, A.E. Evwiekpaefe // Journal of Computing and Social Informatics. – 2023. – Vol. 2. – P. 1–12. DOI: 10.33736/jcsi.5070.2023.

14. Wang C.Y. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors / C.Y. Wang, A. Bochkovskiy, H.Y.M. Liao // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2023. – P. 7464–7475.

15. Филичкин С.А. Сравнение эффективности алгоритмов YOLOv5 и YOLOv8 для обнаружения средств индивидуальной защиты человека / С.А. Филичкин, С.В. Вологдин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 124–131.

16. Vehicle and Plate Detection for Intelligent Transport Systems: Performance Evaluation of Models YOLOv5 and YOLOv8 / M. Afonso, E. Teixeira, M. Cruz, G. Aquino, E. Vilas Boas // International Conference on Computing (ICOCO), IEEE. – 2023. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICOCO59262.2023.10397996.

17. Horvat M. A comparative study of YOLOv5 models performance for image localization and classification / M. Horvat, G. Gledec // Proceedings of the 33rd Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS). – 2022. – P. 349–356.

Клековкин Вадим Александрович
Аспирант отд. 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.: 7-996-412-74-00
Эл. почта: vak37@tpu.ru

Марков Николай Григорьевич
Д-р техн. наук, проф. ОИТ ИШИТР НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: 7-913-829-69-32
Эл. почта: markovng@tpu.ru

Небаба Степан Геннадьевич
Канд. техн. наук, доцент ОИТ ИШИТР НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: 7-953-911-75-34
Эл. почта: stepanlfx@tpu.ru

Klekovkin V.A., Markov N.G., Nebaba S.G.

Detection and classification of small-size flying objects in images using convolutional neural networks from the YOLOv5 family

The effectiveness of two models of convolutional neural networks, YOLOv5s and YOLOv5x of the YOLOv5 family, selected as a result of the analysis of the main known models of such networks for solving the problem of detection and classification of small-sized flying objects in images, was studied. Two datasets were formed with labeled RGB images of flying objects for three classes: birds, rotary-wing unmanned aerial vehicles (UAVs), and fixed-wing aircraft. The first dataset contains images with small-size objects (up to 32x32 pixels in area), and the second dataset, used for comparative studies, contains images with objects of different size. The network models were trained using each of the datasets and then studied using their test samples. It was found that both network models, regardless of the object size category, show a computation speed significantly exceeding the threshold value of the FPS metric equal to 25. It was shown that in the case of small-size flying objects, the YOLOv5s model does not reach the required threshold value of 0.9 in terms of

classification accuracy according to the $AP_{0.5}$ metric for objects of the «Bird» class, while the YOLOv5x model exceeds it and can be used in computer vision systems. For flying objects of different size, both models meet the formulated requirements for the accuracy of object classification in images and for the speed of their computation and are recommended for use in real-time computer vision systems.

Keywords: computer vision system, YOLOv5 convolutional neural network, detection and classification of flying objects, helicopter and airplane type unmanned aerial vehicles, bird.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-103-110

References

1. Zoev I.V., Markov N.G., Ryzhova S.E. Intelligent computer vision system for unmanned aerial vehicles for monitoring technological objects of oil and gas industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 34–49 (in Russ.). DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2346.

2. Alzubaidi L., Zhang J., Humaidi A.J., Al-Dujaili A., Duan Y., Al-Shamma O., Santamaría J., Fadhel M.A., Al-Amidie M., Farhan L. Review of deep learning: Concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data*, 2021, vol. 8, no. 53, pp. 1–77. DOI: 10.1186/s40537-021-00444-8.

3. Klekovkin V.A., Markov N.G. *Model svertochnoj nejronnoj seti LeNet5 dlya obnaruzheniya i klassifikacii objektov vozdushnogo prostranstva na izobrazheniyah* [Model of convolutional neural network LeNet5 for detection and classification of air space objects in images]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 2, pp. 11–16 (in Russ.). DOI: 10.18799/29495407/2023/ 2/17.

4. Markov N.G., Zoev I.V., Mytsko E.A. FPGA hardware implementation of the YOLO subclass convolutional neural network model in computer vision systems. *Proceedings of the 2022 International Siberian Conference on Control and Communication (SIBCON 2022)*, 2022, pp. 1–5 (in Russ.).

5. Nebaba S.G., Markov N.G. *Svertochnye nejronnye seti semejstva YOLO dlya mobilnyh sistem kompyuternogo zreniya* [Convolutional neural networks of YOLO family for mobile computer vision systems]. *Computer Research and Modeling*, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 615–631 (in Russ.). DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-3-615-631.

6. Wu S., Lu X., Guo C., Guo H. Accurate UAV Small Object Detection Based on HRFPN and EfficentVMamba. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 15, p. 4966. DOI: 10.3390/ s24154966.

7. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 580–587. DOI: 10.48550/arXiv.1311.2524.

8. Lin T.Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Zitnick C.L. Microsoft COCO: Common objects in context. *Computer Vision–ECCV 2014: 13th European Conference*, Zurich, Switzerland, September 6–12, 2014, Proceedings, Part V 13. Springer International Publishing, 2014. pp. 740–755. DOI: 10.48550/arXiv.1405.0312.

9. Kisantal M., Wojna Z., Murawski J., Naruniec J., Cho K. Augmentation for small object detection. CVPR 2019, 2019. Available at: https://arxiv.org/abs/1902.07296, free (accessed: June 19, 2024).

10. Roboflow. Available at: https://roboflow.com, free (Accessed: June 15, 2024).

11. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask R-CNN. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2017, pp. 2980–2988.

12. Bochkovskiy A., Wang C.Y., Liao H.Y.M. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. Journal arXiv, preprint arXiv: 2004.10934v1, 2020, pp. 1–17. DOI: 10.48550/arXiv.2004.10934.

13. Olorunshola O.E., Irhebhude M.E., Evwiekpaefe A.E. A Comparative Study of YOLOv5 and YOLOv7 Object Detection Algorithms. *Journal of Computing and Social Informatics*, 2023, vol. 2, pp. 1–12. DOI: 10.33736/jcsi.5070.2023.

14. Wang C.Y., Bochkovskiy A., Liao H.Y.M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2023, pp. 7464–7475.

15. Filichkin C.A., Vologdin S.V. *Sravnenie effektivnosti algoritmov YOLOv5 i YOLOv8 dlya obnaruzheniya sredstv individual'noy zashchity cheloveka* [Comparison of the Effectiveness of YOLOv5 and YOLOv8 Algorithms for Detecting Human Personal Protective Equipment]. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2023, vol. 21, no. 3. pp. 124–131 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-124-131.

16. Afonso M., Teixeira E., Cruz M., Aquino G., Vilas Boas E. Vehicle and Plate Detection for Intelligent Transport Systems: Performance Evaluation of Models YOLOv5 and YOLOv8. *International Conference on Computing (ICOCO)*, IEEE, 2023, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICOCO59262.2023. 10397996.

17. Horvat M., Gledec G. A comparative study of YOLOv5 models performance for image localization and classification. *Proceedings of the 33rd Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS)*, 2022, pp. 349–356.

Vadim A. Klekovkin
Postgraduate student, Division for Information Technology (DIT) School of Computer Science & Robotics (SCSR)
National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-996-412-74-00
Email: vak37@tpu.ru

Nikolay G. Markov
Doctor of Science in Engineering, Professor,
DIT SCSR NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-829-69-32
Email: markovng@tpu.ru

Stepan G. Nebaba
Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor,
DIT SCSR NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-953-911-75-34
Email: stepanlfx@tpu.ru

УДК 537.877

Н.Н. Кривин, Д.Е. Понамарев, М.А. Шипуля

Влияние краевых эффектов среды со спиральной симметрией на резонансную частоту поглощения электромагнитных волн

Представлено сравнение экспериментальных данных по прохождению электромагнитных волн через среду, обладающую спиральной симметрией, с результатами, полученными при помощи расчётов на основе численной модели рассматриваемого эксперимента. Модель среды представляет собой бесконечный массив спиральных антенн. Показано, что в результате наличия краевых эффектов данная модель дает заниженные оценки для резонансной частоты поглощения исследуемой среды.

Ключевые слова: спиральная симметрия, краевые эффекты, численное моделирование.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-111-115

Аналитическое описание реальных физических процессов, как правило, связано с исследованием абстрактных математических моделей. Ещё один способ изучения физики интересующего процесса – построение его цифровой модели. Во многих случаях такие модели опираются на уже хорошо разработанный математический аппарат. Сравнение полученных численных результатов с реальными экспериментальными данными позволяет оценить корректность использования той или иной модели, а также выявить ее преимущества и недостатки. В связи с этим результаты проведения такого сравнения являются важнейшей частью любого исследования.

В качестве примера проведения общего сравнительного анализа возможно выделить работу [1], в которой рассмотрены различные метаматериалы и метаповерхности, созданные на основе металлических спиралей и омега-элементов классической или прямоугольной формы. В данной работе также проведено исследование сходства и различия таких метаматериалов с кристаллическими структурами, обладающими соответствующей симметрией. Указано, что метод электродинамического подобия позволяет масштабировать параметры структур, образующих метаповерхности, полученные для сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных волн (ЭМВ), в целях оптимизации геометрии элементов метаматериала, свойства которого проявляются на гораздо более высоких частотах. Подробно данные вопросы рассматриваются в монографии [2].

Экспериментальное исследование, результаты которого рассматриваются в настоящей работе, подробно описано в [3–5]. В частности, в работе [3] показано, что резонансное поглощение в среде, обладающей спиральной симметрией, зафиксировано на экспериментальной трассе между приемником (ПРМА) и передатчиком (ПРДА) при помощи скалярного анализатора цепей марки Р2М-04А фирмы «Микран» [6]. Поглощающая среда в данных работах представляет собой симметричный квадратный массив (3×3) объемных спиральных элементов, выполненных из проводящего материала, и располагается ровно в центре экспериментальной трассы.

Исследование аналогичных планарных структур представлено, например, в [7]. Как показано в [8], подобные массивы антенн, имеющих соответствующие параметры, способны генерировать ЭМВ с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ) [9] в диапазоне 3,4–4,7 ГГц. Более подробный обзор различных способов генерации ЭМВ с ненулевым ОУМ представлен в [10].

В [11] показано, что аналогичная постановка эксперимента при соответствующем выборе поглощающей среды позволяет рассматривать прошедшие сквозь нее ЭМВ в качестве волн с ненулевым ОУМ. В этой связи исследование рассматриваемой в настоящей работе поглощающей среды вызывает значительный интерес с точки зрения перспективы дальнейшего применения полученных результатов для генерации ЭМВ с ненулевым ОУМ.

Взаимное расположение ПРДА, ПРМА и исследуемой среды на экспериментальной трассе соответствует практически полному перекрытию излучения, транслируемого из ПРДА. Это позволяет рассматривать данный массив спиральных элементов также и в качестве некоторой метасреды, обладающей соответствующими электромагнитными свойствами (ЭМС). Однако ввиду конечного значения геометрических размеров исследуемого массива, в отличие от реальной метасреды, на его ЭМС, очевидно, влияют также и различные краевые эффекты. Стоит отметить, что для изучения свойств такой среды становится возможным использовать численные модели, описывающие поведение бесконечного массива, состоящего из одинаковых элементов.

Таким образом, целью данной работы является проведение сравнительного исследования экспериментальных результатов [3] и результатов численного моделирования, а именно: определение зависимости значения резонансной частоты от расстояния между излучающими элементами – элементарными ячейками бесконечного массива. Такое исследование позволяет выявить преимущества и недостатки рассматриваемой модели, а также оценить величину влияния краевых эффектов, обусловленных конечным значением размеров реальной системы. Это впоследствии позволит использовать полученные

результаты в различных технических приложениях – как для создания различных радиопоглощающих материалов, так и для разработки соответствующих антенных решеток.

Численная модель бесконечного массива излучающих элементов

Хорошо известный метод исследования моделей в виде бесконечного массива антенных элементов подразумевает наличие в системе не менее 100 активных антенн и не учитывает краевые эффекты, связанные с конечными значениями ее размеров [12–14]. В частности, модель [13] представляет собой бесконечный прямоугольный массив элементарных ячеек, содержащих излучающие элементы. Схематическое изображение такой ячейки с излучающим элементом, исследование для массива которых проведено в данной работе, представлено на рис. 1.

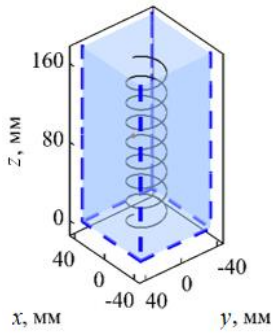


Рис. 1. Схематическое изображение элементарной ячейки исследуемого бесконечного массива

Фиксированными параметрами излучателя являются диаметр спирали D = 40 мм, шаг намотки s = 20 мм, количество витков n = 8, а также радиус сечения проводника r = 0,25 мм. Стоит отметить, что, как показано в [3], аналитический расчет резонансной частоты для такого единичного излучателя согласно методикам [15–17], дает значение порядка 100 МГц. В качестве окружающей среды излучателей используется воздушное пространство. Согласно [13], модель применима только к излучателям из идеально проводящего материала. Элементарные ячейки массива расположены относительно друг друга строго периодично, на одинаковых расстояниях. В этой связи данная модель не способна учитывать помимо краевых эффектов также и влияние наличия допусков, которые всегда присутствуют в реальных системах, как для размеров излучателей, так и для расстояния между ними. Таким образом, в целях выявления влияния краевых эффектов, связанных с конечностью геометрических размеров реальной системы, данная модель представляется вполне пригодной для сравнения с экспериментальными данными, представленными в работе [3].

Численный расчет значения резонансной частоты поглощения бесконечного массива излучающих элементов проводился согласно следующему алгоритму: вначале рассчитывалось значение импеданса исследуемого массива при заданном значении частоты, а затем при найденном значении импеданса на зафиксированной частоте – значение параметра $S21$ матрицы рассеяния. Данный параметр, выраженный в дБ, фактически представляет собой коэффициент прохождения ЭМВ по экспериментальной трассе [3].

Расчеты проводились в рамках диапазона 3,4–3,8 ГГц для 256 различных значений частоты. Значение расстояния между ячейками массива было изначально принято равным d = 80 мм, а затем также варьировалось. В частности, в целях проведения более полного сравнения полученных численных результатов с экспериментальными данными изменение значения параметра d в рамках проведения расчетов было проведено 10 раз с шагом 1 мм на интервале d = 75–84 мм.

На рис. 2 представлен типичный вид частотной зависимости вещественной и мнимой частей импеданса исследуемого бесконечного массива. Хорошо заметен изгиб кривых вблизи резонансной частоты. Следует отметить, что рассматриваемым в модели в качестве материала излучающих элементов возможно использовать только идеальный проводник, поэтому номиналы как вещественной, так и мнимой частей импеданса достаточно условны.

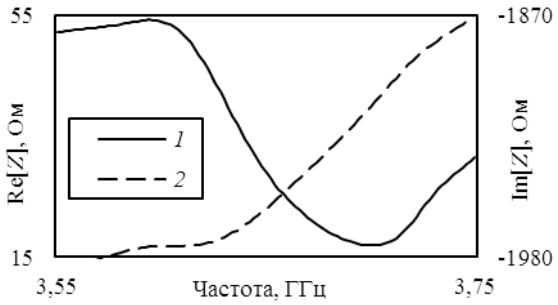


Рис. 2. Типичный вид частотной зависимости вещественной и мнимой частей импеданса бесконечного массива: *1* – вещественная часть Re[Z]; *2* – мнимая часть Im[Z]. Случай расстояния d = 80 мм

Полученные в результате расчетов зависимости от частоты коэффициента прохождения затем нормировались на минимальное значение для каждого из указанных случаев значения параметра d. На рис. 3 представлены типичные частотные зависимости данного параметра для случаев d = 75, 76 и 77 мм.

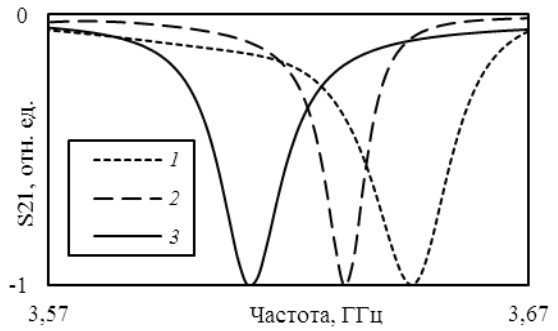


Рис. 3. Частотная зависимость нормированного коэффициента $S21$ для трех различных значений параметра d: *1* – 75 мм; *2* – 76 мм; *3* – 77 мм

Хорошо видно, что форма резонансных кривых для всех указанных размеров d остается неизмен-

ной, в то время как значение резонансной частоты при увеличении периода между элементарными ячейками бесконечного массива уменьшается. Следует отметить, что указанные выше вычисления представляют собой достаточно ресурсоемкую задачу, поэтому в целях выявления общего тренда проводились лишь один раз для каждого из значений *d*.

Частота, соответствующая минимальному значению коэффициента прохождения в каждом из данных случаев, принималась в качестве искомого резонансного значения. На рис. 4 представлена зависимость значения данной резонансной частоты для указанных 10 значений параметра *d*. Легко видеть, что данные значения практически точно укладываются на соответствующие прямые. Обе данные прямые имеют нисходящий тренд, а достоверность аппроксимации расчетных данных на интервале 5 мм составляет более 95%.

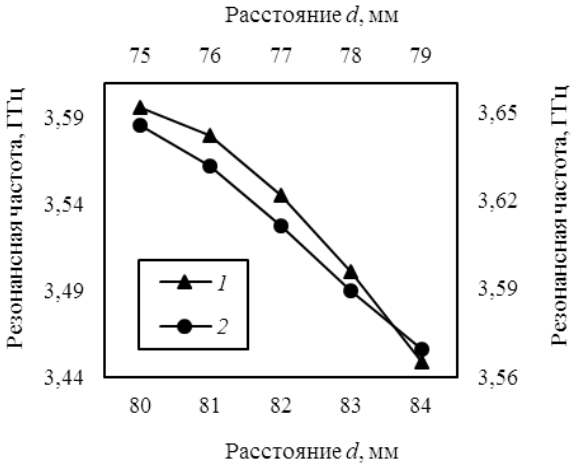


Рис. 4. Зависимость значения резонансной частоты от расстояния между элементами массива – параметра *d*: *1* – интервал 80–84 мм, нижняя горизонтальная и левая вертикальная оси, достоверность аппроксимации: 0,9654; *2* – интервал 75–79 мм, верхняя горизонтальная и правая вертикальная оси, достоверность аппроксимации: 0,9946

Сравнение результатов

На рис. 5 показано сравнение расчетного значения частотной зависимости параметра коэффициента прохождения, полученного для модели бесконечного массива, с экспериментальными данными [3]. Здесь представлены: *1* – численный результат, *2* – экспериментальный результат из работы [3]. Номером *3* обозначена кривая, полученная из *2* при сдвиге резонансной частоты на значение 3,59 ГГц. Для проведения сравнения с расчетными данными представлена кривая *4*, соответствующая увеличению полуширины кривой *3* со значения 36 МГц до значения 48 МГц.

Как легко видеть, расчетное значение зависимости резонансной частоты от параметра *d* по виду полностью совпадает с экспериментально полученной лоренцовской резонансной кривой, однако имеет отличающиеся параметры как центральной частоты, так и полуширины контура. Различие в определении резонансной частоты составляет порядка 70 МГц, или 2% от значения резонанса на частоте 3,66 ГГц. При этом полуширина резонансных кривых различается приблизительно в 1,3 раза, т.е. на 30%.

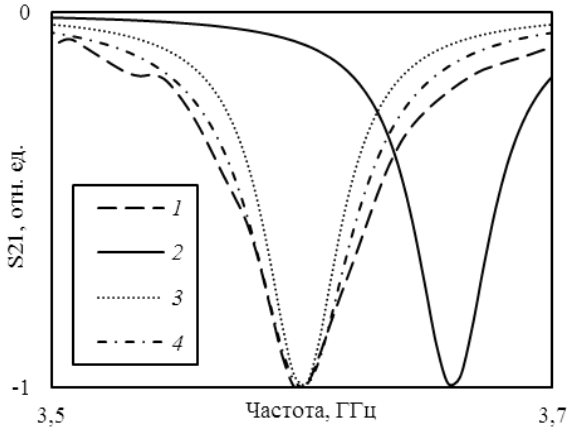


Рис. 5. Сравнение расчетного и экспериментального значений коэффициента прохождения для *d* = 80 мм

С другой стороны, исходя из значений, представленных на рис. 4, экстраполируя аппроксимирующие расчетные данные прямые линии до значения резонансной частоты 3,66 ГГц, возможно определить значение параметра модели *d*, при котором расчетное значение резонансной частоты точно соответствует экспериментальному. На рис. 6 представлено сравнение расчетной резонансной кривой, полученной при использовании линейной аппроксимации, с экспериментальной кривой для значения *d* = 74 мм. Как легко видеть, изменение данного параметра на 7,5% позволяет получить достаточно точное соответствие между расчетными и экспериментальными данными: различие в определении резонансной частоты составляет 0,5%.

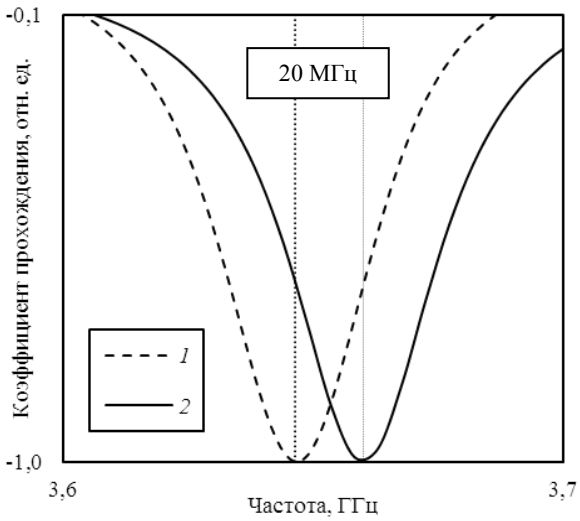


Рис. 6. Соответствие между расчетными и экспериментальными данными при изменении параметра *d*: *1* – расчетные данные при значении *d* = 74 мм; *2* – экспериментальные данные [3] при *d* = 80 мм

Заключение

Таким образом, возможно утверждать, что отказ от учета влияния краевых эффектов в рамках чис-

ленных расчетов хоть и дает результат, сопоставимый с экспериментальными данными, все же приводит к достаточно заметному рассогласованию в определениях параметров резонансных кривых. В частности, наблюдается занижение значения резонансной частоты, а также увеличение значения полуширины резонансной кривой. В то время как расхождение в численных и экспериментальных значениях резонансной частоты возможно устранить соответствующим выбором параметра модели d, уширение резонансного контура напрямую связано с особенностями рассматриваемой модели и не может быть устранено при помощи изменения какого-либо из параметров. Эти выводы будут учитываться при получении результатов в ходе дальнейших исследований численных моделей свойств сред со спиральной симметрией.

Стоит отметить, что модель [13] достаточно часто приводит к нефизическим результатам во время расчета. В частности, в некоторых случаях наблюдались положительные значения коэффициента прохождения, что с физической точки зрения фактически означает усиление средой распространения сигнала ПРДА. В этой связи данная модель пригодна лишь в достаточно ограниченном диапазоне частот, близких к резонансной, и не может быть применена для исследования широкополосного спектра.

Полученные в работе результаты позволяют применять рассмотренный метод для оценочных расчетов резонансной частоты поглощения метаматериалов, обладающих спиральной симметрией, а также оценивать различные геометрические размеры системы при проектировании антенной решетки, состоящей из соответствующих спиральных элементов.

Литература

1. Семченко И.В. Метаматериалы и метаповерхности / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Наука и инновации. – 2020. – № 8. – С. 23–27.

2. Семченко И.В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах / И.В. Семченко, С.А. Хахомов. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 279 с.

3. Кривин Н.Н. Резонансное поглощение электромагнитного излучения упорядоченным массивом проводящих элементов со спиральной симметрией / Н.Н. Кривин, Д.Е. Понамарев, М.А. Шипуля // Известия вузов. Физика. – 2024. – Т. 67, № 10. – С. 88–91.

4. Кривин Н.Н. Численное моделирование эффекта резонансного поглощения электромагнитных волн в среде со спиральной симметрией / Н.Н. Кривин, Д.Е. Понамарев, М.А. Шипуля // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 73–78.

5. Кривин Н.Н. Исследование возможности применения свойства «закрученности» электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне / Н.Н. Кривин, Д.Е. Понамарев, М.А. Шипуля // Сб. науч. тр. XX Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 25–28 апреля 2023 г. – Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2023. – Т. 1. – С. 315–317.

6. Scalar network analyzer R2M series – Micran. – URL: https://micran.com/productions/test-measurement/test-measurement-equipment/scalar-network-analyzers/scalar-network-analyzers-r2m-series, свободный (дата обращения: 14.07.2024).

7. Hinostroza I. Design of wideband arrays of spiral antennas. – Other: Supélec, 2013. – 105 p.

8. Li L. Mechanically reconfgurable single-arm spiral antenna array for generation of broadband circularly polarized orbital angular momentum vortex waves / L. Li, X. Zhou // Scientific Reports. – 2018. – No. 8. – 5128 p.

9. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // Physical Review A. – 1992. – Vol. 45, No. 11. – P. 8185–8189.

10. A review of orbital angular momentum vortex beams generation: from traditional methods to metasurfaces / K. Zhang, Yu. Wang, Yu. Yuan, Sh. Nawaz Burokur // Applied Sciences. – 2020. – No. 10. – 1015 p.

11. A small-divergence-angle orbital angular momentum metasurface antenna / J. Xu, Ke Bi, Ru Zhang, Ya. Hao, Ch. Lan, K.D. McDonald-Maier, Xi. Zhai, Z. Zhang, Sh. Huang1 // Research. – 2019. – ID 9686213. – 8 p.

12. Antenna Toolbox Documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/infinite-arrays.html, свободный (дата обращения: 21.08.2024).

13. Infinite Arrays – MatLab&Simulink [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/infinite-arrays.html, свободный (дата обращения: 21.08.2024).

14. Infinite Arrays Analysis – MatLab&Simulink Example [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/infinite-array-analysis.html, свободный (дата обращения: 21.08.2024).

15. Stray capacitances of single-layer solenoid air-core inductors / G. Grandi, M. Kazimierczuk, A. Massarini, U. Reggiani // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1999. – Vol. 35, No. 5. – P. 1162–1168.

16. Возненко В.И. Радиодетали, радиокомпоненты и их расчет / В.И. Возненко, А.В. Коваль, В.М. Коронкевич. М., Сов. радио. 1977. – 368 с.

17. Medhurst R.G. HF Resistance and self-capacitance of single-layer solenoids // Wireless engineer. – 1947. – Vol. 24. – P. 35–43.

Кривин Николай Николаевич
Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-8194-4764
Тел.: +7 (382-2) 90-71-51
Эл. почта: nikolai.n.krivin@tusur.ru

Понамарев Дмитрий Евгеньевич
Аспирант, преп. каф. КИПР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 53-21-84
Эл. почта: ponamarev.d.051214-@e.tusur.ru

Шипуля Михаил Алексеевич
Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 53-23-27
Эл. почта: sma@main.tusur.ru

Krivin N.N., Ponamarev D.E., Shipulia M.A.

Influence of the edge effects of medium with spiral symmetry on the resonant frequency of electromagnetic waves absorption

A comparison of experimental data on the passage of electromagnetic waves through a medium with spiral symmetry is presented with the results obtained using calculations based on the numerical model of the experiment under consideration. The environment model is an endless array of spiral antennas. It is shown that as a result of the presence of edge effects, this model gives underestimated estimates for the resonant absorption frequency of the medium under study.

Keywords: spiral symmetry, edge effects, numerical modeling.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-111-115

References

1. Semchenko I.V., Hahomov S.A., Samofalo A.L. *Metamaterialy i metapoverhnosti* [Metamaterials and metasurfaces]. Nauka i innovacii [*Science and Innovations*], 2020, no. 8, pp. 23 –27 (in Russ.).

2. Semchenko I.V., Hahomov S.A. *Elektromagnitnye volny v metamaterialah i spiral'nyh strukturah* [Electromagnetic Waves in Metamaterials and Spiral Structures]. *Minsk: Belaruskaya navuka* [Minsk: Belarusian Science], 2019, 279 p. (in Russ.).

3. Krivin N.N., Ponamarev D.E., Shipulya M.A. *Rezonansnoe pogloshchenie elektromagnitnogo izlucheniya uporyadochennym massivom provodyashchih elementov so spiral'noj simmetriej* [Resonant absorption of electromagnetic radiation by an ordered array of conducting elements with helical symmetry]. Izvestiya VUZov. Fizika [*Soviet Physics Journal. Russian Physics Journal*], 2024, vol. 67, no. 10, pp. 88–91 (in Russ.).

4. Krivin N.N., Ponamarev D.E., Shipulya M.A. *Chislennoe modelirovanie effekta rezonansnogo pogloshcheniya elektromagnitnyh voln v srede so spiralnoj simmetriej* [Numerical modeling of the effect of resonant absorption of electromagnetic waves in a medium with spiral symmetry]. *Proceedings of TUSUR University*, 2024, vol. 27, no 3, pp. 73–78 (in Russ.).

5. Krivin N.N., Ponamarev D.E., Shipulya M.A. *Issledovanie vozmozhnosti primeneniya svojstva «zakruchennosti» elektromagnitnyh voln v radiochastotnom diapazone* [Study of the possibility of using the property of «twisting» of electromagnetic waves in the radio frequency range]. *Sbornik nauchnyh trudov XX Mezhdunarodnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh: «Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk, Tomsk, 25-28 aprelya 2023 g»* [Collection XXI International Conference of Students and Young Scientists: «Prospects for the development of fundamental sciences», Tomsk, April 28-30, 2023], 2023, vol. 1, pp. 315–317 (in Russ.).

6. Scalar network analyzer R2M series – Micran. Available at: https://micran.com/productions/test-measurement/test-measurement-equipment/scalar-network-analyzers/scalar-network-analyzers-r2m-series, free (Accessed: July 14, 2024).

7. Hinostroza I. Design of wideband arrays of spiral antennas. *Other. Supélec*, 2013, 105 p.

8. Li L., Zhou X. Mechanically reconfgurable single-arm spiral antenna array for generation of broadband circularly polarized orbital angular momentum vortex waves. *SCiEntifiC Reports*, 2018, no 8, 5128 p.

9. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Physical Review A,* 1992, vol. 45, no 11, pp. 8185–8189.

10. Zhang K., Wang Yu., Yuan Yu., Burokur Sh. Nawaz. A review of orbital angular momentum vortex beams generation: from traditional methods to metasurfaces. *Applied Sciences*, 2020, no. 10, 1015 p.

11. Xu J., Bi Ke, Zhang Ru, Hao Ya., Lan Ch., McDonald-Maier K. D., Zhai Xi., Zhang Z., Huang1 Sh. A small-divergence-angle orbital angular momentum metasurface antenna. *Research*, 2019, ID 9686213, 8 p.

12. Antenna Toolbox Documentation. Available at: https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/infinite-arrays.html, free (Accessed: July 14, 2024).

13. Infinite Arrays – MATLAB&Simulink. Available at: https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/infinite-arrays.html, free (Accessed: August 21, 2024).

14. Infinite Arrays Analysis – MATLAB&Simulink Example. Available at: https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/infinite-array-analysis.html, free (Accessed: August 21, 2024).

15. Grandi G., Kazimierczuk M., Massarini A., Reggiani U. Stray capacitances of single-layer solenoid air-core inductors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 1162–1168.

16. Voznenko V.I., Koval' A.V., Koronkevich V.M. *Radiodetali, radiokomponenty i ih raschet* [Radio parts, radio components and their calculation]. Moscow, *Soviet Radio*, 1977, 368 p. (in Russ.).

17. Medhurst R.G. HF Resistance and self-capacitance of single-layer solenoids. *Wireless Engineer,* 1947, vol. 24, pp. 35–43.

Nikolai N. Krivin
Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor,
Head of the Department of Design and Production
of Radioelectronic Equipment, Tomsk State University of
Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-8194-4764
Phone: +7 (382-2) 90-71-51
Email: nikolai.n.krivin@tusur.ru

Dmitry E. Ponamarev
Postgraduate student, Department of Design and Production
of Radioelectronic Equipment, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 53-21-84
Email: ponamarev.d.051214-@e.tusur.ru

Michail A. Shipulia
Candidate of Sciences in Physics and Mathematics,
Assistant Professor, Department of Design of Units
and Components for Radioelectronic Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 53-23-27
Email: sma@main.tusur.ru

УДК 004.942+66.061.35

В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, А.О. Ушаков

Метод блочно-компонентных цепей и его перспективы в компьютерном моделировании химико-технологических систем

Рассматривается возможность разработки моделей для аппаратов химической промышленности с использованием метода блочно-компонентных цепей. Предполагается, что разрабатываемые модели будут реплицировать функциональность и поведение реальных аппаратов химической промышленности при проведении химико-технологического процесса. Метод блочно-компонентных цепей (МБКЦ) посредством использования неоднородных векторных связей позволяет создавать модели для различных сложных химико-технологических систем, включая устройства, в которых протекают сложные физико-химические и массообменные процессы. Разработка подобных моделей может помочь в оптимизации и автоматизации работы аппаратов химической промышленности, а разработанные на основе метода блочно-компонентных цепей модели химических аппаратов могут быть использованы для обучения или тренировки операторов технологических установок при проведении симуляции различных сценариев эксплуатации промышленного оборудования. В работе приведены схемы и алгоритмы работы разработанного условного объекта-блока химико-технологической системы, которые используются при создании моделей в среде моделирования МАРС (моделирование и автоматический расчет систем) для автоматизации моделирования химико-технологических процессов с учетом оказываемых на объект воздействий.

Ключевые слова: химический аппарат, химическая промышленность, метод блочно-компонентных цепей, моделирование и анализ, автоматизация.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-116-121

В настоящее время одним из актуальных направлений развития и совершенствования технологии различных физико-химических процессов является разработка и практическое применение моделей реальных аппаратов химического производства [1–5]. Помимо непосредственной возможности повышения уровня автоматизации и управления технологическим процессом, подобные модели могут выступать в качестве основы для разработки цифровых двойников, используемых в качестве тренажеров для операторов технологического оборудования, позволяя им подготовиться к различным сценариям без риска повреждения реального оборудования [6, 7].

В данной работе рассматривается разработка моделей аппаратов и систем химической промышленности в среде моделирования МАРС (моделирование и автоматический расчет систем) в формате метода блочно-компонентных цепей (МБКЦ), являющемся развитием метода компонентных цепей (МКЦ) [6] с неоднородными векторными связями [8–10]. В основе разработанной модели конкретного технологического аппарата, представленного в виде блока с входящими и выходящими вещественными многокомпонентными потоками, лежит учет влияния различных параметров и переменных процесса: скорости потоков, концентрации веществ в потоках, температуры процесса и др. [9].

Перед созданием модели блока технологического аппарата необходимо структурировать и алгоритмизировать его работу в рамках рассматриваемого метода блочно-компонентных цепей. В связи с этим появляется проблема структурного и визуального описания и представления разрабатываемых моделей, которую предлагается решить путем построения соответствующей программно-алгоритмической структуры для последующей интеграции в среду моделирования МАРС.

Успешная реализация данного метода возможна за счет нескольких преимуществ, проявляющихся при его применении для моделирования сложных химико-технологических систем (ХТС). Среди основных преимуществ можно выделить простую программную реализацию различных физико-химических процессов посредством использования неоднородной векторной связи, возможность интеграции метода в отечественное программное обеспечение, а также наличие собственной базы данных физико-химических параметров и коэффициентов для различных физико-химических процессов.

Основы метода блочно-компонентных цепей

МБКЦ принадлежит к универсальным методам компьютерного моделирования сложных мультифизических объектов и систем с информационными, энергетическими и многокомпонентными вещественными потоками. Он отличается объектно-ориентированным подходом с возможностью моделировать сложные системы при учете информационно-энергетических и неоднородных векторных связей. Элементы модели блока могут иметь различные свойства и природу, соединяясь в общую комплексную модель [8, 9]. При использовании данного метода появляется возможность автоматического формирования моделей блоков с учетом геометрического, топологического, физико-химического и математического аспектов. Посредством геометрического аспекта модель блока описывается в схемном топологическом редакторе при формировании компьютерной модели исследуемого технологического оборудования, а также на визуальном уровне

для визуализации результатов вычислительных экспериментов. При помощи топологического аспекта дается определение связям в моделируемой химико-технологической системе с рассматриваемым блоком и многокомпонентными вещественными потоками. Физико-химический аспект позволяет описать процессы физико-химической природы с учетом влияния различных параметров и условий проведения процесса на его протекание. Математический аспект предполагает математическое описание рассматриваемого процесса и алгоритма его проведения.

На кинетику процесса в любом аппарате химико-технологической системы влияют параметры его геометрии, теплопроводности, а также свойства и характеристики веществ, составляющих входящие в аппарат потоки [11–14], поэтому форма моделей блоков и их структура могут видоизменяться в соответствии с условиями проведения процесса.

Универсальное вычислительное ядро [15], лежащее в основе программного комплекса МАРС, обеспечивает автоматизированный анализ химико-технологических систем с моделями блоков технологических аппаратов и устройств.

Особенности и отличительные признаки МБКЦ

По сравнению с ранее представленным методом компонентных цепей МБКЦ обладает рядом преимуществ. Использование МБКЦ позволяет моделировать не только отдельный аппарат или устройство, но также учитывать влияние многокомпонентных вещественных потоков. Каждый компонент-вещество, в соответствии со справочными данными, имеет собственное наименование и параметры. С учетом особенностей протекания моделируемого процесса, который может иметь физическую, химическую или физико-химическую природу, осуществляется соответствующая классификация блока. Модель каждого блока предполагает наличие уравнений материального и теплового баланса, а также уравнений, описывающих тепло- и массоперенос.

В процессе моделирования учитывается зависимость кинетики процесса, а также характеристик тепло- и массопередачи как от параметров блока, так и от параметров и переменных компонент потока. Одним из главных отличий от МКЦ в данном случае будет выступать разбиение операции параметризации в процессе автоматизированного эксперимента на первичную и вторичную. Первичные переменные многокомпонентного вещественного потока входят в состав вектора-решения и представляют собой данные, полученные в процессе расчета в соответствующих моделях. Вторичные переменные находятся в зависимости от первичных и могут быть вычислены непосредственно через них. Для расчета вторичных переменных реализуется библиотека функций расчета. Подобная классификация переменных на первичные и вторичные позволяет существенно сократить размер вычислительной модели, формируемой и решаемой универсальным вычислительным ядром, оптимизируя процесс вычислительного эксперимента и позволяя уменьшить время на анализ всех ХТС.

В МБКЦ включаются методики решения уравнений массопереноса, теплопередачи, а также уравнений состояний (уравнения Менделеева–Клапейрона, Пенга–Робинсона, Соава–Редлиха–Квонга и др.), необходимых для расчета коэффициентов уравнений модели.

Использование неоднородной векторной связи при разработке моделей химико-технологических систем

Использование неоднородной векторной связи [9], являющейся основным теоретическим положением МБКЦ, дает возможность формировать и анализировать обширный набор компьютерных моделей химико-технологических систем, а также осуществлять их декомпозицию на составляющие ее отдельные блоки, представленные моделями-заменителями реального технологического аппарата [8].

При реализации в среде моделирования МАРС модели объекта со сложными процессами, протекающими в теплообменных и массообменных аппаратах, возможно образование дополнительных подцепей, состоящих из компонентов с неоднородными векторными связями и включающих в себя модели устройств измерения и исполнения. Значения выходных переменных данных блоков будут определяться в ходе проведения автоматизированного вычислительного эксперимента, алгоритм которого представлен на рис. 1.

Формирование математической модели при помощи МБКЦ осуществляется через соединение нескольких неоднородных векторных связей, образующих узел, в соответствие которому ставятся потенциальные переменные (например, давление, температура, концентрации веществ). Также в каждом узле выполняется основной топологический закон, согласно которому алгебраическая сумма потоковых переменных (массовых, объемных или мольных расходов, тепловых потоков, энтальпий, энтропий), входящих в каждый из узлов, в любой момент времени равна нулю. Количество данных переменных будет определяться структурой неоднородной векторной связи соответствующего векторного узла. Каждому узлу в соответствие ставится некоторое число топологических уравнений, равное числу энергетических связей, участвующих в коммутации.

При разработке модели блока химико-технологического аппарата с подключенными моделями блоков исполнительных и измерительных устройств происходит образование узлов N_v, описывающих процессы обмена информацией о многокомпонентных вещественных потоках в технологической системе. Данные узлы содержат информацию об энергетических S_{E1}, S_{E2},…, S_{En} и информационных S_{I1}, S_{I2},…, S_{Im} связях компонентов. Каждый подобный узел N_v может быть автоматически разбит на n энергетических узлов N_e и m информационных узлов N_I

соответственно. Векторные узлы $\mathbf{n}_n$, $\mathbf{n}_{n+i}$ и ветви $\mathbf{b}_n$ входят в общие совокупности соответствующих им множеств векторов $\mathbf{n}_k$ и $\mathbf{b}_k$. Каждому узлу и ветви из множеств $\mathbf{n}_k$ и $\mathbf{b}_k$ соответствуют свои информационные S_{Ii} и энергетические S_{En} связи, образующие в совокупности единую неоднородную векторную связь $\mathbf{S}_{Vk}$.

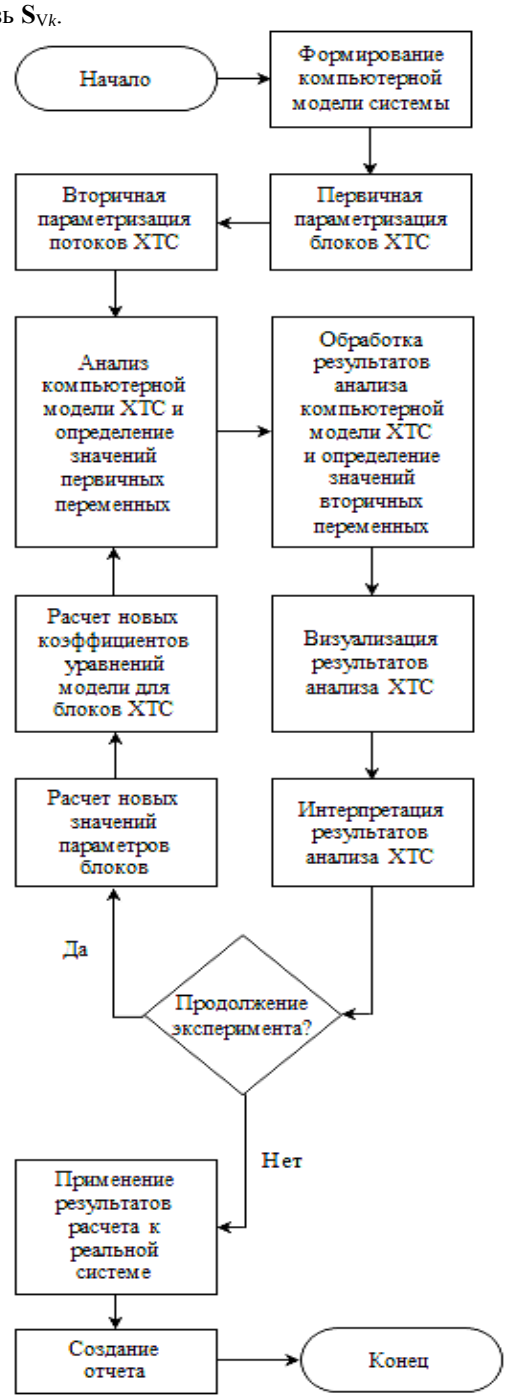


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного эксперимента в среде моделирования МАРС

Общий вид структуры неоднородной векторной связи $\mathbf{S}_{Vk}$ может быть представлен в виде разветвленной сети ветвей и узлов, входящих в энергетические или информационные связи (рис. 2). Зависимость ориентации ветви-вектора $\mathbf{b}_k$ относительно узла-вектора $\mathbf{n}_k$ описывается через инцидентность η. Отношение инцидентности положительно (η^+), если ветвь ориентирована в сторону узла, и отрицательно (η^-) в обратном случае.

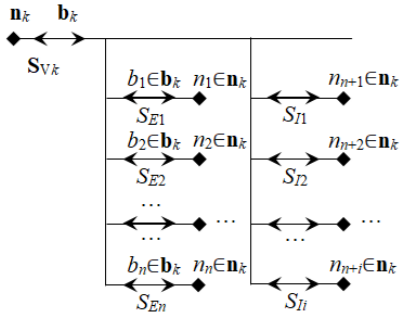


Рис. 2. Структура неоднородной векторной связи

Использование метода блочно-компонентных цепей применительно к разработке имитационной компьютерной модели химико-технологического аппарата предполагает, что рассматриваемый компонент-модель имеет заданное число связей на входе и выходе, характеризующих различные физико-химические процессы в соответствующих потоках, которые зависят от свойств самих потоков и от свойств аппарата. Такие связи будут образованы набором узлов и ветвей на входе $\{n_{\text{ВХ. }1}, b_{\text{ВХ. }1}, \ldots, n_{\text{ВХ. }n1}, b_{\text{ВХ. }n1}\}$ и выходе $\{n_{\text{ВЫХ. }1}, b_{\text{ВЫХ. }1}, \ldots, n_{\text{ВЫХ. }n2}, b_{\text{ВЫХ. }n2}\}$ соответственно.

Предполагается, что вещественные потоки могут образовываться одним веществом или несколькими веществами, называемыми далее *компонентами*. Если поток образован только одним компонентом, то он будет называться однокомпонентным и концентрация этого компонента в потоке приравнивается к единице, а концентрации иных компонентов – к нулю. В случае, когда вещественный поток представлен совокупностью нескольких компонентов, то содержание отдельного компонента может быть представлено как его концентрация в рассматриваемом потоке. Сумма концентраций компонентов в каждом потоке рассматриваемой модели химико-технологической системы в каждый момент времени равна 1.

Процессы, протекающие в химико-технологической системе с рассматриваемым аппаратом, могут быть описаны математически в форме уравнений с учетом переменных связей, образующих вектор (1):

$$\mathbf{V}_{\text{K_XTC}} = \left[\mathbf{P}_{\text{K}}, \mathbf{G}_{\text{K}}, \mathbf{T}_{\text{K}}, \mathbf{Q}_{\text{K}}, \mathbf{C}_{\text{K}}\right]^T, \qquad (1)$$

где $\mathbf{P}_{\text{K}}$ – вектор давлений; $\mathbf{G}_{\text{K}}$ – вектор расходов вещества; $\mathbf{T}_{\text{K}}$ – вектор температур; $\mathbf{Q}_{\text{K}}$ – вектор тепловых потоков; $\mathbf{C}_{\text{K}}$ – вектор концентраций компонентов (К) в связях рассматриваемого аппарата с другими аппаратами.

Общий вид структуры блока химико-технологического аппарата при его программно-алгоритмической реализации в среде моделирования МАРС может быть представлен в виде схемы из нескольких секций (рис. 3).

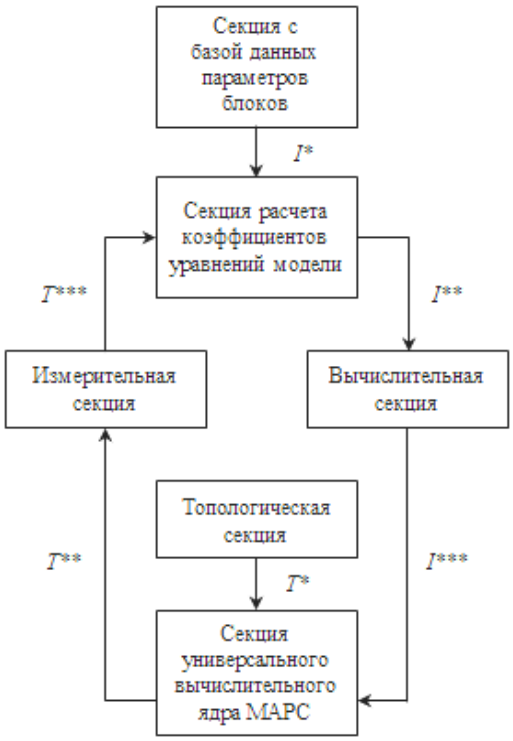


Рис. 3. Обобщенная структурная схема расчета блока химико-технологического аппарата: *I** – информация о физико-химических свойствах веществ; *I*** – информация о значениях параметрических коэффициентов; *I**** – информация об уравнениях; *T** – передача топологических характеристик; *T*** – передача вектора решений; *T**** – передача значений переменных связей основных параметров

Большая часть информации рассматриваемого блока, включая данные о свойствах веществ и параметры протекающего химико-технологического процесса для последующего расчета характеристик компонента, может быть занесена в единую базу данных, откуда в дальнейшем она будет передаваться в секцию расчета коэффициентов вычислительной модели рассматриваемого блока.

В секции расчета коэффициентов уравнений модели осуществляется вычисление, изменение и уточнение значений коэффициентов на основе различных методик обработки результатов компьютерного моделирования и данных измерительного блока.

Посредством топологической секции производится передача вычислительному ядру совокупности топологических данных взаимосвязанных компонентов в формате соотношений с топологическими координатами компонентной цепи, включая топологические характеристики интегрируемого в нее нового блока. Переданные топологические данные используются для автоматического формирования топологических уравнений анализируемой модели химико-технологической системы.

В вычислительной секции осуществляется непосредственное формирование уравнений модели блока химико-технологического аппарата на основе значений его параметров и коэффициентов. Информация о полученных уравнениях передается далее в вычислительное ядро МАРС.

На основе данных, полученных из топологической и вычислительной секций универсальным вычислительным ядром МАРС, формируется и решается общая система уравнений модели исследуемой химико-технологической системы. Результатом этого шага является общий вектор решений цепи.

В измерительную секцию включены функции расчета вторичных характеристик многокомпонентного потока на основе значений первичных характеристик, входящих в вектор решения модели. С помощью данной секции из общего вектора решения цепи осуществляется выбор значений необходимых параметров процесса для всех связей блока химико-технологического аппарата и их вывод на компоненты обработки и визуализации результатов решения модели химико-технологической системы.

Перспектива развития МБКЦ

Использование современных вычислительных инструментов и программных комплексов дает возможность активно развивать направление разработки моделей для различного технологического оборудования химической промышленности, что имеет большой потенциал в области оптимизации и автоматизации технологий, используемых на конкретных предприятиях. Разработка моделей реального технологического оборудования позволит повысить эффективность его эксплуатации, а разработанные на их основе цифровые аналоги будут обладать высоким потенциалом для реализации компьютерных тренажеров, выступая в качестве платформ для обучения операторов работе с производственным оборудованием и проведения различных экспериментов.

Реалистичность данного подхода была рассмотрена в настоящей работе на примере разработки и реализации алгоритмов расчета моделей химико-технологических систем в формате метода блочно-компонентных цепей в среде моделирования МАРС. Данный программный комплекс позволяет автоматизировать моделирование различных технологических процессов с учетом варьируемых параметров, оказывающих непосредственное влияние на производительность процесса.

Предложенный метод обладает рядом преимуществ перед ранее разработанным методом компонентных цепей, в том числе за счет расширенной классификации на первичные и вторичные переменные, позволяющей оптимизировать процесс вычислительного эксперимента. Использование неоднородной векторной связи дает возможность создавать компьютерные модели химико-технологических аппаратов и устройств, позволяя анализировать и прогнозировать их производительность при различных условиях эксплуатации.

В дальнейшем предполагается, что МБКЦ будет использоваться для построения и анализа компьютерных моделей химико-технологических систем ядерно-топливного цикла [16], в том числе с использованием уже имеющихся наработок при разработке компьютерных моделей сложных химико-технологических систем газоперерабатывающей промышленности на основе МКЦ [8].

Литература

1. Kiziltas H. The Energy and Exergy Analysis of the Reactor Unit of Boric Acid Production Process with ChemCAD Simulation // Brilliant Engineering. – 2021. – Vol. 3, No. 2. – P. 1–6. DOI: 10.36937/ben.2022.4617.

2. Мефедова Ю.А. Моделирование системы регулирования давления пара в деаэраторе АЭС в SIMINTECH / Ю.А. Мефедова, А.В. Бизов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 628–633. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-2-628-633.

3. Dynamic Simulation of an Oil and Gas Plant Using Aspen-HYSYS®: A Real Start-Up Process / R. Valdés, C. Sotelo, F. Muñoz-Torres, A. Favela-Contreras // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2024. – No. 2. – P. 229–241. DOI: 10.1007/s13369-024-09051-0.

4. Sidi-Yacoub I. ASPEN-HYSYS Simulation of AREW's Multi-Stage Adiabatic Reactor with Inter-Stage Quenching for Methanol Synthesis / I. Sidi-Yacoub, F. Ahmed, K. Ikram // Improved Oil and Gas Recovery. – 2023. – Vol. 7. – P. 1255. DOI: 10.14800/iogr.1255.

5. Santos Bartolome P. A comparative study on Aspen Hysys interconnection methodologies / P. Santos Bartolome, T. Van Gerven // Computers & Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 162. – P. 107785. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107785.

6. Дмитриев В.М. Автоматизация моделирования промышленных роботов / В.М. Дмитриев, Л.А. Арайс, А.В. Шутенков. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.

7. Кафаров В.В. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств: методология проектирования и теория разработки оптимальных технологических схем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, В.Л. Перов. – М.: Химия, 1979. – 320 с.

8. Дмитриев В.М. Среда многоуровневого компьютерного моделирования химико-технологических систем / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2017. – 332 с.

9. Дмитриев В.М. Принципы построения моделей сложных технологических объектов с неоднородными векторными связями / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, С.К. Важенин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – Т. 41, № 1. – С. 104–111.

10. Кочергин М.И. Структура многоуровневой модели механической системы для 3D-визуализации результатов моделирования / М.И. Кочергин, А.А. Дрозд // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: матер. VI Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Тольятти, 18–20 апреля 2023 г. – Тольятти: Тольят. гос. ун-т, 2023. – С. 72–80.

11. Математическое моделирование и анализ функционирования цилиндрического пиролизного реактора с радиальным нагревом / А.В. Митрофанов, О.В. Сизова, Н.С. Шпейнова, В.А. Катюшин // Вестник Ивановского гос. энергет. ун-та. – 2021. – № 5. – С. 60–67. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.060-067.

12. Численное моделирование гиперзвукового обтекания полусферы с учетом неравновесных физико-химических процессов в высокотемпературном воздухе / К.Н. Волков, В.А. Гимадиев, Ю.В. Добров, А.Г. Карпенко // Вычислительные методы и программирование. – 2022. – Т. 23, № 3. – С. 248–274. DOI: 10.26089/NumMet.v23r316.

13. Еникеева Л.В. Метод регуляризации Тихонова при решении обратных задач химической кинетики / Л.В. Еникеева, И.М. Губайдуллин, Д.А. Дубовцев // Вестник Башкирского ун-та. – 2022. – Т. 27, № 3. – С. 643–649. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2022.3.28.

14. Математическое моделирование процесса диффузии и кинетики массопереноса веществ в различных средах / А.А. Ганюков, И.А. Кадырова, А.С. Кадыров, Д.Д. Маратов // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 4. – С. 86–91.

15. Дмитриев В.М. Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.В. Ганджа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 2. – С. 24–28.

16. Компьютерная модель экстракционного реактора идеального смешения в формате метода компонентных цепей с неоднородными векторными связями / А.О. Ушаков, Т.В. Ганджа, В.М. Дмитриев, П.Б. Молоков // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 599–614. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-3-599-614.

Дмитриев Вячеслав Михайлович
Д-р техн. наук, проф. каф. компьютерных систем
в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-1089-6993
Тел.: +7 (382-2) 70-15-15
Эл. почта: dmitriewvm@gmail.com

Ганджа Тарас Викторович
Д-р техн. наук, проф. каф. КСУП ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-4996-8114
Тел.: +7 (382-2) 41-39-15
Эл. почта: gandgatv@gmail.com

Ушаков Александр Олегович
Аспирант отд. ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ)
Томского политехнического ун-та (ТПУ)
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Инж.-исследователь Северского технологического ин-та
Национального ядерного университета «МИФИ»
Коммунистический пр-т, 65, г. Северск, Россия, 636036
Тел.: +7-952-896-99-19
Эл. почта: 1alexander6@mail.ru

Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Ushakov A.O.

Block-component circuit method and its prospects in computer modeling of chemical-engineering systems

The article considers the possibility of developing models for chemical industry devices using the block-component circuit method. It is assumed that the developed models will replicate the functionality and the behavior of real devices used in chemical industry during the chemical-technological process. Through the use of heterogeneous vector connections, the block-component circuit method (BCM) allows creating models for various complex chemical-technological systems, including devices where complex physicochemical and mass-exchange processes occur. The development of such models can help in optimizing and automating the operation of devices used in chemical industry. In addition, the models of chemical devices developed on the basis of the block-component circuit method can be used to teach or train operators of process plants when simulating various scenarios of industrial

equipment operation. The paper presents the schemes and the algorithms of the developed conditional object-block of the chemical-technological system used to create models in MARS (Modeling and Automatic Research of Systems) environment to automate the modeling of chemical-technological processes, taking into account the impacts exerted on the object.

Keywords: chemical apparatus, chemical industry, block-component circuit method, modeling and analysis, automation.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-116-121

References

1. Kiziltas H. The Energy and Exergy Analysis of the Reactor Unit of Boric Acid Production Process with Chem-CAD Simulation. *Brilliant Engineering*, 2021, vol. 3, no. 2, pp. 1–6. DOI: 10.36937/ben.2022.4617.

2. Mefedova Yu.A. Modelirovanie sistemy regulirovaniya davleniya para v deaeratore AES v SIMINTECH [Modeling of the steam pressure regulation system in the NPP deaerator in SIMINTECH]. *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 2, pp. 628–633. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-2-628-633 (in Russ.).

3. Valdés R., Sotelo C., Muñoz-Torres F., Favela-Contreras A. Dynamic Simulation of an Oil and Gas Plant Using Aspen-HYSYS®: A Real Start-Up Process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2024, no. 2, pp. 229–241. DOI: 10.1007/s13369-024-09051-0.

4. Sidi-Yacoub I., Ahmed F., Ikram K. ASPEN-HYSYS Simulation of AREW's Multi-Stage Adiabatic Reactor with Inter-Stage Quenching for Methanol Synthesis. Improved Oil and Gas Recovery, 2023, vol. 7. p. 107785. DOI: 10.14800/iogr.1255.

5. Santos Bartolome P.A. Comparative study on Aspen Hysys interconnection methodologies. *Computers & Chemical Engineering*, 2022, vol. 162. p. 107785. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107785.

6. Dmitriev V.M., Arais L.A., Shutenkov A.V. *Avtomatizaciya modelirovaniya promyshlennykh robotov* [Automation of modeling of industrial robots]. Moscow, Scientific and technical publishing house «Machine Building», 1995, 304 p. (in Russ.).

7. Kafarov V.V. Matematicheskie osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya himicheskih proizvodstv: Metodologiya proektirovaniya i teoriya razrabotki optimalnyh Tehnologicheskih skhem [Mathematical foundations of sound design of industrial production: Design methodology and theory of development of optimal technological schemes]. Moscow: *Chemistry*, 1979, 320 p. (in Russ.).

8. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. *Sreda mnogourovnevogo kompyuternogo modelirovaniya* [Environment for multi-level computer modeling of chemical-technological systems]. Tomsk, Publishing house Tomsk State University, 2017, 332 p. (in Russ.).

9. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Vazhenin S.K. *Principy postroeniya modelej slozhnykh tekhnologicheskikh objektov s neodnorodnymi vektornymi svyazyami* [Principles of constructing models of complex technological objects with heterogeneous vector connections]. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2014, vol. 41, no. 1, pp. 104–111 (in Russ.).

10. Kochergin M.I. *Struktura mnogourovnevoj modeli mekhanicheskoj sistemy dlya 3D-vizualizacii rezultatov modelirovaniya* [Structure of a multi-level model of a mechanical system for 3D visualization of modeling results]. *Information Technologies in Modeling and Control: Approaches, Methods, Solutions: Proceedings of the VI All-Russian Scientific Conference with International Participation*, Togliatti, April 18-20, 2023. Togliatti, Togliatti State University, 2023, pp. 72–80 (in Russ.).

11. Mitrofanov A.V., Sizova O.V., Shpeinova N.S., Katyushin V.A. Mathematical modeling and analysis of the functioning of a cylindrical pyrolysis reactor with radial heating. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, 2021, no. 5, pp. 60–67. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.060-067 (in Russ.).

12. Volkov K.N., Gimadiev V.A., Dobrov Yu.V., Karpenko A.G. Numerical simulation of hypersonic flow around a hemisphere taking into account nonequilibrium physicochemical processes in high-temperature air. *Computational Methods and Programming*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 248–274. DOI: 10.26089/NumMet.v23r316 (in Russ.).

13. Enikeeva L.V. *Metod regulyarizacii Tihonova pri reshenii obratnyh zadach himicheskoj kinetiki* [Tikhonov's regularization method for solving inverse problems of chemical kinetics]. *Bulletin of the Bashkir University*, 2022, vol. 27, no. 3, pp. 643–649. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2022.3.28 (in Russ.).

14. Ganyukov A.A., Kadyrova I.A., Kadyrov A.S., Maratov D.D. Mathematical modeling of the diffusion process and kinetics of mass transfer of substances in various media. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2021, no. 4, pp. 86–91 (in Russ.).

15. Dmitriev V.M. *Arhitektura universalnogo vychislitelnogo yadra dlya realizacii virtualnyh laboratorij* [Architecture of a universal computing core for implementing virtual laboratories]. *Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2004, No. 2, pp. 24–28 (in Russ.).

16. Ushakov A.O., Gandzha T.V., Dmitriev V.M., Molokov P.B. Computer model of an ideal mixing extraction reactor in the format of the method of component chains with inhomogeneous vector connections. *Computer Research and Modeling*, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 599–614. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-3-599-614 (in Russ.).

Vyacheslav M. Dmitriev
Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Computer Control and Design Systems,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-4996-8114
Phone: +7 (382-2) 70-15-15
Email: dmitriewvm@gmail.com

Taras V. Gandzha
Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Computer Control and Design Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-4996-8114
Phone: +7 (382-2) 41-39-15
Email: gandgatv@gmail.com

Alexander O. Ushakov
Postgraduate student, Nuclear Fuel Cycle Department,
Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Research Engineer, Seversk Technological Institute
National Research Nuclear University «MEPHI»
65, Kommunistichesky pr., Seversk, Russia, 636036
Phone: +7-952-896-99-19
Email: 1alexander6@mail.ru

УДК 621.317.73

К.А. Кашкаров, В.Г. Букреев

Моделирование литий-ионного аккумулятора с учетом деградации свойств материалов его элементов

Разработана перенастраиваемая математическая модель литий-ионного аккумулятора (ЛИА) на основе моделей Шеферда и Тевенина. В качестве изменяемых параметров используется емкость и активное сопротивление аккумулятора. Алгоритм определения этих параметров в текущий момент времени позволяет учесть влияние такого важного явления, как деградация свойств материалов элементов ЛИА, на характеристики аккумулятора. Результаты моделирования отражают высокую эффективность предлагаемого подхода.
Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, схема замещения, эффект деградации.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-122-126

Разработка математической модели определения состояния ЛИА с учетом эффекта деградации предполагает интеграцию множества факторов, таких как электрофизические процессы, термодинамические изменения и характеристики нагрузки, оказываемые на ЛИА в процессе его работы.

Модели замещения ЛИА и литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) в целом активно развиваются и применяются на этапах анализа процессов в ЛИА и внедрения ЛИАБ.

Разработанная модель может быть использована для более точного прогнозирования поведения аккумуляторов в различных условиях эксплуатации и для создания стратегии управления их зарядом и разрядом с целью увеличения срока службы.

Анализ математических моделей ЛИА на основе эквивалентных схем замещения

Эквивалентная схема замещения представляет собой упрощенную модель, описывающую электрические характеристики аккумуляторов с помощью сосредоточенных элементов, таких как резисторы, конденсаторы, индуктивности и источники тока и напряжения.

Научные исследования выделяют несколько основных механизмов деградации литий-ионных аккумуляторов. Среди них можно отметить циклическое старение, которое происходит из-за изменения структуры электродов в процессе многократных заряда и разряда ЛИА, а также влияние высоких температур на их состояние. Кроме того, гальваностатическая деградация, вызываемая различными режимами работы аккумуляторов, также играет свою роль [1].

Рассмотрим основные математические соотношения для построения модели деградации ЛИА.

Для расчета выходного напряжения $U(t)_{\text{вых}}$ статической модели ЛИА используется следующее уравнение:

$$U(t)_{\text{вых}} = E_0 \pm i(t)R_0, \qquad (1)$$

где E_0 – начальное значение ЭДС ЛИА, В; $i(t)$ – ток заряда (+) или разряда (–), А; R_0 – постоянное внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом.

Для моделей, описывающих динамические изменения в процессе работы ЛИА с изменением тока заряда и разряда, используются модели Шеферда и Тевенина. Модель Шеферда [2, 3] основана на уравнении, описывающем напряжение аккумулятора $U(t)_{\text{вых}}$ в зависимости от заряда емкости $Q(t)$:

$$E(t) = E_0 - K\frac{Q_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\Sigma}(t)} + Ae^{(-BQ_{\Sigma}(t))}, \qquad (2)$$

где K – поляризационная составляющая внутреннего сопротивления ЛИА, $Q_{\max}$ – максимальный заряд ЛИА, $Q_{\Sigma}(t)$ – заряд ЛИА, отданный за время t, A – экспоненциальная составляющая при заряде и разряде ЛИА; B – инверсная экспоненциальная составляющая при заряде и разряде ЛИА.

Модель Тевенина [4, 5] представляет аккумулятор как эквивалентную схему, состоящую из идеального источника напряжения и внутреннего сопротивления (рис. 1), что позволяет упростить анализ электрической цепи с аккумулятором и производить расчёты на основе уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{dU_t}{dt} = \dfrac{I}{C_t} - \dfrac{U_t}{R_t \cdot C_t}, \\ U_{\text{вых}} = E_0 \pm IR_0 + U_t, \end{cases} \qquad (3)$$

где U_t – поляризационное напряжение ЛИА, В; R_t – поляризационное сопротивление ЛИА, Ом; C_t – поляризационная емкость ЛИА, Ф.

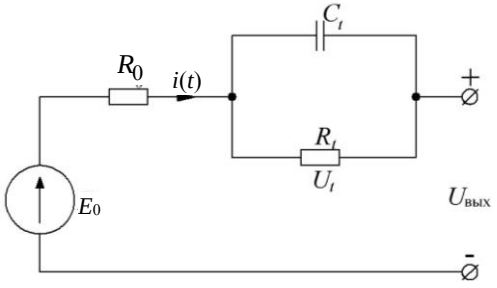


Рис. 1. Эквивалентная схема модели Тевенина

Комбинированная модель, основанная на подходах Шеферда и Тевенина, позволяет более точно

моделировать динамические процессы в аккумуляторах и учитывать их физические ограничения [6].

$$\begin{cases} \dfrac{dU_t}{dt} = \dfrac{I}{C_t} - \dfrac{U_t}{R_t \cdot C_t}; \\ U_{\text{вых}} = E_0 - K\dfrac{Q_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\Sigma}(t)} + Ae^{-BQ_{\Sigma}(t)} \pm I \cdot R_0 - U_t. \end{cases} \quad (4)$$

Математическая модель старения в программе MatLab Simulink [7]

$$Q(n) = \begin{cases} Q_{\text{BOL}} - \varepsilon(n) \cdot (Q_{\text{BOL}} - Q_{\text{EOL}}), \\ Q(n-1), \end{cases} \quad (5)$$

$$R(n) = \begin{cases} R_{\text{BOL}} - \varepsilon(n) \cdot (R_{\text{EOL}} - R_{\text{BOL}}), \\ R(n-1), \end{cases} \quad (6)$$

где $n = kT_h \quad (k = 1, 2, 3, ..., \infty)$; T_h – продолжительность периода заряда или разряда, полный цикл которого достигается, когда аккумулятор заряжается или разряжается; Q_{BOL} – максимальная емкость (Ач) в начале срока службы при нормальной температуре; Q_{EOL} – максимальная емкость (Ач) в конце срока службы при нормальной температуре; R_{BOL} – внутреннее сопротивление в начале срока службы при нормальной температуре; R_{EOL} – внутреннее сопротивление в конце срока службы при нормальной температуре; ε – фактор старения батареи, равен нулю в начале срока службы и единице в конце срока службы.

Таким образом, представленная модель батареи с эффектом старения в среде MatLab Simulink изменяет состояние емкости батареи и внутреннего сопротивления в зависимости от изменения фактора старения батареи.

Фактор старения батареи в представленной модели изменяется по следующему закону [8]:

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} \varepsilon(n-1) + \dfrac{0{,}5}{N(n-1)}\left(2 - \dfrac{DOD \cdot (n-2) + DOD \cdot (n)}{DOD \cdot (n-1)}\right), \\ \varepsilon \cdot (n-1), \end{cases} \quad (7)$$

где DOD – уровень заряда батареи в % по истечении половины цикла; N – максимальное количество циклов, которое определяется по формуле

$$N(n) = H\left(\frac{DOD(n)}{100}\right)^{-\xi} \cdot \exp\left(-\psi\left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_a(n)}\right)\right) \times \times \left(I_{\text{dis_ave}}(n)\right)^{-\gamma_1} \cdot \left(I_{\text{ch_ave}}(n)\right)^{-\gamma_2}, \quad (8)$$

где H – номер цикла; ξ – фактор экспоненты для DOD; ψ – константа скорости Арениуса для номера цикла; $I_{\text{dis_ave}}$ – средний ток разряда во время цикла; $I_{\text{ch_ave}}$ – средний ток заряда во время цикла; γ_1 – фактор экспоненты для процесса разряда ЛИА; γ_2 – фактор экспоненты для процесса заряда ЛИА.

Метод определения параметров литий-ионного аккумулятора с учетом эффекта деградации параметров

Процесс моделирования литий-ионного аккумулятора с учетом деградации параметров начинается с инициализации, где устанавливаются начальные значения таких характеристик, как емкость, внутреннее сопротивление и состояние заряда. Далее происходит моделирование процессов заряда и разряда, в котором применяются математические модели для оценки тока, напряжения и тепловых процессов внутри аккумулятора. Важным этапом является учет деградации параметров, включая снижение емкости, увеличение внутреннего сопротивления и изменения напряжения с течением времени и количеством циклов.

На основе полученных данных осуществляется оценка состояния аккумулятора, что позволяет вычислить такие параметры, как ток, мощность, уровень заряженности и ожидаемый срок службы. При необходимости параметры модели корректируются с учетом новых данных о деградации и состоянии устройства. В завершение результаты моделирования используются для оптимизации работы аккумулятора, управления его зарядом и разрядом, а также для предотвращения перегрева и других возможных проблем. Этот алгоритм можно адаптировать для модели литий-ионного аккумулятора с твердым электролитом, чтобы проанализировать его поведение с учетом деградации параметров.

Разработанный алгоритм возможно экстраполировать на модель ЛИАБ целиком с целью моделирования поведения ЛИАБ в КА с учётом эффекта деградации параметров [9].

Построение ЛИА с учетом эффекта деградации в MatLab Simulink

Среда MatLab Simulink является мощным программным продуктом, используемым для моделирования, симуляции и анализа динамических систем, в том числе для исследования химических источников тока. В программе присутствует встроенная модель поведения химического источника тока с возможностью имитации ЛИА. Для выявления погрешности разработанной модели производится сравнение с эталонной моделью, встроенной в MatLab Simulink [10].

Разработанная модель старения ЛИА (рис. 2, 3) предполагает наличие эталонной модели ЛИА MatLab Simulink (блок № 1), с которой будет сравниваться разработанная модель, модели замещения Шеферда–Тевенина с наличием блока деградации параметров (блок № 2), источником тока, формирующим воздействие на ЛИА (блок № 3), визуализация и сравнение параметров ЛИА (блок № 4).

Для поддержания остаточной емкости аккумулятора в диапазоне более 20 и менее 80% блок № 3 был реализован с помощью функции сравнения, при достижении одного из диапазонов система управления источником тока заряда или разряда меняет полярность компонента «Controlled Current Source» (см. рис. 3) [11].

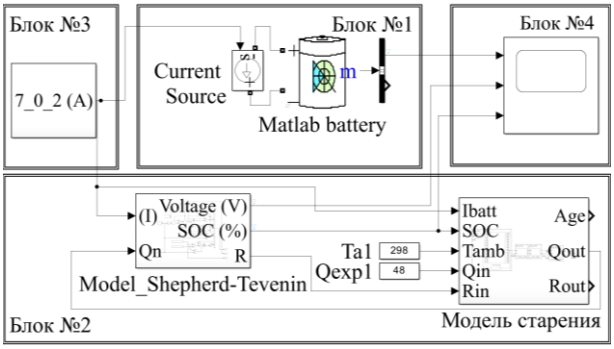


Рис. 2. Имитационная модель ЛИА с учётом эффекта деградации параметров

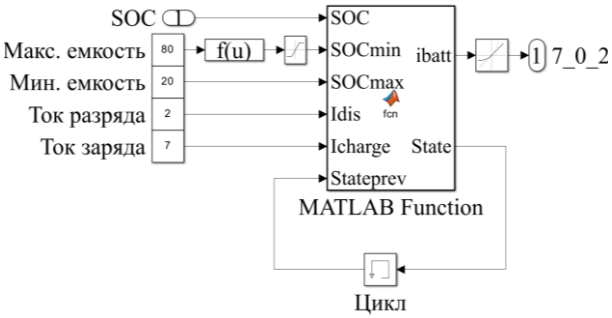


Рис. 3. Реализация воздействующего тока заряда/разряда на модель ЛИА

Модель деградации свойств ЛИА (рис. 4) разбита на 4 блока: запоминание предыдущих значений (блок № 1), расчёт максимального количества циклов $N(n)$ (блок № 2), расчёт $\varepsilon(n)$ (блок № 3), расчёт $Q(n)$ и $R(n)$ (блок № 4).

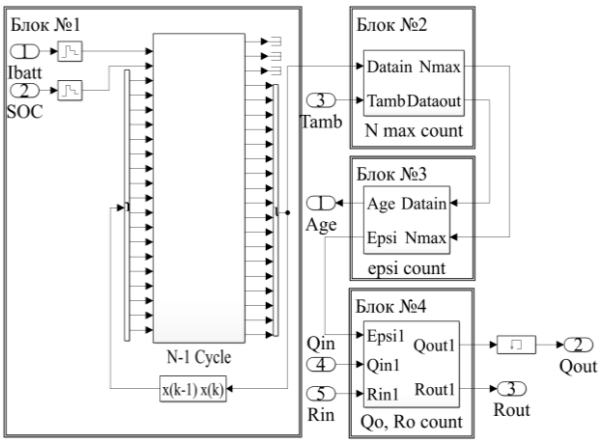


Рис. 4. Реализация блока деградации ЛИА

Для выполнения условий уравнения (5) происходит запоминание текущих значений параметров ЛИА (n), которые в следующем цикле моделирования будут представлены как ($n-1$).

Проверка адекватности работы модели ЛИА с учетом эффекта деградации в среде MatLab Simulink

Для проверки адекватности модели реализовано уравнение вычисления максимальной относительной погрешности выходного напряжения и остаточной емкости разработанной модели, проверяя её адекватность по результатам сравнения с моделью ЛИА MatLab Simulink (рис. 5).

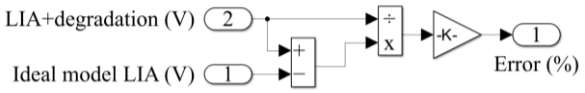


Рис. 5. Схема определения относительной погрешности в MatLab Simulink

По результатам моделирования характеристики модели ЛИА с блоком деградации и без блока деградации визуализируются на осциллограммах (рис. 6, 7).

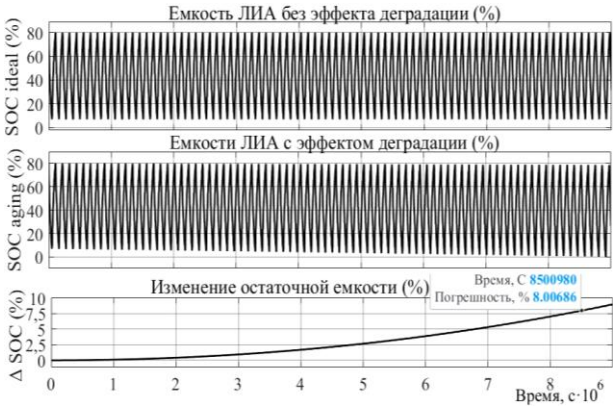


Рис. 6. Осциллограммы емкости ЛИА без блока деградации, с блоком деградации и изменения емкости в зависимости от количества циклов

По результатам моделирования 500 циклов заряда / разряда ЛИА с блоком деградации изменение остаточной емкости ЛИА составило 8%. Таким образом, наблюдаемое снижение емкости ЛИА можно рассматривать как показатель деградации в процессе эксплуатации.

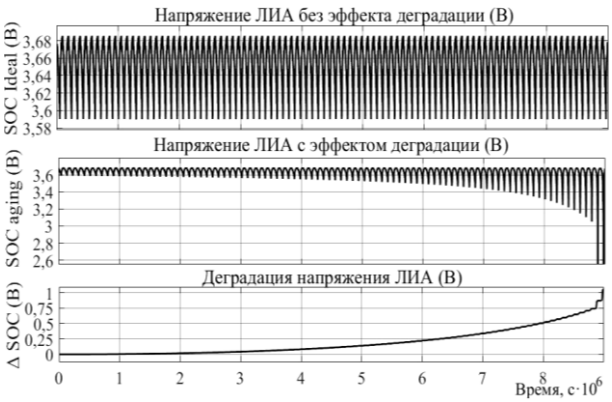


Рис. 7. Осциллограммы напряжения ЛИА без блока деградации, ЛИА с блоком деградации и изменения напряжения в зависимости от количества циклов

По результатам моделирования 500 циклов заряда-разряда ЛИА с блоком деградации изменение напряжения ЛИА 0,5 В. Впоследствии ЛИА с блоком деградации переходит в область глубокого разряда и напряжение ЛИА падает ниже допустимого, ЛИА теряет возможность сохранять и отдавать энергию.

Выводы

Погрешность разработанной модели со встроенной моделью ЛИАБ программной среды MatLab Simulink составила ±3%, что подтверждает её достоверность и возможность использования для прогнозирования состояния аккумуляторов в реальных условиях.

Предложенная математическая модель ЛИА с эффектом деградации параметров была проверена при помощи программной среды MatLab Simulink. Предложенная модель позволяет проводить комплексное моделирование процессов в аккумуляторной батарее, точно воспроизводить изменения напряжения в зависимости от тока и состояния заряда. Модель учитывает увеличение внутреннего сопротивления батареи с течением времени, влияющее на её эффективность.

С помощью последовательного соединения экземпляров ЛИА разработанная модель может быть масштабирована до ЛИАБ. Модель может быть использована для оптимизации режимов заряда и разряда ЛИАБ с целью продления её срока службы.

Таким образом, разработанная математическая имитационная модель аккумуляторной батареи с эффектом деградации в среде MatLab Simulink является мощным инструментом для исследования и оптимизации работы аккумуляторов. Она способствует более глубокому пониманию процессов деградации и может быть использована для разработки стратегий управления и эксплуатации аккумуляторных систем в различных приложениях.

Литература

1. Возмилов А.Г. Исследование и математическое моделирование литий-ионного аккумулятора / А.Г. Возми-лов, С.А. Панишев, А.А. Лисов // Вестник ЮУрГУ. – Сер.: Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 30–36.

2. Кашкаров К.А. Математическая модель деградации литий-ионного аккумулятора для оценки остаточной емкости // XXIX Байкальская Всерос. конф. с междунар. участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении». – Иркутск: ДВФУ, 2024. – С. 35.

3. Hanane H. A new proposed shepherd model of a Li-ion open circuit battery based on data fitting / H. Hanane, K. Nacer, M'Sirdi, A. Naamane // IMAACA 2019. – Lisbon, Portugal, 2019. – P. 53–92. – URL: https://hal.science/hal-02471659v1.

4. He H. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach / H. He, R. Xiong, J. Fan // Energies. – 2011. – No. 4. – P. 582–598.

5. Tremblay O. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles // IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2007. – P. 284–289.

6. Брянцев А.А. Алгоритм определения параметров динамической модели литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. науч. трудов. – Красноярск: Изд-во СибГАУ, 2019. – Т. 1. – С. 575–578.

7. Гареева Г.А. Основы программирования в MatLab: учеб. пособие / Г.А. Гареева, Д.Р. Григорьева. – Набережные Челны: Изд-во Набережночелнинского института КФУ, 2019. – 104 с.

8. Lithium iron phosphate-based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model / N. Omar, M.A. Monem, Y. Firouz, J. Salminen, J. Smekens, O. Hegazy, H. Gaulous, G. Mulder, P. Van den Bossche, T. Coosemans, J. Van Mierlo // Applied Energy. – 2014. – Vol. 113. – P. 1575–1585.

9. Брянцев А.А. Разработка и исследование модели устройства перераспределения энергии между литий-ионными аккумуляторами в аккумуляторной батарее космического аппарата / А.А. Брянцев, К.А. Кашкаров, К.Д. Пайгин // Тезисы докладов Всерос. молодежного конкурса науч.-техн. работ «Орбита молодежи». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – С. 93.

10. Distributed MPC for efficient coordination of storage and renewable energy sources across control areas / K. Baker, J. Guo, G. Hug, X. Li // IEEE Transaction on Smart Grid. – 2016. – Vol. 7. – P. 992–1001.

11. An electrochemical impedance spectroscopy method for prediction of the State of Charge of a nickel-metal hydride battery at open circuit and during discharge / K. Bundy, M. Karlsson, G. Lindbergh, A. Lindqvist // Journal of Power Sources. – 1998. – Vol. 72, No. 2. – P. 118–125.

Кашкаров Кирилл Андреевич
Аспирант Инженерной школы энергетики (ИШЭ)
Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-999-495-28-01
Эл. почта: kashkarovkirill@icloud.com

Букреев Виктор Григорьевич
Д-р техн. наук, проф. ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9861-9765
Тел.: +7-913-854-21-96
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Kashkarov K.A., Bukreev V.G.

Modeling of lithium-ion battery considering the materials degradation properties of its cells

A reconfigurable mathematical model of a lithium-ion battery (LIA) based on the Schaeferd and Thevenin models is developed. The capacity and the active resistance of the battery are used as variable parameters. The algorithm to determine these parameters at the current moment of time allows taking into account the influence of such an important phenomenon as the degradation of material properties of LIA elements on the battery characteristics. The modeling results reflect the high efficiency of the proposed approach.

Keywords: lithium-ion battery, substitution scheme, degradation effect.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-122-126

References

1. Vozmilov A.G., Panishev S.A., Lisov A.A. Research and mathematical modeling of a lithium-ion battery. *Journal «Bulletin of South Ural State University. Series «Power Engineering»,* 2022, vol. 22, no. 2, pp. 30–36 (in Russ.).

2. Kashkarov K.A. *Matematicheskaya model degradacii litij-ionnogo akkumulyatora dlya ocenki ostatochnoj yomkosti* [Mathematical model of the lithium-ion battery degradation

for the residual capacity estimation]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. Tezisy dvadcat devyatoy Bajkalskoj Vserossiyskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management Abstracts of the Twenty-ninth Baikal All-Russian Conference with International Participation]. Irkutsk. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2024, pp. 35.

3. Hanane H., Nacer K M'Sirdi, Naamane A. A new proposed shepherd model of a li-ion open circuit battery based on data fitting. *IMAACA 2019,* Lisbon, Portugal, 2019, pp. 53–92. URL: https://hal.science/hal-02471659v1.

4. He H., Xiong R., Fan J., Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies, 2011*, no. 4, pp. 582–598.

5. Tremblay O.A. Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles *IEEE Power and Energy Society General Meeting,* 2007, pp. 284–289.

6. Bryantsev A.A., Bukreev V.G. Algorithm for determining the parameters of the dynamic model of a lithium-ion battery. *Current Problems of Aviation and Cosmonautics:* Collection of Scientific Papers. Krasnoyarsk: Publishing House of SibGAU, 2019. vol. 1, pp. 575–578 (in Russ.).

7. Gareeva G.A., Grigorieva D.R. Osnovy programmirovaniya v MATLAB [Fundamentals of programming in MATLAB: teaching aid]. Naberezhnye Chelny, Naberezhnochelninsky Institute of KFU Publ., 2019, 104 p.

8. Omar N., Monem M.A., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Gaulous H., Mulder G., Van den Bossche P., Coosemans T., Van Mierlo J. Lithium iron phosphate-based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy*, vol. 113, 2014, pp. 1575–1585.

9. Bryantsev A.A., Kashkarov K.A., Paigin K.D. Razrabotka i issledovanie modeli ustrojstva pereraspredeleniya energii mezhdu litij-ionnymi akkumulyatorami v akkumulyatornoj bataree kosmicheskogo apparata [Development and study of a model for redistributing energy between lithium-ion batteries in a spacecraft's battery]. Tezisy dokladov Vserossijskogo molodezhnogo konkursa nauchno-tekhnicheskih rabot «Orbita molodezhi». [*Abstracts of the All-Russian Youth Competition of Scientific and Technical Works «Orbit of Youth»*], M.: MSTU named after N.E. Bauman, 2023, p. 93.

10. Baker K., Guo J., Hug G., Li X. Distributed MPC for efficient coordination of storage and renewable energy sources across control areas. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2016, vol. 7, pp. 992–1001.

11. Bundy K., Karlsson M., Lindbergh G., Lindqvist A. An electro chemical impedance spectroscopy method for prediction of the State of Charge of a nickel-metal hydride battery at open circuit and during discharge *Journal of Power Sources*, 1998, vol. 72, no. 2, pp. 118–125.

Kirill A Kashkarov
Postgraduate student, School of Non-Destructive Testing and Safety, National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-999-495-28-01
Email: kirillkashkarov@icloud.com

Viktor G. Bukreev
Doctor of Science in Engineering, Professor,
School of Energy & Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9861-9765
Phone: +7-913-854-21-96
Email: bukreev@tpu.ru

УДК 007.52

С.З. Май, И.А. Ходашинский

Алгоритм осьминога для моделирования движения группы беспилотных летательных аппаратов при выполнении поисковой миссии на море

Предлагается алгоритм осьминога для моделирования поиска на море движущейся цели с помощью беспилотных летательных аппаратов. Задача поиска представлена как задача оптимизации с ограничениями.
Ключевые слова: поиск на море, беспилотный летательный аппарат, алгоритм осьминога, оптимизация с ограничениями.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-127-135

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) достаточно часто применяются в поисково-спасательных операциях в силу способности автономно обследовать обширные территории, имея при этом гораздо более низкие эксплуатационные затраты по сравнению с традиционными транспортными средствами. Фундаментальной задачей автономного управления любым транспортным средством является планирование его движений.

За последние несколько десятилетий резко вырос интерес к групповому использованию БПЛА, работающих вместе для достижения определенной цели. Совместное применение имеет ряд преимуществ [1]:

1) сокращение времени выполнения миссии – взаимодействующие между собой БПЛА могут быстрее выполнить поставленные задачи;

2) увеличение зоны покрытия – несколько БПЛА могут работать в разных местах одновременно;

3) обеспечение взаимодополняемости – каждый участник группы может иметь ограниченный набор датчиков;

4) повышение устойчивости к отказам – миссия может продолжаться, даже если один или несколько БПЛА выйдут из строя.

Человек-оператор не всегда в состоянии обрабатывать собранную и переданную группой БПЛА информацию, необходимую для эффективной координации их движения, поэтому требуется адаптивная стратегия планирования движений и предотвращения столкновений, реализуемая бортовым компьютером БПЛА [2].

Выполнение поисковых операций на море имеет свою специфику, в частности, здесь отсутствуют пространственные ограничения типа «высотные здания» или «горы», цель поиска может постоянно менять свои координаты, что связано с морскими течениями, волнами и другими природными явлениями и/или человеческим фактором. Кроме того, поисковую операцию могут осложнять неполная информация об окружающей среде, наличие зон атмосферной турбулентности и повышенной опасности. Для моделирования поисковых операций на море предлагается использовать концепцию роевого интеллекта, воплощением которой является алгоритм осьминога.

Цель работы – описание основанной на алгоритме осьминога децентрализованной стратегии планирования движения группы беспилотных летательных аппаратов при выполнении поисковой миссии на море.

Близкие работы

Планирование движения БПЛА подразумевает поиск пути, который позволяет обходить зоны риска и удовлетворяет различным ограничениям. Задача планирования оптимального пути от точки старта до цели с учётом множества ограничений относится к классу NP-трудных проблем, эта задача не может быть эффективно решена с помощью традиционных методов математического программирования; для её решения хорошо подходят метаэвристические алгоритмы [3]. Метаэвристические алгоритмы успешно применяются для планирования (суб)оптимальной траектории БПЛА из-за их быстрой сходимости и способности оценивать оптимальные траектории как в статических, так и в динамических условиях окружающей среды [4].

Алгоритм роящихся частиц (АРЧ) [5] наиболее часто используется для планирования оптимального пути БПЛА. Популярность АРЧ объясняется его простотой, небольшой вычислительной сложностью, приемлемым балансом между интенсификацией и диверсификацией, а также достаточно высокой скоростью сходимости. АРЧ может быть распараллелен для работы не только на компьютерных кластерах или нескольких процессорах, но и на графических процессорах.

В [6] моделирование движения БПЛА на малой высоте выполнено с помощью усовершенствованного АРЧ; для динамического обновления положения частиц добавлена стратегия обучения на основе противодействия, в которой используется линейно уменьшающийся порог для контроля диапазона поиска. Для решения задачи планирования маршрута в сложных условиях с многочисленными угрозами в [7] представлен АРЧ с адаптивной настройкой параметров; взвешенная целевая функция состоит из четырех составляющих: длины маршрута, высоты

полета, угроз и физических ограничений БПЛА. Авторы [8] изменили традиционный АРЧ следующим образом: инициализация частиц выполнена на основе логистической хаотической карты, параметры алгоритма линейно изменяются в процессе работы, «плохие» частицы заменяются на мутированные «хорошие»; выполнено 3D-моделирование методом Монте–Карло для формирования траектории полёта группы БПЛА с учётом рельефа местности и угроз.

В [9] задача поиска движущейся цели с помощью БПЛА формулируется путём моделирования цели, датчика и карты вероятностей. Для моделирования местоположения цели используется нормальное или равномерное распределение. Целевая функция для задачи поиска сформулирована на основе теоремы Байеса. АРЧ используется для определения оптимального решения из всех возможных путей.

Авторы [10] предложили три различных алгоритма планирования пути на основе распределенного АРЧ для группы БПЛА, выполняющих разведывательную миссию, в которой цели собираются в виде кластеров и учитываются различные тактические потребности; целевые функции и стратегии поиска разработаны с учетом ограничений мобильности и связи роев БПЛА.

Метаэвристический алгоритм поведения голубей используется несколькими коллективами авторов при решении задачи планирования движения БПЛА [11, 12], причем в [12] управление групповым строем БПЛА представлено как многокритериальная оптимизационная задача, решаемая каждым БПЛА индивидуально.

В [13] планирование маршрутов нескольких БПЛА моделируется как двухкритериальная задача оптимизации с пятью ограничениями; для её решения разработан многоцелевой эволюционный алгоритм с встроенным методом обработки ограничений. Метаэвристический алгоритм поведения подёнок авторы [14] применяют для планирования движения БПЛА в области с препятствиями, используя взвешенную целевую функцию, учитывающую длину пути и плавность поворотов.

В [15] рассмотрена задача планирования траектории БПЛА в горной местности с использованием алгоритма дифференциальной эволюции; для имитации окружающей среды полёта БПЛА используется спутниковая карта местности. Используя алгоритм оптимизации серого волка, авторы [16] разработали модель движения нескольких БПЛА, учитывающую рельеф местности, а также угрозы от наземных радаров и ракет.

Эффективность метаэвристических методов может быть повышена за счет объединения нескольких алгоритмов для оценки эффективной траектории полета. В [4] предложен гибридный метод моделирования движения БПЛА как в 2D-, так и в 3D-средах, сочетающий в себе АРЧ и метаэвристический алгоритм койотов. Авторы [3] для планирования пути использовали гибридный подход на основе мераэвристического алгоритма серого волка и алгоритма дифференциальной эволюции. В [17] алгоритм серого волка в паре с алгоритмом симбиотических организмов были применены для решения задачи планирования траектории БПЛА; сглаживание сгенерированного маршрута было выполнено с помощью сплайнов.

Подходы к управлению БПЛА авторы [18] делят на следующие категории: 1) централизованные, 2) децентрализованные и 3) распределённые. В централизованных подходах алгоритм управления полностью находится в одном центральном узле, будь то беспилотный летательный аппарат или наземная станция, которая отвечает за большую часть обработки данных и принятия решений. В децентрализованных подходах нет центрального узла, и каждый узел принимает решения, используя исключительно свою локальную информацию. В распределённых подходах также нет центрального узла, однако узлы обмениваются локальной информацией с соседними узлами. В [18] предложено распределённое решение на основе алгоритма роящихся частиц для формирования траекторий движения БПЛА в поисково-спасательной миссии.

В [19] выделены следующие ключевые проблемы принятия адаптивных решений группой БПЛА: 1) создание модели принятия решений на основе марковского процесса; 2) способность модели адаптироваться к изменениям окружающей среды; 3) работа в режиме реального времени. Для решения указанных проблем разработан алгоритм глубокого обучения с подкреплением, который, используя входные данные об окружающей среде в реальном времени, полученные от БПЛА, обучает сеть в автономном режиме, а затем применяет эту сеть для принятия решений в режиме реального времени.

Авторы [20] применили метод нечеткой логики к проблеме планирования траектории БПЛА. В исследовании был предложен многоцелевой нечеткий метод оптимизации, в котором в целевую функцию вошли затраты на топливо и радиолокационная угроза.

Методы нечеткой логики редко используются как единственный способ планирования траектории БПЛА из-за сложности настройки функций принадлежности. Однако этот метод можно комбинировать с другими методами, например с алгоритмами муравьиной [21] или пчелиной колонии [22].

Согласно теореме о бесплатных завтраках, не существует единственного алгоритма, который мог бы эффективно решать все задачи оптимизации [23]. Эффективность решения любой конкретной задачи зависит от самой задачи (исходных данных) и используемого алгоритма. Таким образом, для повышения качества планирования траектории БПЛА существует огромный потенциал как в виде разработки новых алгоритмов, так и путем улучшения существующих метаэвристических методов [24].

Алгоритм осьминога

Алгоритм осьминога (Giant Pacific Octopus Optimizer – GPOO) [25] – метаэвристический алго-

ритм, вдохновленный охотничьим поведением гигантского тихоокеанского осьминога. В алгоритм включены этапы интенсификации и диверсификации, что обеспечивает быструю сходимость, выход из локальных экстремумов.

На этапе инициализации случайным образом в пространстве поиска создаются начальные решения (особи осьминога):

$$\mathbf{X}(i) = \mathbf{LB} + (\mathbf{UB} - \mathbf{LB}) \cdot \text{rand}, \quad (1)$$

где $\mathbf{X}(i)$ – положение i-й особи в популяции; rand – случайное значение в диапазоне [0, 1]; **LB**, **UB** – координаты нижней и верхней границ пространства поиска соответственно.

На этапе диверсификации особи свободно перемещаются в поиске потенциально перспективных областей. Положение особи в момент $(t + 1)$ определяется следующим выражением:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{LB} + (\mathbf{UB} - \mathbf{LB}) \cdot \text{nextRand}, \quad (2)$$

где nextRand – случайное значение в диапазоне [0, 1].

На этапе интенсификации после обнаружения потенциальной области особи начинают её исследование, приближаясь к цели. Процесс корректировки положения основывается на расстоянии до цели и определяется следующим выражением:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{M}_d - \mathbf{a} \cdot \mathbf{D}_m, \quad (3)$$

где $\mathbf{M}_d$ – вектор направления движения к цели; $\mathbf{D}_m$ – вектор случайного смещения, вычисляемый по формуле (6); **a** – вектор параметров сходимости, вычисляемый следующим образом:

$$\mathbf{a} = 2a \cdot \mathbf{R}_1 - a, \quad (4)$$

здесь a – параметр сходимости, который в нашем исследовании равен 1; $\mathbf{R}_1$ – вектор смещения на конце щупальца

$$\mathbf{R}_1 = \text{MaxWidth} \times \text{nextRand} \cdot \hat{\mathbf{u}}, \quad (5)$$

здесь $\hat{\mathbf{u}}$ – единичный вектор, задающий направление вектора $\mathbf{R}_1$; MaxWidth – предельное значение смещения щупальца.

$$\mathbf{D}_m = \left| \mathbf{c} \cdot \mathbf{M}_d - \mathbf{M}_d - \mathbf{a} \right|, \quad (6)$$

где **c** – диаметр смещения, вычисляемый следующим образом:

$$\mathbf{c} = 2 \cdot \mathbf{R}_2, \quad (7)$$

здесь $\mathbf{R}_2$ – вектор, определяемый выражением

$$\mathbf{R}_2 = \text{nextRand} \cdot \hat{\mathbf{u}}. \quad (8)$$

Направление движения $\mathbf{M}_d$ – это вектор, указывающий путь, по которому осьминог будет продвигаться к добыче, основываясь на восприятии области с наибольшей вероятностью нахождения добычи. Это направление определяется ближайшими точками в пространстве поиска, которые фиксируются концами щупалец. Данный процесс иллюстрируется на рис. 1.

Предположим, что добыча находится в точке T, а осьминог – в точке A_0, он будет использовать 8 щупалец ($\max F_0 = 8$) для случайной проверки точек: A_1, …, A_8. В точке A_3 вероятность нахождения цели оказывается наибольшей. Таким образом, $\mathbf{M}_d = \mathbf{A}_0\mathbf{A}_3$.

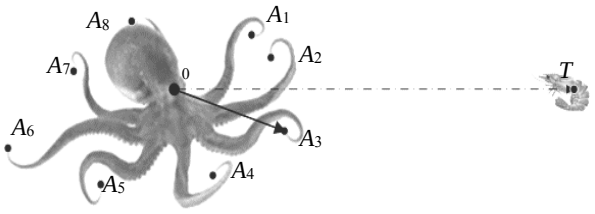


Рис. 1. Метод определения вектора $\mathbf{M}_d$ и приближения к добыче [25]

Сценарий

Миссия БПЛА, рассматриваемая в этой статье, состоит в том, чтобы обнаружить цель и максимально безопасно пролететь через зону повышенной опасности. В среде полёта существуют различные угрозы и опасные области. Задача поиска цели может быть упрощена до задачи планирования движения БПЛА, представленного точкой в двумерном пространстве. Облёт зон угроз осуществляется путём их обнаружения в реальном времени. Другими словами, алгоритм не имеет предварительной информации об окружающей среде. Цель планирования движения БПЛА – найти безопасный путь к движущейся цели с учетом существующих ограничений.

Ниже изложен сценарий морской поисковой миссии с помощью БПЛА.

1. Цель посылает сигнал достаточной интенсивности, чтобы БПЛА мог обнаружить его и сориентироваться.

2. Опасные зоны моделируются как круговые области излучения недружественного радара.

3. БПЛА оснащен датчиком сигнала и системой управления, чтобы корректировать траекторию полета в зависимости от полученных сигналов.

Математическая формулировка

В данной статье алгоритм GPOO был модифицирован и применен для моделирования поиска цели в морской акватории, содержащей препятствия в виде недружественных радаров. Ниже приведены некоторые особенности применения алгоритма.

Выражение (1) используется для случайной инициализации начальной позиции особи. Однако при применении к БПЛА эта начальная позиция обычно устанавливается в конкретной точке поискового пространства.

Выражения (2) и (3) определяют следующую позицию особи без учета предыдущей позиции. Однако при применении к БПЛА необходимо учитывать как предыдущую позицию, так и скорость БПЛА. Это объясняется тем, что БПЛА перемещается от текущей позиции к следующей в соответствии с определенной скоростью за определенный промежуток времени, не имея возможности мгновенно изменить свое положение, как это теоретически предполагается в алгоритме.

Таким образом, выражение (2) должно быть записано в виде

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}(t) + v_{\text{UAV}} \times \frac{\mathbf{LB} + (\mathbf{UB} - \mathbf{LB}) \times \text{nextRand}}{\left| \mathbf{LB} + (\mathbf{UB} - \mathbf{LB}) \times \text{nextRand} \right|}, \quad (9)$$

где $\mathbf{X}(t)$, $\mathbf{X}(t+1)$ – текущая и следующая позиции БПЛА соответственно; v_{UAV} – величина скорости БПЛА.

Аналогично выражение (3) должно быть записано в виде

$$\mathbf{X}(t+1)=\mathbf{X}(t)+v_{\text{UAV}}\times\frac{\mathbf{M}_d-\mathbf{a}\times\mathbf{D}_m}{|\mathbf{M}_d-\mathbf{a}\times\mathbf{D}_m|}, \qquad (10)$$

Этот алгоритм будет эффективно применяться в задаче поиска цели группой БПЛА, особенно когда БПЛА находятся на этапе интенсификации в потенциальной зоне, где присутствует сигнал цели. В этом контексте цель рассматривается как «добыча», а БПЛА выполняют роль особей в популяции алгоритма GPOO, где каждый БПЛА считается «осьминогом», который ищет позицию цели и исследует свое окружение.

Отсутствие на море пространственных ограничений типа «высотные здания» или «горы» позволяет предположить, что в случае поисковой миссии цель может обозначить себя как в диапазоне радиоволн, так и в оптическом диапазоне. Предположим, что цель подает сигналы. Распространение этого сигнала в пространстве может быть описано функцией Лоренца (рис. 2). Амплитуда сигнала в точке с координатами (x, y) определяется следующим образом:

$$S(x,y)=\frac{\gamma^2}{(x-x_T)^2+(y-y_T)^2+\gamma^2}, \qquad (11)$$

здесь γ – параметр, характеризующий интенсивность сигнала; (x_T, y_T) – координаты цели.

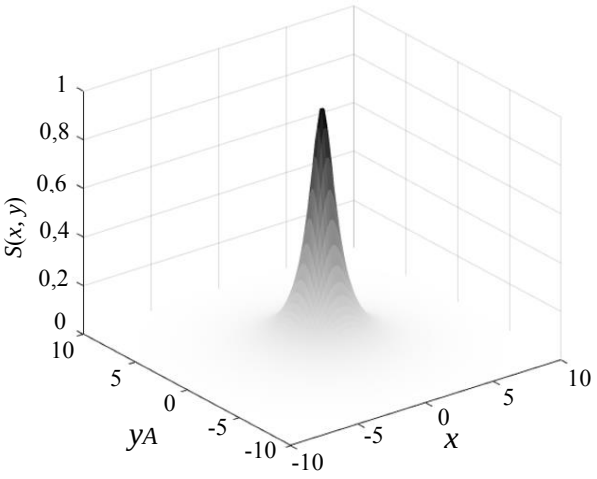


Рис. 2**.** График, отображающий интенсивность сигнала в пространстве**,** здесь $\gamma=1$

Для каждого БПЛА в зоне поиска fitness-функция определяется как

$$\text{fitness}_i=S(x_i,y_i). \qquad (12)$$

Каждый БПЛА обновляет своё лучшее положение X_i^{best} и лучшее положение группы X^{best} на основе значения fitness-функции: чем больше значение функции, тем лучше.

В задаче поиска БПЛА ищет координаты (x_T, y_T) цели, т.е. определяет набор решений (x_i, y_i), при котором значение целевой функции является максимальным (задача максимизации).

Вместо 8 щупалец, как у осьминога, у БПЛА есть датчик, который может поворачиваться на 360° для приема сигналов от цели. Таким образом, направление, в котором сигнал цели будет наибольшим, соответствует направлению $\mathbf{M}_d$. При применении алгоритма для БПЛА можно увеличить количество точек для поиска сигнала и разместить их на дугах окружности вокруг текущего положения.

Размещение большего количества точек на дугах окружности приведет к более эффективному движению в сторону цели, и этот результат представлен на рис. 3.

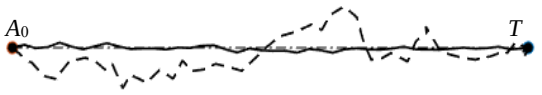


Рис. 3. Траектории движения с использованием разного количества точек: —— – количество точек, равное 72; - - - - – количество точек, равное 8; A_0 – начальное положение БПЛА; T – местоположение цели

На позиции A_0 БПЛА анализирует набор точек вокруг себя: $A=\{A_j\}$, $j=1, 2, \ldots, \max F_0$. Точки распределены равномерно на окружности с заданным радиусом, чтобы охватить соседнее пространство поиска вокруг БПЛА. Для каждой j-й точки определяется значение сигнала по формуле

$$\text{fitness}_j\left(A_j\right)=S\left(x_j,y_j\right). \qquad (13)$$

Затем сравниваются значения сигналов, чтобы найти оптимальную точку A_{best}, которая соответствует точке с наибольшим значением сигнала $\text{fitness}_{\max}$. Эта точка определяет направление, в котором вероятность нахождения цели максимальна. Формула для определения оптимальной точки A_{best} задается как

$$A_{\text{best}}=\arg\max_{j\in\{1,2,\ldots,\max F_0\}}\left(\text{fitness}_j\left(A_j\right)\right). \qquad (14)$$

Вектор $\mathbf{M}_d$ в этом случае определяется следующим образом:

$$\mathbf{M}_d=\mathbf{A}_d A_{\text{best}}. \qquad (15)$$

Здесь количество проверяемых точек $\max F_0$ рассматривается как разрешение сенсора. Если $\max F_0$ мало, БПЛА может пропустить области с сильным сигналом. Напротив, если $\max F_0$ слишком велико, время вычислений значительно увеличится. В реальных приложениях количество точек $\max F_0$ должно быть оптимизировано в зависимости от вычислительных возможностей бортового компьютера БПЛА и требуемой точности.

При планировании траектории полета БПЛА необходимо ввести дополнительные ограничения, чтобы обеспечить безопасный облёт препятствий и одновременное приближение к цели. В данном исследовании область излучения радара рассматривается как характерное ограничение.

В [8, 26, 27] для описания угрозы от радара использована следующая функция:

$$f_R = \sum_{k=1}^{N_r} B_k \text{ с } B_k = \begin{cases} (\delta / D_k)^4, \text{ если } D_k \le R_k; \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (16)$$

$$D_k = \sqrt{\left(x - x_k\right)^2 + \left(y - y_k\right)^2}, \quad (17)$$

где N_r – количество радаров; f_R – общая угроза от радаров; D_k – расстояние от БПЛА до центра k-го радара; δ – коэффициент излучения радара; R_k – радиус излучения k-го радара; (x_k, y_k) – координаты центра k-го радара; (x, y) – координаты БПЛА.

Для облета зон угроз в виде излучений радаров вводятся ограничения $D_k > R_k$, а стоимость угрозы, определённой в выражении (16), будет введена как штрафная функция при определении fitness-функции:

$$\text{fitness}_i = S_i - \alpha f_R^i, \quad (18)$$

где α – штрафной коэффициент.

Иллюстрация процесса исключения недопустимых точек в зоне радиолокационного излучения и пересчета представлена на рис. 4, здесь допустимая точка – это точка, удовлетворяющая условию ограничения $D_k > R_k$.

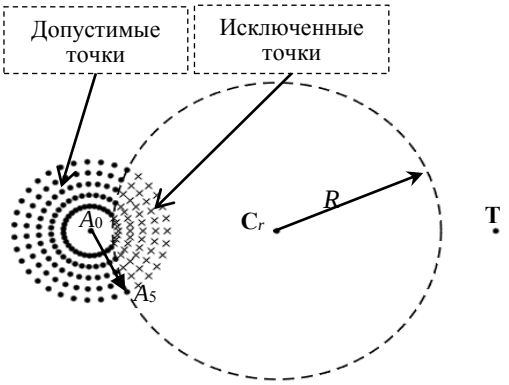


Рис. 4. Иллюстрация области излучения радара, допустимых и недопустимых точек

Для того чтобы БПЛА обходил эти препятствия, при определении $\mathbf{M}_d$ необходимо исключить недопустимые точки из множества **A**. После исключения недопустимых точек направление движения $\mathbf{M}_d$ определяется заново на основе оставшихся точек, и **A** заменяется на $\mathbf{A}^*$ – множество допустимых точек.

Возможна ситуация, когда БПЛА оказывается в углу, ограниченном двумя или несколькими зонами излучения радара, при этом цель находится в противоположной стороне. Для решения этой проблемы предложен метод искусственного потенциального поля [28], который в алгоритме GPOO используется для определения направления движения $\mathbf{M}_d$, определяемого через два промежуточных шага вычисления $\mathbf{M}_{d1}$ и $\mathbf{M}_{d2}$, как показано на рис. 5.

Вектор $\mathbf{M}_{d1}$ рассчитывается по формуле

$$\mathbf{M}_{d1} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2. \quad (19)$$

Для определения вектора $\mathbf{M}_{d2}$ используется выражение

$$\mathbf{M}_{d2} = \left(\begin{bmatrix} 0 & -r \\ r & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}'_{d1} \right)'. \quad (20)$$

Определение ситуации попадания БПЛА в угловую зону излучения радаров выполняется с помощью логической переменной

$$\text{status}_{\text{UAV}} = \begin{cases} \text{true} & \text{Если БПЛА застрянет,} \\ \text{false} & \text{Если БПЛА не застрянет.} \end{cases}$$

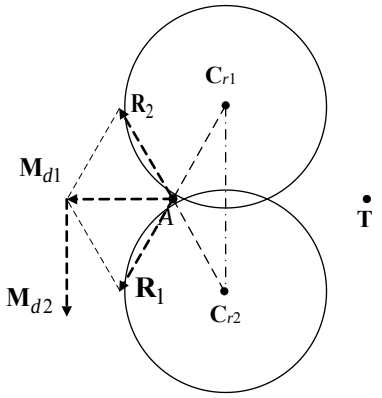


Рис. 5. Два шага определения вектора $\mathbf{M}_d$

Если траектория движения ограничена узкой областью излучений радаров и значение fitness-функции незначительно изменяется в течение определенного времени и цель не обнаружена, это рассматривается как признак того, что БПЛА застрял.

Блок-схема алгоритма GPOO, применяемого для поиска цели группой БПЛА, приведена на рис. 6.

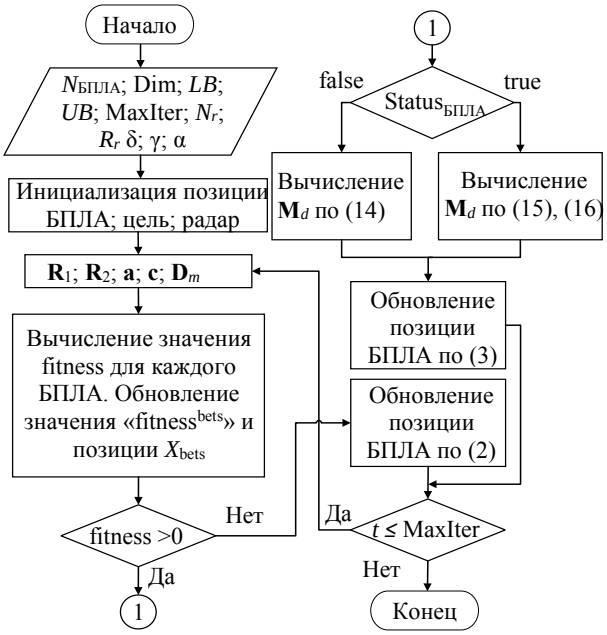


Рис. 6. Блок-схема алгоритма GPOO для БПЛА

Результаты и обсуждение

Алгоритм GPOO был реализован в среде MatLab с параметрами моделирования, приведёнными в таблице.

Процесс поиска и обхода препятствий группой БПЛА был оценен в различных ситуациях.

Как показано на рис. 7, изначально пять БПЛА инициализируются в точках A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, четыре радара размещены в точках C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4} с зонами излучения, ограниченными кругами радиусом $R_r = 100$.

Результаты моделирования показали, что БПЛА успешно преодолели зоны радиационного излучения, созданные радарами, и достигли цели.

Параметры моделирования

Параметры	Значение	Значение
N_{UAV}	5	Количество БПЛА
MaxIter	100	Количество итераций
Dim	2	Размерность поискового пространства
LB	–500	Нижняя граница пространства поиска
UB	500	Верхняя граница пространства поиска
maxF_0	360	Количество контрольных точек
α	1	Штрафной коэффициент
N_r	4	Количество радаров
R_r	100	Радиус области излучения
δ	1	Коэффициент излучения радара
γ	1	Параметр, характеризующий ширину сигнала
v_{UAV}	16	Скорость БПЛА
v_T	4	Скорость цели

Кроме того, БПЛА сохраняли устойчивую траекторию, следуя за целью даже при её случайном движении. Конкретные результаты следующие.

Случай без препятствий: БПЛА, стартовавший с начальной позиции A_5, двигался в направлении цели. БПЛА достиг цели за 22 итерации (рис. 8, *а*).

Случай с зонами радиационного излучения радара: группа БПЛА применяла стратегию обхода препятствий, корректируя вектор направления движения $\mathbf{M}_d$ для безопасного обхода зон излучения, сохраняя ориентацию на цель. Результаты моделирования показали, цель группой БПЛА найдена.

Рисунок 7 иллюстрирует траектории движения БПЛА, где видно, что БПЛА обходят препятствия и достигают цели.

Рисунок 8 показывает, что алгоритм GPOO обеспечивает следование БПЛА за целью на протяжении всего процесса поиска.

В разделе, посвящённом описанию алгоритма, мы упоминали наилучшее положение группы БПЛА X^{best}, соответствующее значению целевой функции fitness_{max}. Результаты моделирования, представленные на рис. 8, свидетельствуют о том, что позиция X^{best} соответствует положению цели.

На рис. 8, *а* приведен график функции fitness_{max}, значение которой приближается к 1. Следует отметить, что значение целевой функции достигает максимума, равного 1, когда координаты X^{best} приближаются к координатам цели (x_T, y_T).

На рис. 8, *б* показано, что координаты X^{best} следуют за координатами цели (x_T, y_T). В этот момент расстояние от X^{best} до цели стремится к нулю, что показано на графике под рис. 8, *а*. Например, на момент времени 52 (по таймеру) расстояние от X^{best} до цели составляет $0,0342971$, в то время как интенсивность принятого сигнала достигает значения $0,999953$. На момент времени 54 расстояние уменьшается до $0,0173101$, а интенсивность сигнала увеличивается до $0,999988$.

Результаты подтверждают эффективность алгоритма GPOO в проектировании траектории БПЛА с учётом ограничений, обеспечивая обход препятствий и достижение подвижной цели.

Заключение

Решение задачи планирования движения группы БПЛА с обходом препятствий не имеет алгоритма, который может находить точные решения за полиномиальное время [29].

В статье описан и модифицирован алгоритм GPOO, представленный ранее в [25], для решения задачи построения траектории для группы БПЛА в сложных условиях с препятствиями.

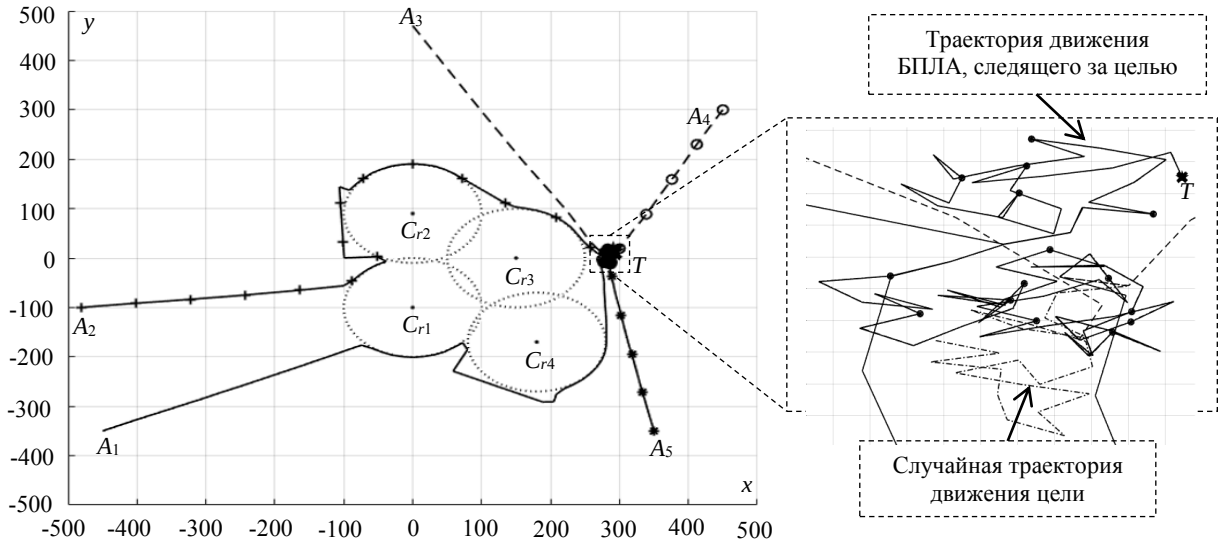


Рис. 7. Процесс обхода препятствий БПЛА и достижения цели: ——; - + - + - +; - - - -; - o - o- o-; - * - *- *- – траектория движения БПЛА; - . - . - . – случайная траектория движения цели; …… – граница зоны излучения радара; A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 – начальное положение БПЛА; C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4} – положение радара; T – положение цели и БПЛА

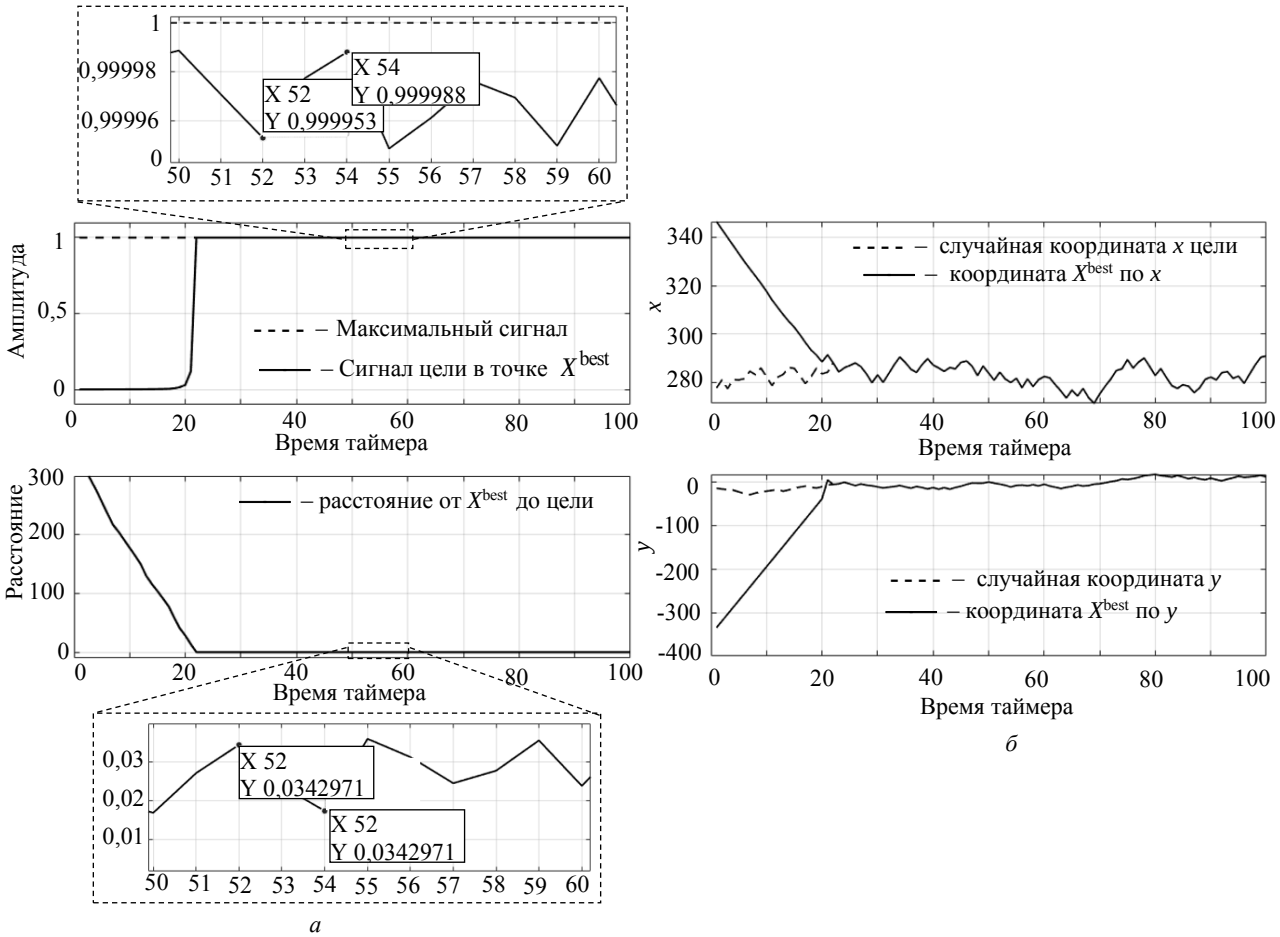


Рис. 8. График, отображающий параметры наилучшего положения X^{best} группы БПЛА относительно цели: *а* – значение функции $fitness^{best}$ (вверху), расстояние X^{best} до цели (внизу), *б* – координаты X^{best} и цели

Результаты моделирования показали эффективность алгоритма в оптимизации направления движения, поддержании сходимости и безопасном обходе препятствий.

Алгоритм имеет большой потенциал для применения в таких областях, как поисково-спасательные операции, мониторинг окружающей среды. В будущих исследованиях предполагается внедрение алгоритма в реальных условиях и интеграция динамических и кинематических ограничений.

Литература

1. McEnroe P. A Survey on the Convergence of Edge Computing and AI for UAVs: Opportunities and Challenges / P. McEnroe, S. Wang, M. Liyanage // IEEE Internet of Things Journal. – 2022. – Vol. 9. – P. 15435–15459.

2. Moving peak drone search problem: An online multi-swarm intelligence approach for UAV search operations / N.A. Kyriakakis, M. Marinaki, N. Matsatsinis, Y. Marinakis // Swarm and Evolutionary Computation. – 2021. – Vol. 66. – P. 100956.

3. A hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and differential evolution for UAV path planning / X. Yu, N. Jiang, X. Wang, M. Li // Expert Systems with Applications. – 2023. – Vol. 215. – P. 19327.

4. Gupta H. A novel hybrid Coyote–Particle Swarm Optimization Algorithm for three-dimensional constrained trajectory planning of Unmanned Aerial Vehicle / H. Gupta, O.P. Verma // Applied Soft Computing. – 2023. – Vol. 147. – P. 110776.

5. Kennedy J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // Proceedings of ICNN'95- International Conference on Neural Networks. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948.

6. A multi-strategy particle swarm algorithm with exponential noise and fitness-distance balance method for low-altitude penetration in secure space / D. Zhu, S. Wang, J. Shen, C. Zhou, T. Li, S. Yan // Journal of Computational Science. – 2023. – Vol. 74. – P. 102149.

7. Adaptive cylinder vector particle swarm optimization with differential evolution for UAV path planning / C. Huang, X. Zhou, X. Ran, J. Wang, H. Chen, W. Deng // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 121. – P. 105942.

8. Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization / S. Shao, Y. Peng, C. He, Y. Du // ISA Transactions. – 2020. – Vol. 97. – P. 415–430.

9. Phung M.D. Motion-encoded particle swarm optimization for moving target search using UAVs / M.D. Phung, Q.P. Ha // Applied Soft Computing. – 2020. – Vol. 97, Part B. – P. 106705.

10. Reconnaissance Mission Conducted by UAV Swarms Based on Distributed PSO Path Planning Algorithms / Y. Wang, P. Bai, X. Liang, W. Wang, J. Zhang, Q. Fu // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 105086–105099.

11. Li S. A modified adaptive formation of UAV swarm by pigeon flock behavior within local visual field / S. Li,

X. Fang // Aerospace Science and Technology. – 2021. – Vol. 114. – 106736.

12. Qiu H. A multi-objective pigeon-inspired optimization approach to UAV distributed flocking among obstacles / H. Qiu, H. Duan // Information Sciences. – 2020. – Vol. 509. – P. 515–529.

13. A novel multi-objective evolutionary algorithm with a two-fold constraint-handling mechanism for multiple UAV path planning / W. Zhang, C. Peng, Y. Yuan, J. Cui, Long Qi // Expert Systems with Applications. – 2024. – Vol. 238, Part D. – P. 121862.

14. Modified Mayfly Algorithm for UAV Path Planning / X. Wang, J.-S. Pan, Q. Yang, L. Kong, V. Snasel, S.-C. Chu // Drones. – 2022. – Vol. 6 (5). – P. 134.

15. A Multi-Strategy Improved Differential Evolution algorithm for UAV 3D trajectory planning in complex mountainous environments / M. Zhang, Y. Han, S. Chen, M. Liu, Z. He, N. Pan // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 125. – P. 106672.

16. Xu C. Optimized multi-UAV cooperative path planning under the complex confrontation environment / C. Xu, M. Xu, C. Yin // Computer Communications. – 2020. – Vol. 162. – P. 196–203.

17. A novel hybrid grey wolf optimizer algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) path planning / C. Qu, W. Gai, J. Zhang, M. Zhong // Knowledge-Based Systems. – 2020. – Vol. 194. – P. 105530.

18. Sanchez-Garcia J. A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario / J. Sanchez-Garcia, D.G. Reina, S.L. Toral // Future Generation Computer Systems. – 2019. – Vol. 90. – P. 129–148.

19. Adaptive decision-making with deep Q-network for heterogeneous unmanned aerial vehicle swarms in dynamic environments / W. Su, M. Gao, X. Gao, X. Zhu, D. Fang // Computers and Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 119. – P. 109621.

20. Wang Y. Study of Multi-objective Fuzzy Optimization for Path Planning / Y. Wang, T. Wei, X. Qu // Chinese Journal of Aeronautics. – 2012. – Vol. 25. – P. 51–56.

21. Ходашинский И.А. Параметрическая идентификация нечетких моделей на основе гибридного алгоритма муравьиной колонии / И.А. Ходашинский, П.А. Дудин // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 24–35.

22. Ходашинский И.А. Оптимизация параметров нечетких систем на основе модифицированного алгоритма пчелиной колонии / И.А. Ходашинский, И.В. Горбунов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 10. – С. 15–20.

23. Wolpert D.H. No Free Lunch Theorems for Optimization / D.H. Wolpert, W.G. Macready // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 1997. – Vol. 1. – P. 67–82.

24. Ходашинский И.А. Методы повышения эффективности роевых алгоритмов оптимизации // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 6. – С. 3–45.

25. Son P.V.H. A novel giant pacific octopus optimizer for real-world engineering problem / P.V.H. Son, L.N.Q. Khoi // Evolutionary Intelligence. – 2024. – Vol. 17. – P. 3571–3592

26. A novel phase angle-encoded fruit fly optimization algorithm with mutation adaptation mechanism applied to UAV path planning / X. Zhang, X. Lu, S. Jia, X. Li // Applied Soft Computing. – 2018. – Vol. 70. – P. 371–388.

27. Path planning for single unmanned aerial vehicle by separately evolving waypoints/ P. Yang, K. Tang, J.A. Lozano, X. Cao // IEEE Transactions on Robotics. – 2015. – Vol. 3, No. 5. – P. 1130–46.

28. A fast formation obstacle avoidance algorithm for clustered UAVs based on artificial potential field / Y. Liu, C. Chen, Y. Wang, T. Zhang, Y. Gong // Aerospace Science and Technology. – 2024. – Vol. 147. – P. 108974.

29. Goerzen C. A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance / C. Goerzen, Z. Kong, B. Mettler // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2010. – Vol. 57. – P. 65–100.

Май Суан Зунг
Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-426-12-23
Эл. почта: maixuandung85@gmail.com

Ходашинский Илья Александрович
Д-р техн. наук, проф. каф. КСУП ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-9355-7638
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: hodashn@gmail.com

Mai X.D., Hodashinsky I.A.

Giant Pacific Octopus Algorithm for Modeling Unmanned Aerial Vehicle Motion in a Maritime Mission

This paper proposes an octopus algorithm for modeling the search for a moving target at sea using unmanned aerial vehicles. The search problem is presented as a constrained optimization problem.

Keywords: maritime search, unmanned aerial vehicle, giant pacific octopus algorithm, constrained optimization.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-127-135

References

1. McEnroe P. Wang S., Liyanage M. A survey on the convergence of edge computing and AI for UAVs: Opportunities and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, vol. 9, pp. 15435–15459.

2. Kyriakakis N.A., Marinaki M., Matsatsinis N., Marinakis Y. Moving peak drone search problem: An online multi-swarm intelligence approach for UAV search operations. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, vol. 66, p. 100956.

3. Yu X., Jiang N., Wang X., Li M. A hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and differential evolution for UAV path planning. *Expert Systems with Applications*, 2023, vol. 215, p. 19327.

4. Gupta H., Verma O.P. A novel hybrid coyote–particle swarm optimization algorithm for three-dimensional constrained trajectory planning of unmanned aerial vehicle. *Applied Soft Computing*, 2023, vol. 147, p. 110776.

5. Kennedy J., Eberhart R. *Particle swarm optimization*. Proceedings of ICNN'95- International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995. Vol. 4, pp. 1942–1948.

6. Zhu D., Wang S., Shen J., Zhou C., Li T., Yan S. A multi-strategy particle swarm algorithm with exponential noise and fitness-distance balance method for low-altitude penetration in secure space. *Journal of Computational Science*, 2023, vol. 74, p. 102149.

7. Huang C., Zhou X., Ran X., Wang J., Chen H., W. Deng Adaptive cylinder vector particle swarm optimization with differential evolution for UAV path planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, vol. 121, p. 105942.

8. Shao S., Peng Y., He C., Du Y. Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization. *ISA Transactions*, 2020, vol. 97, pp. 415–430.

9. Phung M.D., Ha Q.P. Motion-encoded particle swarm optimization for moving target search using UAVs. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 97, part B, p. 106705.

10. Wang Y., Bai P., Liang X., Wang W., Zhang J., Fu Q. Reconnaissance mission conducted by UAV swarms based on distributed PSO path planning algorithms. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 105086–105099.

11. Li S., Fang X. A modified adaptive formation of UAV swarm by pigeon flock behavior within local visual field. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 114, 106736.

12. Qiu H., Qiu H., Duan H. A multi-objective pigeon-inspired optimization approach to UAV distributed flocking among obstacles. *Information Sciences*, 2020, vol. 509, pp. 515–529.

13. Zhang W., Peng C., Yuan Y., Cui J., Qi L. A novel multi-objective evolutionary algorithm with a two-fold constraint-handling mechanism for multiple UAV path planning. *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 238, part D, p. 121862.

14. Wang X., Pan J.-S., Yang Q., Kong L., Snasel V., Chu S.-C. Modified mayfly algorithm for UAV path planning. *Drones*, 2022, vol. 6, no. 5, p. 134.

15. Zhang M., Han Y., Chen S., Liu M., He Z., Pan N. A multi-strategy improved differential evolution algorithm for UAV 3D trajectory planning in complex mountainous environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, vol. 125, p. 106672.

16. Xu C., Xu M., Yin C. Optimized multi-UAV cooperative path planning under the complex confrontation environment. *Computer Communications*. 2020, vol. 162, pp. 196–203.

17. Qu C., Gai W., Zhang J., Zhong M. A novel hybrid grey wolf optimizer algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) path planning. *Knowledge-Based Systems*, 2020, vol. 194, p. 105530.

18. Sanchez-Garcia J., Reina D.G., Toral S.L. A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario. *Future Generation Computer Systems*, 2019, vol. 90, pp. 129–148.

19. Su W., Gao M., Gao X., Zhu X., Fang D. Adaptive decision-making with deep Q-network for heterogeneous unmanned aerial vehicle swarms in dynamic environments, *Computers and Electrical Engineering*, 2024, vol. 119, p. 109621.

20. Wang Y., Wei T., Qu X. Study of multi-objective fuzzy optimization for path planning. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, vol. 25, pp. 51–56.

21. Khodashinsky I.A., Dudin P.A. Parametric fuzzy model identification based on a hybrid ant colony algorithm. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 402–411.

22. Hodashinsky I.A., Gorbunov I.V. [Optimization of fuzzy system parameters based on modified bee colony algorithm]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 10. pp. 15–20 (in Russ.).

23. Wolpert D.H., Macready W.G. No Free Lunch Theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, vol. 1, pp. 67–82.

24. Hodashinsky I.A. Methods for improving the efficiency of swarm optimization algorithms. A survey. *Automation and Remote Control*, 2021, vol. 82, no. 6, pp. 935–967.

25. Son P.V.H., Khoi L.N.Q. A novel giant pacific octopus optimizer for real-world engineering problem. *Evolutionary Intelligence*. 2024, vol. 17, pp. 3571–3592.

26. Zhang X., Lu X., Jia S., Li X. A novel phase angle-encoded fruit fly optimization algorithm with mutation adaptation mechanism applied to UAV path planning. *Applied Soft Computing*, 2018, vol. 70, pp. 371–388.

27. Yang P., Tang K., Lozano J.A., Cao X. Path planning for single unmanned aerial vehicle by separately evolving waypoints. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, vol. 3, no. 5, pp. 1130–46.

28. Liu Y., Chen C., Wang Y., Zhang T., Gong Y. A fast formation obstacle avoidance algorithm for clustered UAVs based on artificial potential field. *Aerospace Science and Technology*, 2024, vol. 147, p. 108974.

29. Goerzen C., Kong Z., Mettler B. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2010, vol. 57, pp. 65–100.

Xuan Dung Mai
Postgraduate student, Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
Lenin pr., 40, Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-426-12-23
Email: maixuandung85@gmail.com

Ilya A. Hodashinsky
Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Computer Control and Design Systems, TUSUR
Lenin pr., 40, Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-9355-7638
Phone: +7 (382-2) 70-15-29
Email: hodashn@gmail.com

УДК 004.852

И.Г. Боровской, А.А. Матолыгин, Е.П. Ильин

Нейросетевой анализ данных ультразвуковой дефектоскопии магистральных газопроводов

На основании данных, полученных при неразрушающем контроле методом ультразвуковой дефектоскопии, рассматривается задача определения участков магистрального газопровода, на которых отмечается корродирование металла, что приводит к уменьшению стенок трубопроводов до критических величин. Предлагается решение задачи с помощью средств машинного обучения, а обработку большого объема данных, полученных в результате контроля с помощью системы ДВУ, осуществлять с использованием сверточных нейронных сетей.
Ключевые слова: нейросетевой анализ данных, сверточные нейронные сети, ультразвуковая дефектоскопия.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-136-140

На текущий период времени остро стоит вопрос энергетической безопасности как страны в целом, так и отдельных регионов [1]. Этим объясняется большое количество всесторонних исследований [2–5] в области транспортировки газа по магистральным газовым трубопроводам (МГ). В статье [6] предложены сверточная модель бинарного классификатора и алгоритм её использования. В настоящей работе предлагается метод модернизации указанной модели.

Данные, используемые для обучения, имеют маркировку [7], выполненную экспертами, что позволяет использовать алгоритмы машинного обучения с учителем [8–10].

Сами данные получены при использовании дефектоскопа внутритрубного ультразвукового (ДВУ), который в данном случае представляет собой прибор цилиндрической формы, имеющий 400 ультразвуковых датчиков (УЗ-датчиков), расположенных в один ряд по его окружности. Он движется внутри МГ дискретно с небольшим шагом. Примером ДВУ может послужить 40-ДФР.00-00.000 [11].

На каждом шаге последовательно опрашиваются все УЗ-датчики (опрос – процесс, при котором УЗ-датчик испускает ультразвуковой сигнал, после чего на протяжении небольшого времени фиксирует время прихода и амплитуды отраженных от внутренней поверхности МГ волн), результат одного опроса всех УЗ-датчиков далее будем называть сканированием, а результат, полученный одним УЗ-датчиком в рамках одного измерения, – замером УЗ-датчика.

Итоговый вид данных представляет собой матрицу с потенциально неограниченным количеством строк (количеством сканирований) и заданным количеством столбцов (количеством УЗ-датчиков), где в каждой ячейке матрицы хранятся замеры УЗ-датчиков.

Результаты маркировки данных представляют собой набор описаний, характеризующих положение и глубину каждого дефекта. Положение задается как прямоугольная область, ограниченная номерами УЗ-датчиков и номерами сканирований.

В среднем замер УЗ-датчика состоит из 31 точки – пар амплитуд и времени. Однако встречаются пустые замеры, а также замеры с меньшим количеством точек. В рамках предобработки данных все замеры приведены к виду массива из 64 элементов (32 точки), где первые 32 элемента – значения времен, вторые 32 – значения амплитуд. В случаях если точек было недостаточно, в начало первой и второй половины массива добавлялись нули.

Данные, полученные ДВУ, предлагается воспринимать как 64-мерное изображение. В рамках выбранного подхода данное изображение разбивается на меньшие изображения квадратной формы строго заданного размера с некоторым шагом с помощью скользящего окна. Одно такое изображение считается одним наблюдением.

В данной работе предлагается модифицированная модель, наследующая идеологию предыдущей, но работающая с наблюдениями размера 16×16×64 (модель из работы [6] как наблюдение использовала изображение размера 64×64×64). Сокращение первых двух размерностей уменьшает зону анализа в 16 раз и позволяет более точно определять область наличия дефектов. Схематично различия моделей показаны на рис. 1. Даны сравнения окон исходных данных для текущей и предыдущей моделей нейросети, которые позволяют уменьшить объем ложноположительных предсказаний. Продемонстрирована развернутая карта предсказаний модели для большого окна.

К достоинствам подхода можно отнести возможность использовать пространственные аугментации данных [12], применимые к обычным изображениям, для увеличения обучающей выборки и борьбы с переобучением.

Недостатком такого подхода является факт того, что модель будет делать предположение о наличии дефекта сразу для целой области, относящейся к конкретному наблюдению, что ограничивает точность определения положения дефектов. В частности, такая модель не способна отделить два скопления дефектов друг от друга в случае, если расстояние между ними меньше, чем размер наблюдения.

В ходе 32 эпох обучена модель с сопоставимым количеством обучаемых параметров. В процессе использовались следующие аугментации [13]: отражение по горизонтали и вертикали; поворот на слу-

чайный угол от 0 до 360°; сдвиг изображения по оси; случайный зум. На рис. 2 представлен график изменения значения функции потерь бинарной кроссэнтропии (eng. Binary Cross Entropy [14]) для тренировочной и валидационной выборок на протяжении всего обучения.

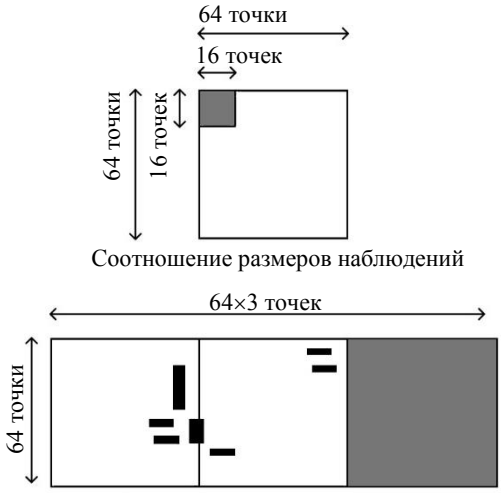


Рис. 1. Схематичное представление различий между моделью с большим и меньшим размером наблюдения

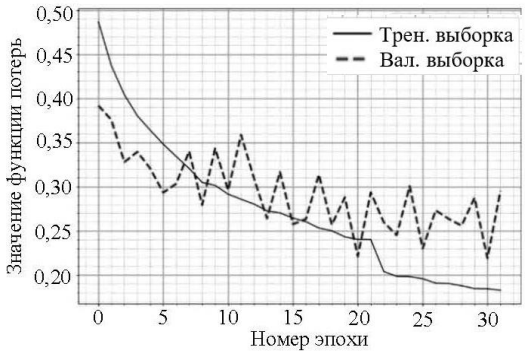


Рис. 2. График значений функции потерь (Binary Cross Entropy) во время обучения

Модель, рассматриваемая в данной работе, является бинарным классификатором с выходным слоем размера 1 с диапазоном значений от 0 до 1. Шкала определена следующим образом: чем ближе число к единице, тем выше уверенность модели в том, что наблюдение относится к классу дефектов.

На фоне несбалансированности данных, где наблюдения, относящиеся к классу «дефект», составляют около 1%, существует ограниченное количество метрик, позволяющих адекватно оценить качество обучения и работы такой модели. Одной из лучших и самых популярных метрик в данном случае является площадь под кривой Precision-Recall [15] (PR-кривой) так как она слабо подвержена влиянию несбалансированности данных.

Данная метрика рассчитывается на основании значений метрик Precision [16] и Recall [17] и используется по причине большого числа случаев реализации пограничных условий. Пример пограничного условия: «если предсказание модели больше или равно 0,5, то данное наблюдение относится к классу 1».

PR-кривая – это график, описывающий зависимость Precision от Recall при разных значениях пограничного условия. В данной работе для расчета площади под ней использовалось 200 значений граничного условия в диапазоне от 0 до 1, итоговое значение площади также находится в диапазоне от 0 до 1, где чем больше площадь, тем лучше считается модель.

График изменения значения метрики площади под PR-кривой для тренировочной и валидационной выборок представлен на рис. 3.

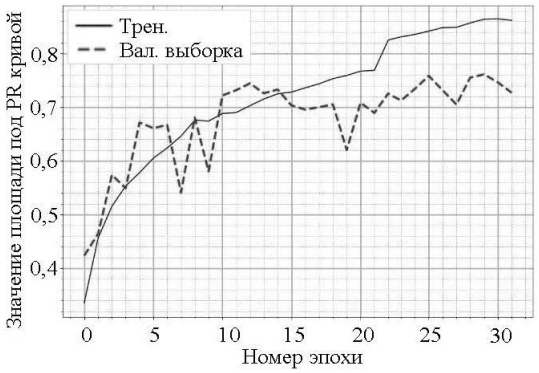


Рис. 3. График значений площади под PR-кривой во время обучения

В рамках обучения и тестирования имеющиеся начальные изображения были разбиты на тренировочную, валидационную и тестовую выборки. В ходе разбиения их на наблюдения использован шаг 1 по обеим осям, что позволило получить 25 500 наблюдений в тренировочной выборке, 9 625 в валидационной и 34 640 в тестовой.

Итоговые значения метрик представлены в таблице.

Итоговые значения метрик

Метрика	Выборка	Значение
Бинарная кроссэнтропия (eng. BinaryCross Enthropy [14])	Тренировочная	0,1845
	Валидационная	0,2875
	Тестовая	0,1448
Площадь под PR-кривой [18]	Тренировочная	0,8637
	Валидационная	0,7610
	Тестовая	0,4416

Для обучения модели использован метод стохастического градиентного спуска (eng. Stochastic Gradient Descent (SGD) [18]).

Функция потерь – упомянутая выше бинарная кроссэнтропия (BinaryCross Entropy [14]).

Общее количество эпох – 32.

Выбрана модель, полученная на момент 29-й эпохи, так как она имеет лучшее значение метрики площади под PR-кривой [15].

В рамках построения предсказания на основании тестовых данных начальное изображение было разбито на наблюдения размера 16×16 по вертикали и горизонтали соответственно скользящим окном без наложений. Для каждого наблюдения модель рассчитала степень уверенности наличия дефекта в зоне МГ, относящейся к этому наблюдению. Далее

все эти предсказания были отображены под размеченной картой дефектов. Результат предсказания моделью для каждого наблюдения представлен на рис. 4. Черные прямоугольники – области наличия дефектов, полученные от экспертов. В белых ячейках степень уверенности наличия дефекта близка к 0, для остальных ячеек степень уверенности указана числовым значением.

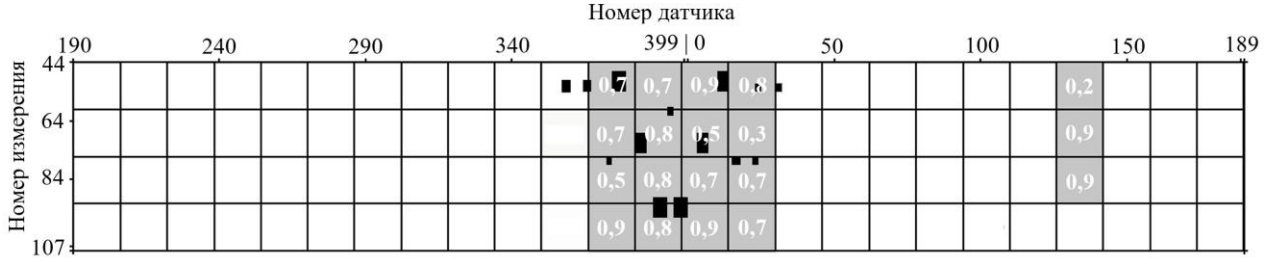


Рис. 4. Развернутая карта предсказаний модели без сдвига и наложений

В результате получена модель бинарного классификатора, имеющая сопоставимое количество обучаемых параметров, что и модель [6], но работающая с наблюдениями меньшего размера, что позволяет с большей точностью, по сравнению с предыдущей моделью, определить координаты и размер зоны наличия дефектов. Увеличение точности прогноза новой модели позволяет увеличить степень уверенности, что модель определила факт наличия дефекта.

Однако стоит отметить, что при выбранном шаге скользящего окна при построении карты предсказаний с учетом того, что данные по горизонтали представляют собой закольцованную последовательность измерений датчиков по окружности трубопровода, возникает возможность построить 16 вариантов таких же карт. Если карта не будет делиться нацело с шагом 16 по вертикали, то в худшем случае возникнет еще 16 вариантов таких карт.

Итого 16×16=256 условно равнозначных предсказаний одной и той же области трубопровода. Например, в рассматриваемом случае по вертикали нельзя нацело поделить исходное изображение скользящим окном без наложений. Поэтому можно построить такое же предсказание, но со сдвинутой начальной точкой разбиения на наблюдения (рис. 5).

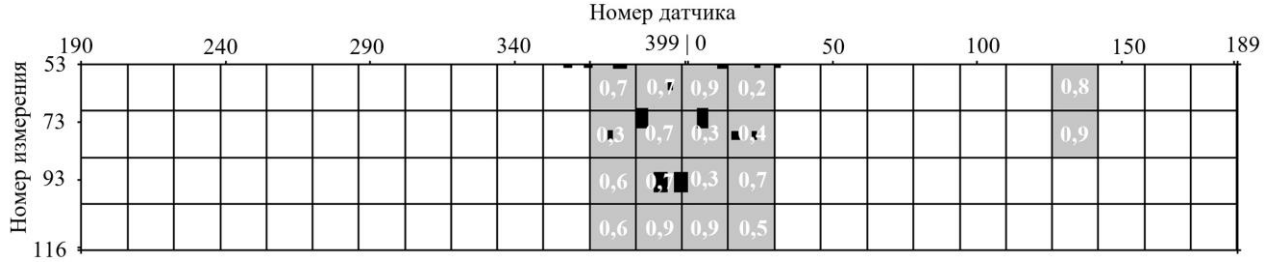


Рис. 5. Развернутая карта предсказаний модели со сдвинутой начальной точкой разбиения на наблюдения

При каждом таком варианте расчета, на вход нейросети попадают разные комбинации одних и тех же данных, что является причиной отличий карт предсказания. При этом приблизительно одни и те же зоны имеют различные значения степени достоверности. Однако во всех вариантах модель позволяет грубо определить общую область дефектов, указанную в центре карты.

На множестве карт можно заметить ложноположительную зону дефектов справа в отдалении от подтвержденного скопления дефектов. Для объяснения этого феномена выдвинуты несколько предположений:

– модель имеет некие недостатки архитектуры или процесса обучения, что приводит к определению ложноположительных зон;

– данные в этой области описывают бездефектную область, но значительно отличаются от остальной части выборки по причине каких-либо помех в процессе считывания и/или записи замеров УЗ-датчиков или по причине наличия там налета некоторого материала на внутренней поверхности МГ;

– данные в этой области описывают некоторый дефект, который либо был сочтен незначительным и не размечен, либо имеет другую природу и не размечен (модель на данный момент позволяет находить только один тип дефекта – потерю металла).

В результате получена модель нейросети и выработан подход к построению предсказаний, обеспечивающий приемлемое качество определения зон дефектов.

Так как модель [6] использовала другие метрики при обучении, в числовом выражении сравнить её с предложенной здесь затруднительно, однако это можно сделать экспертно.

Во-первых, размер одного наблюдения уменьшился в 16 раз, что на уровне концепта позволяет более точно определять размер и положение скопления дефектов по описанным ранее причинам.

Во-вторых, такой размер наблюдения позволяет построить карту предсказания без использования дополнительных алгоритмов агрегации результатов предсказаний, относящихся к накладывающимся друг на друга наблюдениям и тем не менее получать

достаточно точное предсказание координат скоплений дефектов. А кроме того, модель с большим размером наблюдения имела бы кратно больше равнозначных вариантов предсказания карты – 64×64=4096 против 16×16=256. Само по себе это гарантирует лишь несколько большую свободу в использовании модели и несколько менее ресурсозатратный процесс вычисления предсказаний.

В рамках дальнейшей работы можно рассмотреть несколько направлений.

1. Модификация архитектуры модели. Как минимум это может выражаться в еще большем уменьшении размера наблюдения без ухудшения качества работы. Более принципиальное улучшение результатов работы может быть достигнуто несколькими путями или их комбинацией. Во-первых, включением в модель механизма обработки наблюдений как последовательности. Во-вторых, внедрением генеративно-состязательного обучения. В-третьих, сменой решаемой задачи с классификации на сегментацию или детекцию.

2. Более тщательная и глубокая предобработка данных. Это может выражаться в более избирательном процессе отбора наблюдений для обучения за счет их предварительной кластеризации самообучающимися алгоритмами или, например, предварительным выделением главных признаков замеров УЗ-датчиков другой моделью.

3. Разработка новых алгоритмов агрегации результатов накладывающихся предсказаний модели.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 13.05.2019 г. № 216 Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kremlin.ru/acts/bank/44252/page/1, свободный (дата обращения: 28.10.2024).

2. Проблемы анализа технического состояния современных приводов компрессорных установок магистральных газопроводов / П.С. Кунина, Е.И. Величко, М.С. Степанов, А.В. Музыкантова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 3. – С. 56–58. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-3-56-58.

3. Kaputkin D.E. Two types of the crack arrest during full-scale pneumatic testing of main gas pipelines / D.E. Kaputkin, A.B. Arabey // Letters on Materials. – 2021. – Vol. 11, No. 3(43). – P. 239–243. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-239-243.

4. Ляпичев Д.М. Система мониторинга технического состояния как элемент цифрового двойника магистрального газопровода / Д.М. Ляпичев, М.М. Адмакин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2024. – № 1(139). – С. 60–65.

5. Голофаст С.Л. Оценка прочностной надежности магистрального газопровода с учетом фактических закономерностей распределения толщины стенки трубы // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 6. – С. 21–28. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-6-21-28.

6. Нейросетевой анализ данных ультразвуковой дефектоскопии магистральных газопроводов с использованием программно-аппаратной системы ДВУ / И.Г. Боровской, Е.А. Шельмина, А.А. Матолыгин, Е.П. Ильин // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 64. – С. 50–60.

7. Marcos N. Boosting AI applications: Labeling format for complex datasets / N. Marcos, S. Orti, O. Oihana // SoftwareX. – 2021. – Vol. 13 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711020303666, свободный (дата обращения: 02.11.2024).

8. Data Science and Machine Learning: Mathematical and Statistical Methods / D.P. Kroese, Z.I. Botev, T. Taimre, R.Vaisman. – Chapman & Hall/CRC machine learning & pattern recognition. – CRC Press, Boca Raton, 2019. – 532 p.

9. Murphy K.P. Probabilistic machine learning: an introduction. – MIT-press, 2022. – 864 p.

10. Шай Ш.-Ш. Идеи машинного обучения: от теории к алгоритмам / Ш.-Ш Шай, Б.-Д. Шай / пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК-Пресс, 2019. – 436 с.

11. Дефектоскоп внутритрубный ультразвуковой 40-ДФР.00-00.000. Номер в госреестре 84766-22 // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. – 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1397751, свободный (дата обращения: 02.11.2024).

12. Методы аугментации обучающих выборок в задачах классификации изображений / С.О. Емельянов, А.А. Иванова, Е.А. Швец, Д.П. Николаев // Сенсорные системы. – 2018. – Т. 32, № 3. – С. 236–245.

13. Preprocessing layers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://keras.io/api/layers/preprocessing_layers/image_augmentation/, свободный (дата обращения: 02.11.2024).

14. Binary Cross Entropy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tensorflow.org /api_docs/python/tf/keras/losses/BinaryCrossentropy, свободный (дата обращения: 02.11.2024).

15. Area Under the Curve [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/metrics/AUC, свободный (дата обращения: 02.11.2024).

16. Precision [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/metrics/Precision, свободный (дата обращения: 02.11.2024).

17. Recall [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/metrics/Recall, свободный (дата обращения: 02.11.2024).

18. Stochastic Gradient Descent [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tensorflow.org/api_ docs/python/tf/keras/optimizers/SGD, свободный (дата обращения: 02.11.2024).

Боровской Игорь Георгиевич
Д-р ф.-м.н., проф. каф. экономической математики, информатики и статистики (ЭМИС)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-2707-7203
Тел.: +7 (382-2) 90-01-85
Эл. почта: igor.g.borovskoi@tusur.ru

Матолыгин Андрей Анатольевич
Ст. преп. каф. ЭМИС ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-5737-1329
Тел.: +7 (382-2) 90-01-87
Эл. почта: andrei.a.matolygin@tusur.ru

Ильин Евгений Петрович
Магистрант каф. ЭМИС ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-999-058-62-77
Эл. почта: eugenecalls@gmail.com

Borovskoi I.G., Matolygin A.A., Ilyin E.P.

Neural network data analysis for ultrasonic non-destructive testing of main gas pipelines

The corrosion process stems pipeline wall thinning to the critical values. Considering this the article aimed to look into a problem of detection a corrosion zone for a main gas pipeline metal wall using an ultrasonic non-destructive testing data. The proposed solution is to use one of the machine learning algorithms – convolutional neural network – to handle data obtained by an in-tube ultrasonic analyzer.

Keywords: neural network analysis, convolutional neural networks, ultrasonic non-destructive testing.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-136-140

References

1. The decree of the President of the Russian Federation of 13.05.2019 г. № 216 about Russian Federation of energy supply security doctrine. Available at: http://www.kremlin.ru/acts/bank/44252/page/1, free (Accessed: October 28, 2024) (in Russ.).

2. Kunina P.S., Velichko E.I., Stepanov M.S., Muzykantova A.V. [The problems that arise when analyzing the technical state of modern drives of compressor installations of main gas]. *Building Oil and Gas Wells on Land and Sea,* 2019, no. 3, pp. 56–58 (in Russ.).

3. Kaputkin, D.E., Arabey A.B. [Two types of the crack arrest during full-scale pneumatic testing of main gas pipelines]. *Letters on Materials*. 2021. Vol. 11, no. 3 (43), pp. 239–243 (in Russ.).

4. Lyapichev D.M, Admakin M.M. [Technical state monitoring system as an element of the digital twin of the main gas pipeline]. *Equipment and Technologies for an Oil Complex,* 2024, no. 1 (139), pp. 60–65 (in Russ.).

5. Golofast S.L. [Assessment of the main gas pipeline strength reliability considering the actual regularities of the distribution of the pipe wall thickness]. *Industrial Labor Safety,* 2020, no. 6. pp. 21–28 (in Russ.).

6. Borovskoy I.G., Shelmina E.A., Matolygin A.A., Ilin E.P. [Neural network analysis of ultrasonic flaw detection data of main gas pipelines using a hardware and software DVU system]. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2023, no. 64. pp. 50–60 (in Russ.).

7. Marcos N., Orti S., Oihana O. [Boosting AI applications: Labeling format for complex datasets]. *SoftwareX,* 2021, vol. 13. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711020303666, free (Accessed: November 02, 2024).

8. Kroese D.P., Botev Z.I., Taimre T., Vaisman R. *Data Science and Machine Learning: Mathematical and Statistical Methods*. Chapman & Hall/CRC machine learning & pattern recognition. CRC Press, Boca Raton, 2019, 532 p.

9. Murphy K.P. *Probabilistic Machine Learning: an Introduction*. MIT press, 2022, 864 p.

10. Shai S.S., Shai S.B. *Idei machinnogo obuchenia: ot teorii k algoritmam.* Understanding machine learning. From Theory to Algorithms. Moscow: DMK Press, 2019, 436 p. (in Russ.).

11. An internal pipeline inspection gauge 40-DFR.00-00.000. The State Register number 84766-22. *Federal information foundation of the uniformity of measurements ensuring*, 2022. Available at: https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1397751, free (Accessed: November 02, 2024) (in Russ.).

12. Emelyanov S.O, Ivanova A.A, Shvets E.A., Nikolaev D.P. [Methods of training data augmentation in the task of image classification]. *Sensor Systems,* 2018, vol. 32, no. 3, pp. 236–245 (in Russ.).

13. Preprocessing layers. Available at: https://keras.io/api/layers/preprocessing_layers/image_augmentation, free (Accessed: November 02, 2024).

14. Binary Cross Entropy. Available at: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/losses/BinaryCrossentropy, free (Accessed: November 02, 2024).

15. Area under the Curve. Available at: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/metrics/AUC, free (Accessed: November 02, 2024).

16. Precision. Available at: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/metrics/Precision (Accessed: November 02, 2024).

17. Recall. Available at: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/metrics/Recall, free (Accessed: November 02, 2024).

18. Stochastic Gradient Descent. Available at: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/optimizers/SGD, free (Accessed: November 02, 2024).

Igor G. Borovskoi
Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Department of Economic Mathematics, Informatics and Statistics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-2707-7203)
Phone: +7 (382-2) 90-01-85
Email: igor.g.borovskoi@tusur.ru

Andrey A. Matolygin
Senior Lecturer, Department of Economic Mathematics, Informatics and Statistics, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-5737-1329)
Phone: +7 (382-2) 90-01-87
Email: andrei.a.matolygin@tusur.ru

Evgeny P. Ilyin
Master student, Department of Economic Mathematics, Informatics and Statistics, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-999-058-62-77
Email: eugenecalls@gmail.com

УДК 004.89

А.С. Романов

Методика семантической кластеризации для выявления признаков экстремизма в текстовой информации

Представлена разработка методики семантической кластеризации текстов для решения задач кибербезопасности. Она может применяться для выявления ложной и вредоносной текстовой информации, запрещенной законодательством РФ, пропаганды экстремизма и терроризма, призывов к розжигу межнациональной, религиозной и другой ненависти и розни. Предложенная методика основана на современной технологии BERTopic с экспериментально подобранными параметрами и алгоритмами. Оценка методики осуществлялась на трех наборах данных. Согласно полученным результатам, в качестве алгоритма кластеризации был выбран HDBSCAN по метрике Евклида, в качестве алгоритма представления текстов – LaBSE, в качестве алгоритма понижения размерности – UMAP по метрике Жаккарда. Такая конфигурация BERTopic позволила добиться средних показателей 0,68 по коэффициенту силуэта, 0,36 по индексу Дэвиса–Болдина и 136,49 по индексу Калински–Харабаза.
Ключевые слова: семантика, кластеризация, информационная безопасность.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-141-149

Процесс кластеризации текстов является одним из наиболее популярных способов разделения текстов на классы на основе их признаков. Результатом такого процесса являются кластеры – группы, содержащие наиболее похожие тексты.

Классификацию от кластеризации отличает объединение новых, ранее не определенных объектов в группы на основе обучающих данных, определяющих их групповую принадлежность. Соответственно, кластеризация в большинстве случаев является методом неконтролируемым. Также при классификации правильное количество групп объектов известно заранее, а при кластеризации – нет.

Следует отметить, что алгоритмы кластеризации разнообразны и могут применяться не только как самостоятельное решение задачи разделения текстов на классы, но также и в качестве вспомогательного инструмента для повышения эффективности классификации, генерации, суммаризации и других задач текстового анализа.

Одной из наиболее актуальных задач, для решения которой могут применяться методики и инструменты на основе алгоритмов кластеризации, в частности, семантической, является тематическое моделирование. Оно может использоваться для выявления ключевых тематик, построения по ним тематических коллекций, ранжирования и т.п.

Критически значимой проблемой, требующей применения тематического моделирования на основе семантической кластеризации, является выявление ложной и вредоносной текстовой информации, запрещенной законодательством РФ, пропаганды экстремизма и терроризма, призывов к розжигу межнациональной, религиозной и другой ненависти и розни.

Целью данного исследования является разработка методики семантической кластеризации текстов для определения эмоциональной окраски текста, токсичных, негативных, а также запрещенных законодательством Российской Федерации сообщений.

Научная новизна исследования состоит в подобранных оптимальных параметрах алгоритмов кластеризации и выделении ключевых слов технологии BERTopic для решения прикладных задач кибербезопасности.

В общем виде методы кластеризации текстов можно разделить на группы по принципу действия.

1. Иерархические методы [1] строят иерархию, где каждый кластер может содержать подкластеры. Примерами таких методов являются агломеративная и дивизивная кластеризации.

2. Методы на основе плотности объектов [2] определяют кластеры по точкам данных в пространстве. Они анализируют расположение объектов в пространстве и определяют плотность вокруг каждого объекта. Объекты, находящиеся в областях более высокой плотности, считаются частью одного кластера, а объекты в областях более низкой плотности – аномалиями. Примерами таких методов являются пространственная кластеризация приложений с шумом на основе плотности (DBSCAN) и иерархический DBSCAN.

3. Методы на основе центроидов [3] определяют кластеры, исходя из расстояния до центроидов. Одним из таких методов является *k*-средних.

4. Методы на основе плотности вероятности [4] моделируют распределение вероятностей данных и ищут области с высокой плотностью вероятностей, отделенные областями с низкой плотностью. Эти методы полезны, когда данные имеют вероятностную интерпретацию или когда требуется учет неопределенности в данных. Примером такого метода является модель гауссовой смеси.

5. Графовые методы [5] представляют данные в виде графа, где объекты являются вершинами, а связи между объектами – ребрами. Кластеры определяются на основе связей в графе. К примерам можно отнести кластеризацию Маркова и спектральную.

6. Методы на основе плотности признаков [6] учитывают не только расстояние между объектами, но и плотность распределения признаков, описывающих эти объекты. Эти методы полезны, когда значения признаков более информативны, чем их пространство, например, в случае временных рядов. Пример такого метода – *k*-ближайших соседей (KNN).

7. Методы на основе моделей [7] используют статистические модели и тонкую настройку их параметров для формирования тематических кластеров. Примеры таких методов: латентное размещение Дирихле (LDA), Top2Vec, неотрицательная матричная факторизация (NMF).

8. Семантические нейросетевые (НС) методы [8] основаны на самоорганизующихся картах, ассоциативных НС или глубоком обучении. Они позволяют автоматически извлекать сложные зависимости и структуры из данных, что полезно для больших и сложных наборов данных. Примерами НС-методов являются алгоритм Кохонена, алгоритм самоорганизующихся карт и BERTopic.

Эффективность описанных методов напрямую зависит от области применения, специфики данных и условий применения этих методов. Отсюда возникает необходимость анализа релевантных современных трудов, посвященных семантической кластеризации текстов. Такой анализ позволяет выявить наиболее перспективные для реализации и тестирования методы, а также определить преимущества и недостатки каждого отдельного метода.

Обзор литературы

Работа [9] посвящена кластеризации текстов с целью переоценки рейтингов товаров, размещенных на маркетплейсах. Авторы предлагают подход на основе векторных представлений (эмбеддингов) текста и алгоритмов кластеризации. В качестве эмбеддингов используются контекстные представления, формируемые трансформерными представлениями двунаправленного энкодера (BERT), и неконтекстные представления, формируемые Word2Vec. В качестве алгоритмов кластеризации предлагаются: *k*-средних, агломеративный, на основе плотности DBSCAN.

Для оценки эффективности методов и влияния на них эмбеддингов используются метод оценки силуэта, мера расстояния между различными разбиениями выборки и мера чистоты кластера. Результаты показывают, что эффективность метода напрямую зависит от выбранного алгоритма кластеризации и его настроек. Лучшие результаты демонстрирует DBSCAN, однако его использование приводит к появлению небольшого числа аномалий. Все метрики вне зависимости от типа векторного представления достигают значения более 0,9.

В статье [10] предлагается модель, которая улучшает метод LDA для анализа коротких текстов. Предложенный метод помогает устранить шум и несущественные различия в распределении тем между авторами сообщений социальной сети. Вместо того, чтобы оценивать каждую тему для конкретного пользователя отдельно, он сжимает распределения до более общих и типичных значений. За счет этого метод позволяет эффективнее определять основные темы, представленные в сообщениях пользователей, и делать более точную кластеризацию. Метод применяется к сообщениям сенаторов США, восстанавливая как значимые темы, так и кластеры, отражающие партийную идеологию. В качестве метрики используется нормированная взаимная информация. Ее значение составляет 0,95.

Авторы работы [11] исследуют проблемы извлечения ключевых слов, автоаннотирования и тематические группировки для английского и персидского языков. Для их решения они предлагают подход на основе TextRank и семантического сходства между частями текста. Точность подхода на наборе данных новостей Британской вещательной корпорации (BBC) составляет 0,64 для персидского языка и 0,81 для английского языка.

Статья [12] посвящена проблеме определения оптимального количества тем при кластеризации. В качестве метода авторами используется NMF. Для анализа стабильности генерируются эталонные наборы ранжирования для каждого возможного количества тем, применяя NMF к полному набору данных с инициализацией декомпозиции неотрицательных двойных сингулярных значений, чтобы обеспечить детерминированное решение.

Для оценки качества подхода используются наборы данных из «The New York Times» за 1999 г. (nytimes-1999) и 2003 г. (nytimes-2003), а также наборы из Википедии (wikipedia-high, wikipedia-low). Показатели точности NMF после применения анализа стабильности составляют 0,94 для nytimes-1999, 0,96 для nytimes-2003, 0,96 для wikipedia-high и 0,93 для wikipedia-low.

В статье [13] представлен подход к кластеризации, основанный на представлении текста в виде тематической карты (визуальное представление классификации документов по их содержанию). На ее основе рассчитывается мера сходства. Предлагаемый метод реализуется с использованием агломеративной иерархической кластеризации. В качестве экспериментальных данных используются стандартные наборы информационного поиска: медицинские рефераты, тексты новостей по 20 тематикам (20NewsGroups) и новостные статьи платформы Reuters. Средняя для наборов данных *F*-мера составляет 0,5, чистота – 0,79 и энтропия – 0,22.

Авторы [14] предлагают технику кластеризации на основе предварительно извлеченных признаков. Она состоит из трех этапов: генерации пар слов из каждого отдельного документа, применения к ним двухстороннего алгоритма частоты слова и обратной частоты документа (TF-IDF) с целью семантической фильтрации и использования *k*-средних для объединения пар слов со схожим семантическим значением. Оценка техники осуществляется на наборах кинорецензий (OMDb), Reuters и 20NewsGroup. Пред-

ложенная авторами техника оценивается в сравнении с LDA и машиной Больцмана. Эксперименты показывают, что авторский подход позволяет повысить точность формируемых кластеров в среднем на 0,13 в сравнении с аналогами.

Работа [15] посвящается технологии BERTopic, основанной на BERT и TF-IDF. BERTopic осуществляет генерацию согласованных тем, извлечение ключевых слов и кластеризацию. Качество оценивается на корпусах 20NewsGroups, BBC и сообщениях Д. Трампа в социальных сетях. Для 20NewsGroups согласованность – 0,16, разнообразие – 0,85; для BBC согласованность – 0,16, разнообразие – 0,79; для сообщений Д. Трампа – согласованность – 0,06, разнообразие – 0,66. BERTopic показывает лучший результат в сравнении с LDA, NMF, Top2Vec.

По результатам анализа можно сделать выводы, что принцип работы алгоритмов семантической кластеризации схож и включает в себя 5 шагов:

1) определение характеристик, по которым будет происходить группировка объектов;

2) определение меры того, насколько характеристики объектов схожи между собой;

3) сегментация по определенному алгоритму – непосредственно процесс группировки объектов;

4) абстрагирование данных;

5) оценка полученных кластеров.

Несмотря на методологическую схожесть алгоритмов кластеризации, их эффективность зависит от конкретной задачи и домена данных. Метод следует выбирать на основе результатов серии сравнительных экспериментов.

Наборы данных

Первый набор экспериментальных данных содержит сообщения экстремистского характера и был сформирован на основе наборов, предоставляемых соревнованиями по машинному обучению Kaggle:

1) «How ISIS Uses Twitter» [16] состоит из сообщений из социальной сети Twitter, опубликованных последователями экстремистского движения в процессе подготовки и осуществления терактов.

2) «Religious Texts Used By ISIS» [17] содержит короткие тексты из пропагандистских журналов «Дабик» (15 выпусков) и «Румия» (9 выпусков), предназначенных для вербовки сторонников террористической организацией.

Так как оба набора данных содержали сообщения исключительно на английском языке, было решено использовать машинный перевод для их трансляции на русский язык. С этой целью использовался API сервиса deep-translator [18], поддерживающий переводчик Google.

Второй набор экспериментальных данных был получен с сайта KavkazChat [19], включающего различные тематические страницы с обсуждением как бытовых вопросов, так и текстов экстремистской направленности. Ряд пользователей ресурса открыто выражали ненависть к России и ее гражданам, обсуждали проведение теракта.

Третий набор экспериментальных данных был сформирован из сообщений, публикуемых новостными каналами и лицами, признанными в РФ иностранными агентами (иноагентами), в мессенджере Telegram.

Обобщенная информация по наборам данных представлена в табл. 1.

Таблица 1

Статистика наборов данных

Корпус	Kaggle	KavkazChat	Иноагенты
Число авторов	100	7125	1921
Число текстов	19685	69998	25028

Постановка эксперимента и результаты

Исходя из проведенного анализа современных трудов, посвященных задаче кластеризации текстов, было выделено несколько наиболее эффективных подходов к решению данной задачи.

1. BERTopic – алгоритм, основанный на модели BERT. Он использует предобученную модель для получения векторных представлений текстовых документов. Затем алгоритм применяет аппроксимацию графовой структуры на основе представлений и алгоритм кластеризации Лувен [20] для выделения кластеров. BERTopic позволяет идентифицировать темы в тексте и группировать схожие документы внутри этих тем.

2. DBSCAN – алгоритм, основанный на плотности точек данных в пространстве. Алгоритм начинает с выбора случайной точки и определяет ее окрестность на основе радиуса и минимального числа соседей. Затем расширяет кластер, добавляя соседние точки, и повторяет этот процесс для каждой добавленной точки. Точки, которые не могут быть добавлены в кластер, считаются выбросами или шумом. DBSCAN позволяет обнаруживать кластеры произвольной формы и эффективно работает с данными, содержащими выбросы.

3. KNN с методом локтя – алгоритм, предназначенный для классификации, кластеризации и регрессии. Метод локтя, применяемый совместно с KNN, позволяет определять оптимальное число кластеров. Алгоритм начинает с выбора значения k (число ближайших соседей), затем вычисляет сумму квадратов расстояний между каждой точкой и ее ближайшими соседями. Затем алгоритм повторяется для разных значений k и строится график, называемый «локтем». Оптимальное число кластеров определяется как точка на графике, где изменение суммы квадратов расстояний замедляется значительно.

4. Агломеративная кластеризация – иерархический алгоритм кластеризации, который начинает процесс с каждого объекта в отдельном кластере и последовательно объединяет ближайшие кластеры до достижения заданного критерия объединения. В случае текста расстояние между кластерами определяется с использованием меры сходства между векторными представлениями текстов. Алгоритм строит дерево кластеров, известное как дендрограмма,

которая позволяет визуализировать иерархию кластеров.

5. LDA – статистическая модель, используемая для тематического моделирования текста. Она предполагает, что каждый документ представлен комбинацией тем, а каждая тема представлена распределением слов. LDA ищет наиболее вероятную комбинацию тем и слов для каждого документа в корпусе текстовых данных. Это позволяет идентифицировать темы и группировать схожие документы внутри этих тем.

6. NMF – метод разложения матрицы на две неотрицательные матрицы, представляющие собой линейные комбинации базисных векторов. В контексте кластеризации текста NMF может быть использован для извлечения тематических признаков из корпуса текстов. Алгоритм ищет базисные векторы, которые максимально хорошо представляют исходные документы. Затем он используется для кластеризации документов на основе этих признаков. NMF позволяет идентифицировать темы и группировать схожие документы внутри этих тем, а также используется для сокращения размерности данных.

Для оценки эффективности указанных методов кластеризации было использовано три метрики, не зависящие от реальных меток.

Коэффициент силуэта (silhouette_score) [21] предназначен для вычисления расстояния между объектом и ближайшим кластером, частью которого объект не является. Лучшее значение метрики равно 1, а худшее значение равно –1. Значения, близкие к 0, являются показателем перекрывающихся кластеров, а отрицательные значения указывают на то, что образец был отнесен к неправильному кластеру.

$$\text{silhouette_score} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \text{silhouette_score}(i)}{n}, \quad (1)$$

$$\text{silhouette_score}(i) = \frac{\max(a_i, b_i)}{b_i - a_i}, \quad (2)$$

где n – число кластеров, a_i – среднее расстояние i до всех остальных точек данных в том же кластере (внутрикластерное расстояние), b_i – среднее расстояние i до всех точек данных в ближайшем кластере (межкластерное расстояние).

Индекс Дэвиса–Болдина (db_score) [22] определяет среднюю меру сходства каждого кластера с наиболее похожим на него кластером. Сходство представляет собой отношение расстояний внутри кластера к расстоянию между кластерами. Лучшее значение метрики равно 0, а худшее равно 1.

$$\text{db_score} = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} R_i, \quad (3)$$

$$R_i = \max(R_{ij}), i = 1 \ldots n_c, \quad (4)$$

$$R_{ij} = \frac{s_i + s_j}{d_{ij}}, \quad (5)$$

где s_i и s_j – разбросы внутри кластеров i и j, которые должны быть как можно меньше, d_{ij} – расстояние между i-м и j-м кластерами, которые должны быть как можно больше.

Индекс Калински–Харабаза (ch_score) [23] определяет, насколько отдельные кластеры различаются между собой и насколько они компактны внутри кластера. Более высокие значения индекса указывают на лучшую кластеризацию.

$$\text{ch_score} = \frac{BGSS}{WGSS} \times \frac{N-K}{K-1}, \quad (6)$$

где N – общее число наблюдений, K – общее число кластеров, $BGSS$ – межгрупповая дисперсия, $WGSS$ – внутригрупповая дисперсия.

$$WGSS = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{n_k} \left\| X_{ik} - C_k \right\|^2, \quad (7)$$

где n_k – количество наблюдений в кластере k; X_{ik} – i-е наблюдение кластера k; C_k – центр тяжести кластера k.

$$BGSS = \sum_{k=1}^{K} n_k \times \left\| C_k - C \right\|^2, \quad (8)$$

где C – центроид набора данных (барицентр).

Результаты приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

Результаты для Kaggle

Метод	silhouette_score	db_score	ch_score
BERTopic	**0,728**	**0,59**	48,122
DBSCAN	0,714	1,011	41,475
KNN	0,021	6,13	81,351
LDA	–0,0003	28,634	45,711
NMF	0,008	6,608	**236,726**
Агломеративный	0,491	3,891	59,327

Таблица 3

Результаты для KavkazChat

Метод	silhouette_score	db_score	ch_score
BERTopic	**0,584**	**0,602**	**138,871**
DBSCAN	0,122	1,445	2,382
KNN	0,064	2,95	2,192
LDA	0,004	11,678	1,881
NMF	0,006	8,725	3,88
Агломеративный	0,18	0,972	2,742

Таблица 4

Результаты для лиц, признанных иноагентами в РФ

Метод	silhouette_score	db_score	ch_score
BERTopic	**0,557**	0,66	**134,36**
DBSCAN	0,441	10,341	2,67
KNN	0,412	**0,49**	2,952
LDA	0,429	10,875	2,57
NMF	0,441	9,41	3,06
Агломеративный	0,54	0,794	10,38

Лучшие результаты семантической кластеризации для всех трех наборов данных продемонстрировал BERTopic. Полученные им значения коэффици-

ента силуэта, индекса Дэвиса–Болдина и индекса Калински–Харабаза свидетельствуют о компактности кластеров и высокой степени их разделения.

Важно отметить, что при выборе метода семантической кластеризации в рамках данного исследования более важную роль играют коэффициент силуэта и индекс Дэвиса–Болдина. Это обусловлено тем, что данные метрики демонстрируют качество семантической кластеризации на основе наблюдений внутри каждого класса, а не между классами в целом. Таким образом, был сделан вывод о том, что BERTopic является наиболее эффективным для решения поставленной задачи и может быть использован в качестве базового для разрабатываемой методики семантической кластеризации текстов.

Разработка и апробация методики на основе BERTopic

Параметры BERTopic могут быть улучшены за счет тонкой настройки. На рис. 1 представлен алгоритм оптимизации параметров BERTopic на каждом из этапов его работы.

Первый этап работы BERTopic состоит в формировании векторных представлений полученных на входе текстов. Такие представления формируются при помощи SentenceTransformer [24]. Данная модель основана на трансформерах и преобразует предложения в векторные представления. Она обучается на больших корпусах текста и учитывает семантику предложений при вычислении представлений. За счет этого BERTopic обеспечивает высокую семантическую близость между предложениями.

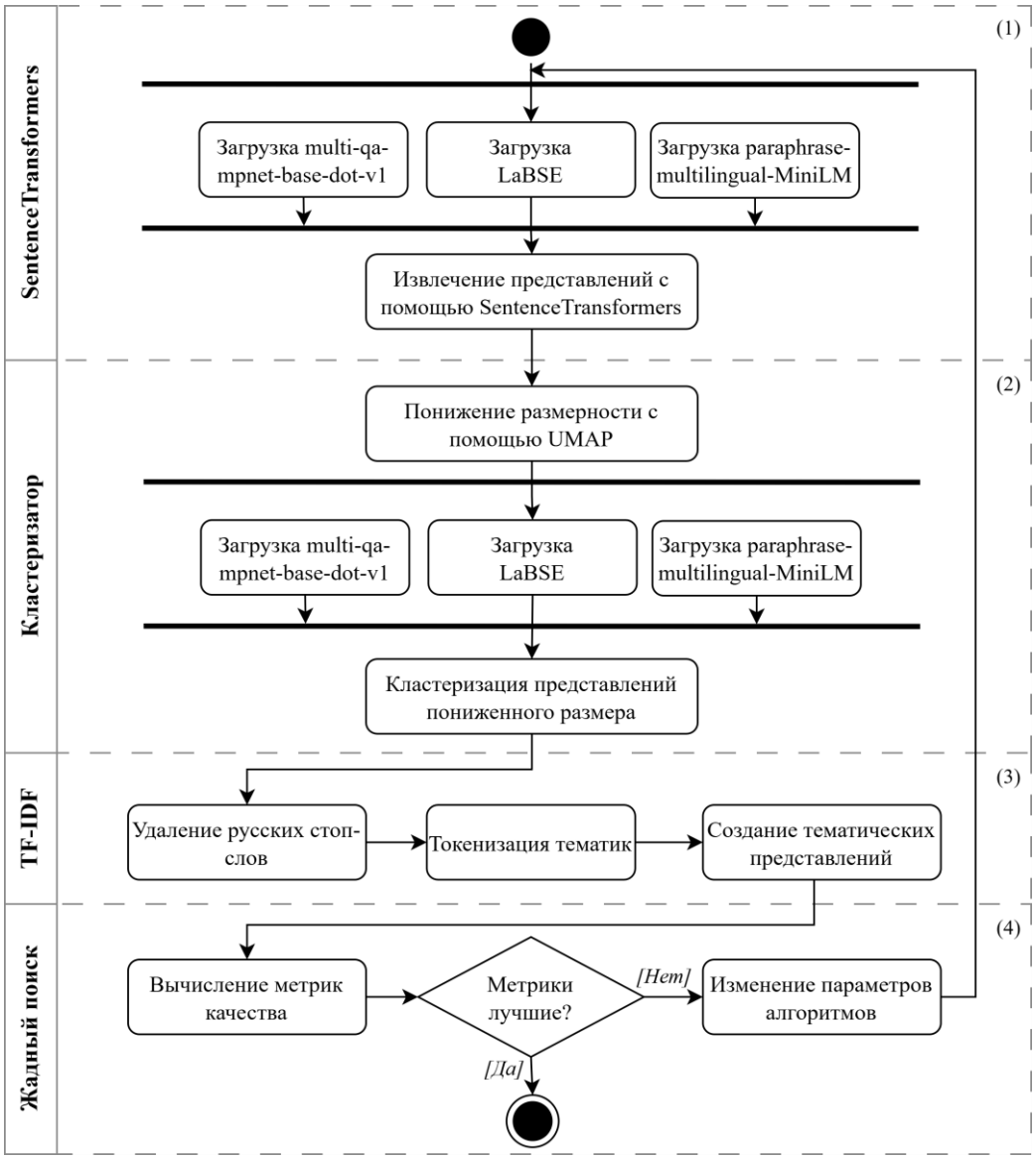


Рис. 1. Алгоритм семантической кластеризация при помощи BERTopic

На втором этапе происходит семантическая кластеризация. После получения векторных представлений их размерность снижается с помощью алгоритма Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) [25]. UMAP позволяет BERTopic сохранить глобальную структуру данных при пони-

жении размерности, что полезно для дальнейшей кластеризации. Затем к полученным от UMAP представлениям применяется определенный алгоритм кластеризации. BERTopic поддерживает множество алгоритмов, включая HDBSCAN [26], KNN, Birch и др. для группировки предложений или текстов в темы.

На третьем этапе для выбора представлений каждой темы и их ранжирования используются методы TF-IDF и максимальной предельной релевантности (MMR). TF-IDF позволяет оценить важность слов в предложении, а MMR учитывает как релевантность предложения или текста для темы, так и разнообразие относительно уже выбранных предложений или текстов.

На последнем этапе используется жадный поиск, осуществляющий автоматический подбор оптимальных алгоритмов BERTopic и их параметров.

В рамках данного исследования было решено опробовать несколько сочетаний алгоритмов, входящих в BERTopic. В качестве моделей, используемых SentenceTransformer для построения представлений, были выбраны мультиязычные multi-qa-mpnet-base-dot-v1, paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2 (MiniLM-L12-v2) и независимый от языка встраивания предложений BERT (LaBSE) [27]. В качестве внутренних алгоритмов кластеризации – KNN по методу локтя, Birch и HDBSCAN, позволяющие определять оптимальное число кластеров автоматически. Результаты экспериментов представлены в табл. 5–7.

Лучший результат был достигнут сочетанием LaBSE для получения векторных представлений и алгоритма HDBSCAN для кластеризации.

Параметры, подобранные для данного сочетания при помощи жадного поиска:

– UMAP: n_neighbors = 15, n_components = 3, metric='jaccard';

– HDBSCAN: metric='euclidean', cluster_selection_method='eom'.

Средний по наборам коэффициент силуэта для экспериментально подобранных настроек составил 0,68. Средний индекс Дэвиса–Болдина составил 0,36. Средний индекс Калински–Карабаза – 136,49.

Таблица 5

Результаты для Kaggle

Метрика	Sentence Transformer	Алгоритм кластеризации		
		KNN	Birch	HDBSCAN
silhouette score	multi-qa-mpnet -base-dot-v1	0,22	0,42	0,59
	MiniLM-L12-v2	0,36	0,55	0,74
	LaBSE	0,33	0,54	**0,75**
davies-bouldin score	multi-qa-mpnet -base-dot-v1	0,71	0,58	0,69
	MiniLM-L12-v2	0,6	0,49	**0,32**
	LaBSE	0,55	0,43	**0,32**
ch_score	multi-qa-mpnet -base-dot-v1	13,2	22,18	110,4
	MiniLM-L12-v2	27,45	49,11	116,21
	LaBSE	38,33	59,65	**127,35**

Таблица 6

Результаты для KavkazChat

Метрика	Sentence Transformer	Алгоритм кластеризации		
		KNN	Birch	HDBSCAN
silhouette score	multi-qa-mpnet -base-dot-v1	0,10	0,24	0,62
	MiniLM-L12-v2	0,3	0,45	0,63
	LaBSE	0,24	0,39	**0,64**
davies-bouldin score	multi-qa-mpnet-base-dot-v1	0,61	0,56	0,49
	MiniLM-L12-v2	0,59	0,47	0,455
	LaBSE	0,57	0,47	**0,44**
ch_score	multi-qa-mpnet -base-dot-v1	10,56	104,6	112,9
	MiniLM-L12-v2	68,17	109,04	136,25
	LaBSE	75,15	107,35	**144,5**

Таблица 7

Результаты для лиц, признанных иноагентами в РФ

Метрика	Sentence Transformer	Алгоритм кластеризации		
		KNN	Birch	HDBSCAN
silhouette score	multi-qa-mpnet -base-dot-v1	0,482	0,524	0,59
	MiniLM-L12-v2	0,49	0,6	0,64
	LaBSE	0,531	0,62	**0,65**
davies-bouldin score	multi-qa-mpnet-base-dot-v1	0,687	0,52	0,38
	MiniLM-L12-v2	0,6	0,49	**0,32**
	LaBSE	0,55	0,43	**0,32**
ch_score	multi-qa-mpnet -base-dot-v1	85,6	116,78	115,09
	MiniLM-L12-v2	91,45	119,11	116,21
	LaBSE	92,33	128,65	**137,63**

Полученные значения указывают на то, что кластеры не перекрываются и имеют достаточный уровень разделения. Семантически схожие тексты группируются в один кластер с минимальным разбросом и расстоянием между ними, а различные – разделяются на отдельные кластеры с максимальным разбросом и расстоянием.

Примеры облаков слов, соответствующие топ-5 для выделенных кластеров, приведены на рис. 2.

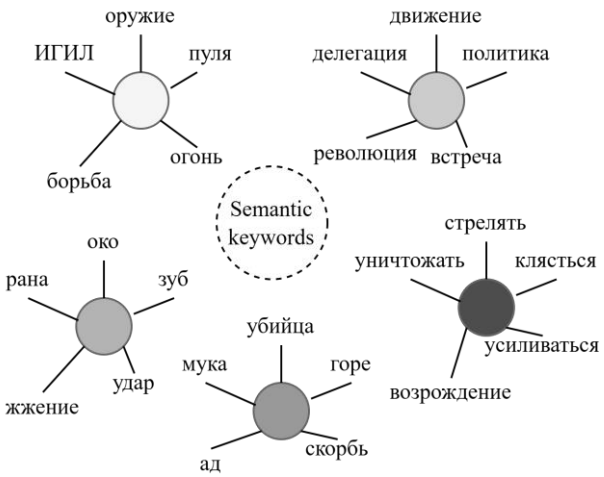


Рис. 2. Примеры ключевых слов топ-5 кластеров

Заключение

В рамках данного исследования был осуществлен анализ современных подходов к кластеризации текстов по их тематике. В результате анализа были отобраны наиболее эффективные для решения задачи установления авторства подходы: BERTopic, DBSCAN, KNN, агломеративный, LDA и NMF. Подходы были оценены на наборе данных, содержащем тексты и сообщения, опубликованные сторонниками экстремистских движений и запрещенные в РФ. Согласно вычисленным метрикам качества, наилучшим методом семантической кластеризации является BERTopic.

На базе BERTopic разработаны методика семантической кластеризации текстов с использованием алгоритма кластеризации HDBSCAN по метрике Евклида, алгоритм представления текстов LaBSE и алгоритм понижения размерности UMAP по метрике Жаккарда. Такая конфигурация позволила добиться средних показателей 0,68 по коэффициенту силуэта, 0,36 по индексу Дэвиса–Болдина и 136,49 по индексу Калински–Харабаза. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени разделения кластеров и их компактности.

Разработанная методика семантической кластеризации может использоваться как самостоятельно, так и в качестве модуля программного комплекса. Формирование текстовых кластеров, относящихся к таким категориям как негативный эмоциональный окрас, токсичность, экстремизм, терроризм и др., позволит более эффективно выявлять ложную, вредоносную и противозаконную информацию.

Кроме того, методика может быть использована для продленной аутентификации или обнаружения аномалий и необычных паттернов в потоке текстовых данных пользователей сети Интернет.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2023–2025 гг. (проект № FEWM-2023-0015).

Литература

1. Li T. An ensemble agglomerative hierarchical clustering algorithm based on clusters clustering technique and the novel similarity measurement / T. Li, A. Rezaeipanah // Journal of King Saud University. – 2022. – Vol. 34, No. 6. – P. 3828–3842.

2. McInnes L. Accelerated Hierarchical Density Based Clustering / L. McInnes, J. Healy // 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). – New Orleans, LA, USA, 2017. – P. 33–42.

3. K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data / M.I. Abiodun, E. Absalom, A. Laith, A. Belal, H. Jia // Information Sciences. – 2023. – Vol. 622. – P. 178–210.

4. Gaussian Mixture Model clustering algorithm for a probabilistic shaping 64QAM coherent optical communication system / H. Xu, Y. Wang, C. Li, X. Xin // 2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). – Shanghai, China, 2021. – P. 1–3.

5. Das M. Markov Clustering Algorithms and Their Application in Analysis of PPI Network of Malaria Genes / M. Das, P. Alphonse, S. Kamalanathan // 2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). – Cracow, Poland, 2021. – P. 855–860.

6. A Brief Review of Nearest Neighbor Algorithm for Learning and Classification / K. Taunk, S. De, S. Verma, A. Swetapadma // 2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS). – Madurai, India, 2019. – P. 1255–1260.

7. Chen L. The research on text clustering based on LDA joint model / L. Chen, Y. Cheng, J. Qin // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2021. – Vol. 32. – P. 3655–3667.

8. Melody K. Extending the Kohonen self-organizing map networks for clustering analysis // Computational Statistics & Data Analysis. – 2001. – Vol. 38. – P. 161–180.

9. Saha R. Influence of various text embeddings on clustering performance in NLP [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/pdf/2305.03144v1.pdf, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

10. Author Clustering and Topic Estimation for Short Texts [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/pdf/2106.09533v2.pdf, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

11. Samizadeh M. Graph-based Semantical Extractive Text Analysis [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/pdf/2212.09701v1.pdf, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

12. How Many Topics? Stability Analysis for Topic Models [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/pdf/1404.4606v3.pdf, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

13. Document Clustering based on Topic Maps [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1112/1112.6219.pdf, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

14. Learning Topics using Semantic Locality [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/pdf/1804.04205.pdf, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

15. Grootendorst M. BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/pdf/2203.05794v1.pdf, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

16. How ISIS Uses Twitter [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kaggle.com/datasets/fifthtribe/how-isis-uses-twitter, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

17. Religious Texts Used By [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kaggle.com/datasets/fifthtribe/isis-religious-texts, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

18. Deep_translator's documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://deep-translator.readthedocs.io/, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

19. Dark Web Forums [Электронный ресурс]. – URL: https://www.azsecure-data.org/dark-web-forums.html, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

20. Louvain method [Электронный ресурс]. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Louvain_method, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

21. Silhouette score [Электронный ресурс]. – URL: https://scikit-learn.org/ stable/modules/generated/sklearn.metrics.silhouette_score.html, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

22. Davies-Bouldin score [Электронный ресурс]. – URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.davies_bouldin_score.html, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

23. Clinski-Harabasz score [Электронный ресурс]. – URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.

metrics.calinski_harabasz_score.html, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

24. Sentence Transformers [Электронный ресурс]. – URL: https://huggingface.co/sentence-transformers, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

25. UMAP [Электронный ресурс]. – URL: https://umap-learn.readthedocs.io/en/latest/, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

26. HDBSCAN [Электронный ресурс]. – URL: https://hdbscan.readthedocs.io/en/latest/how_hdbscan_works.html, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

27. LaBSE [Электронный ресурс]. – URL: https://huggingface.co/sentence-transformers/LaBSE, свободный (дата обращения: 08.12.2023).

Романов Александр Сергеевич
Канд. техн. наук, доцент каф. комплексной информационной безопасности электронною-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: alexx.romanov@gmail.com

Romanov A.S.

Semantic clustering technique to identify the signs of extremism in text information

This article is devoted to the method of semantic clustering of texts for its subsequent application when solving information security problems. In particular, the technique can be used to identify false and malicious text information prohibited by the legislation of the Russian Federation, propaganda of extremism and terrorism, calls to incite ethnic, religious and other hatred and discord. The method proposed in the article is based on modern BERTopic technology with experimentally selected parameters and algorithms. The methodology was evaluated on data sets containing calls for extremism, terrorism, and incitement of religious and ethnic hatred. The quality metrics used were the silhouette coefficient, the Kalinski–Harabase index, and the Davis–Boldin index. According to the obtained results, the HDBSCAN algorithm was chosen for clustering using the Euclidean metric, the LaBSE algorithm was selected for text representation, and the UMAP algorithm was employed for dimensionality reduction based on the Jaccard metric. This BERTopic configuration resulted in average scores of 0.68 for the silhouette coefficient, 0.36 for the Davis-Boldin index, and 136.49 for the Kalinsky–Harabase index.

Keywords: semantics, clustering, information security.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-141-149

References

1. Li T., Rezaeipanah A. An ensemble agglomerative hierarchical clustering algorithm based on clusters clustering technique and the novel similarity. *Journal of King Saud University*, 2022, vol. 34, no. 6, pp. 3828–3842.

2. McInnes L., Healy J. Accelerated Hierarchical Density Based Clustering. *2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops* (*ICDMW*), New Orleans, LA, USA, 2017, pp. 33–42.

3. K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data. *Information Sciences*, 2023, vol. 622, pp. 178–210.

4. Gaussian Mixture Model clustering algorithm for a probabilistic shaping 64QAM coherent optical communication system. *2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, Shanghai, China, 2021, pp. 1–3.

5. Das M., Alphonse P., Kamalanathan S. Markov Clustering Algorithms and Their Application in Analysis of PPI Network of Malaria Genes. *2021 - 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Cracow, Poland, 2021, pp. 855–860.

6. A Brief Review of Nearest Neighbor Algorithm for Learning and Classification. *2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS)*, Madurai, India, 2019, pp. 1255–1260.

7. Chen L., Cheng Y., Qin J. The research on text clustering based on LDA joint model. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, vol. 32, pp. 3655–3667.

8. Melody K. Extending the Kohonen self-organizing map networks for clustering analysis. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2001, vol. 38, pp. 161–180.

9. Saha R. Influence of various text embeddings on clustering performance in NLP. Available at: https://arxiv.org/pdf/2305.03144v1.pdf, free (Accessed: December 08, 2023).

10. Author Clustering and Topic Estimation for Short Texts. Available at: https://arxiv.org/pdf/2106.09533v2.pdf, free (Accessed: December 08, 2023).

11. Samizadeh M. Graph-based Semantical Extractive Text Analysis. Available at: https://arxiv.org/pdf/2212.09701v1.pdf, free (Accessed: December 08, 2023).

12. How Many Topics? Stability Analysis for Topic Models. Available at: https://arxiv.org/pdf/1404.4606v3.pdf, free (Accessed: December 08, 2023).

13. Document Clustering based on Topic Maps. Available at: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1112/1112.6219.pdf, free (Accessed: December 08, 2023).

14. Learning Topics using Semantic Locality. Available at: https://arxiv.org/pdf/1804.04205.pdf, free (Accessed: December 08, 2023).

15. Grootendorst M. BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure. Available at: https://arxiv.org/pdf/2203.05794v1.pdf, free (Accessed: December 08, 2023).

16. How ISIS Uses Twitter. Available at: https://www.kaggle.com/datasets/fifthtribe/how-isis-uses-twitter, free (Accessed: December 08, 2023).

17. Religious Texts Used By. Available at: https://www.kaggle.com/datasets/fifthtribe/isis-religious-texts, free (Accessed: December 08, 2023).

18. Deep_translator's documentation. Available at: https://deep-translator.readthedocs.io/, free (Accessed: December 08, 2023).

19. Dark Web Forums. Available at: https://www.azsecure-data.org/dark-web-forums.html, free (Accessed: December 08, 2023).

20. Louvain method. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Louvain_method, free (Accessed: December 08, 2023).

21. Silhouette score. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.silhouette_score.html, free (Accessed: December 08, 2023).

22. Davies-Bouldin score. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.davies_bouldin_score.html, free (Accessed: December 08, 2023).

23. Clinski-Harabasz score. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.calinski_harabasz_score.html, free (Accessed: December 08, 2023).

24. Sentence Transformers. Available at: https://huggingface.co/sentence-transformers, free (Accessed: December 08, 2023).

25. UMAP. Available at: https://umap-learn.readthedocs.io/en/latest/, free (Accessed: December 08, 2023).

26. HDBSCAN. Available at: https://hdbscan.readthedocs.io/en/latest/how_hdbscan_works.html, free (Accessed: December 08, 2023).

27. LaBSE. Available at: https://huggingface.co/sentence-transformers/LaBSE, free (Accessed: December 08, 2023).

Aleksandr S. Romanov
Candidate of Sciences in Engineering,
Associate Professor, Department of Complex Information Security of Computer Systems,
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-29
Email: alexx.romanov@gmail.com

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.314

А.В. Осипов

Сопоставление энергетических характеристик резонансных *LLC*- и *LCC*-преобразователей постоянного напряжения

Приведены результаты сопоставления энергетических характеристик резонансных *LLC*- и *LCC*-преобразователей в режиме стабилизации выходного напряжения. Установлено, что в *LLC*-преобразователе при регулировании происходит параметрическое фазовое смещение тока шунтирующего дросселя, что позволяет минимизировать ток инвертора, при этом в *LCC*-преобразователе регулирование осуществляется исключительно за счет введения интервала рекуперации, завышающего потери. Проведена оценка действующего значения тока инвертора, установлено, что максимальные статические потери одинаковы для обоих преобразователей, отличие состоит в том, что они соответствуют разным точкам диапазона регулирования.

Ключевые слова: резонансный *LLC*-преобразователь, *LCC*-преобразователь, энергетические характеристики.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-153-159

Широкое применение резонансных преобразователей *LLC*-топологии [1–10] в системах электропитания объясняется их высокой энергетической эффективностью, обусловленной низкодобротным резонансным контуром, который может быть построен на основе паразитных параметров трансформатора. В *LLC*-преобразователе обычно применяется частотное регулирование, хотя при включении активного выпрямителя, например [4], обеспечивающего двунаправленную передачу энергии, режимы регулирования более сложны. Преобразователь на основе *LCC*-топологии [11–16] является сравнительно новым и обычно выполняется в комбинации с *C*-фильтром, хотя встречаются решения и с *LC*-фильтром, например [11, 12]. Принято считать, что эффективность резонансных преобразователей обусловлена переключением транзисторов при нулевом напряжении ZVS, что обеспечивается синусоидальной формой тока резонансного контура. Однако последовательно-параллельные топологии резонансного контура обладают свойством импедансного преобразования нагрузки, что уменьшает интервалы рекуперации тока инвертора и может улучшить энергетические характеристики. В данной статье проведено сопоставление энергетических характеристик *LLC*- и *LCC*-преобразователей в режиме стабилизации выходного напряжения на основе анализа тока резонансного контура.

Резонансный *LLC*-преобразователь

В *LLC*-преобразователе резонансный контур образован введением дополнительной индуктивности (рис. 1, *а*), что позволяет регулировать ток инвертора шунтированием входного тока выпрямителя. Принцип работы удобно пояснить с помощью векторной диаграммы (рис. 1, *б*). Как и в большинстве резонансных преобразователей, в *LLC* применяется частотное регулирование, основанное на введении частотной расстройки Ω, смещающей вектор входного напряжения $U_{вх}$ относительно выходного U_R в сторону опережения φ > α или запаздывания φ < α. Особенность *LLC*-контура основана на заданном индуктивностью $L_μ$ начальном опережении вектором I_R вектора входного тока $I_{вх}$ на угол

$$\alpha = -\operatorname{arctg}\frac{R}{\omega L_\mu} = -\operatorname{arctg}\frac{1}{Q\Omega m}.$$

Это позволяет в области Ω < 1 получить увеличение выходного напряжения при положительной фазе тока резонансного контура φ, обеспечивающей коммутацию в условиях ZVS. При этом на резонансной частоте *LC*-контура Ω = 1 будет φ = α и K_U = 1.

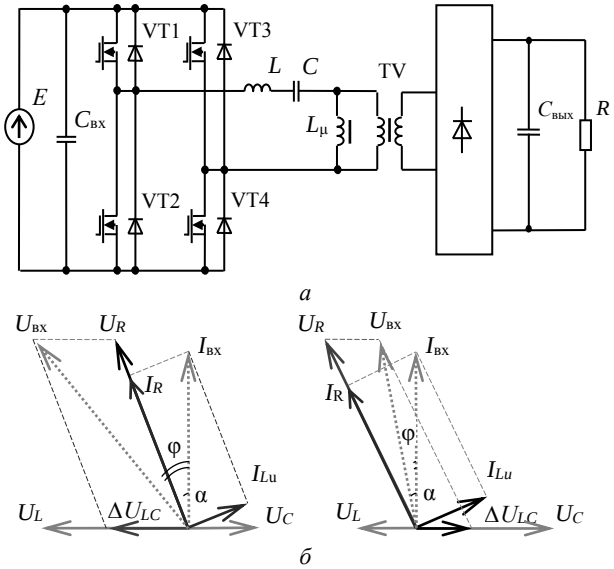


Рис. 1. Резонансный *LLC*-преобразователь – *а*. Векторная диаграмма – *б*

Математическая модель *LLC*-преобразователя обычно строится по первой гармонике, можно привести пример получения описывающих его базовых выражений на основе импедансно-частотных характеристик, приведенный в [9]

$$Z(\omega) = \left(j\omega L - j\frac{1}{\omega C}\right) + \frac{j\omega L_\mu \cdot R}{R + j\omega L_\mu},$$

$$\operatorname{Re} Z(\Omega) = R_{ac}\frac{Q^2\Omega^2 m^2}{1+Q^2\Omega^2 m^2},$$

$$\operatorname{Im} Z(\Omega) = R_{ac}\left(\xi(\Omega) + \frac{Q\Omega m}{1+Q^2\Omega^2 m^2}\right),$$

где $Q=\rho/R$ – добротность предвключенного *LC*-контура, $\Omega=\omega\sqrt{LC}$ – относительная частота, $m=L_\mu/L$ – отношение индуктивностей. Из данных соотношений можно получить АЧХ и ФЧХ входного тока *LLC*-контура.

$$I_{\text{вх}}(\Omega)=\frac{U_{\text{вх}}}{|Z(\Omega)|},\quad \varphi(\Omega)=\operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im} Z(\Omega)}{\operatorname{Re} Z(\Omega)}\right),$$

$$I^*_{\text{вх}}(\Omega)=\frac{1+Q^2\Omega^2m^2}{\sqrt{\left(Q^2\Omega^2m^2\right)^2+\left(\xi(\Omega)\left(1+Q^2\Omega^2m^2\right)+Q\Omega m\right)^2}},$$

где $I_{\text{вх}}{}^*(\Omega)=I_{\text{вх}}(\Omega)\cdot R_{\text{ac}}/U_{\text{вх}}$;

$$\varphi(\Omega)=\operatorname{arctg}\left(Q\frac{\left(\Omega^2-1\right)\left(1+Q^2\Omega^2m^2\right)+\Omega^2m}{\Omega\cdot Q^2\Omega^2m^2}\right).$$

Коэффициент передачи *LLC*-контура по напряжению

$$K_U=\frac{\cos\left(\varphi(\Omega)\right)}{\sqrt{\operatorname{Re}(\Omega)}}=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{m}\frac{\Omega^2-1}{\Omega^2}+1\right)^2+\left(Q\frac{\Omega^2-1}{\Omega}\right)^2}}.$$

Частотные характеристики *LLC*-контура представлены на рис. 2. Частота $\Omega = 1$ разбивает диапазон регулирования на два участка, обеспечивающих понижающий и повышающий режим, в котором K_U зависит от добротности Q и отношения m.

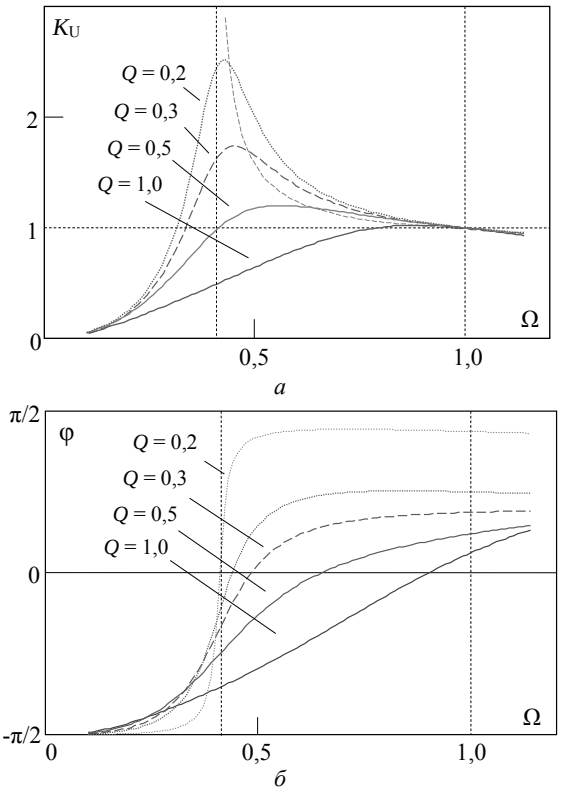


Рис. 2. Частотные характеристики резонансного *LLC*-контура при отношении индуктивностей $m = 5$: АЧХ – *а*, ФЧХ – *б*

В большинстве случаев применяется повышающий режим работы *LLC*-преобразователя, в котором меньше фаза тока и рекуперация энергии. Кроме того, в области малых нагрузок коэффициент передачи имеет большую стабильность. В предельном случае на холостом ходу при $Q \to 0$

$$K_{U\text{xx}}=\frac{m}{(m+1)-1/\Omega^2},$$

т.е. резонансный *LLC*-контур предполагает возможность регулирования выходного напряжения даже в режиме холостого хода, хотя практически в схеме с диодным выпрямителем это невозможно.

Регулирование в преобразователе осуществляется изменением частоты в диапазоне $[\Omega_0, \ldots, 1]$, где резонансная частота *LLC*-контура Ω_0 соответствует максимальному коэффициенту передачи

$$K_{U\max}=\frac{1}{\cos\alpha}=\sqrt{1+\frac{1}{Q^2\Omega^2m^2}}$$

и является границей диапазона регулирования при условии обеспечении ZVS-коммутации. Частота Ω_0 зависит от нагрузки и находится между точками $\Omega = 1$ и $\Omega_{LLC}=1/\sqrt{1+m}$. Фаза тока *LLC*-контура увеличивается при смещении $\Omega \to 1$ (см. рис. 2, *б*) и определяет рекуперацию энергии, следовательно, является первичным критерием оценки энергетической эффективности.

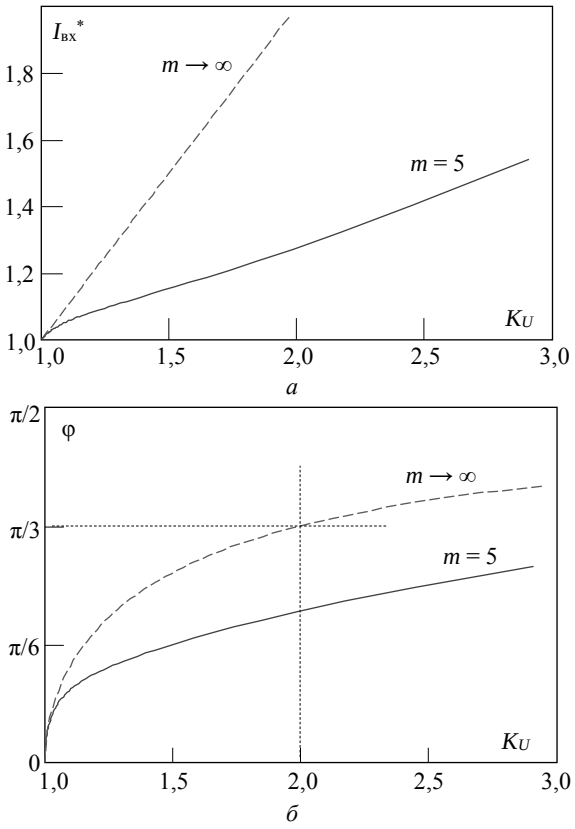


Рис. 3. Входной ток *LLC*-контура в функции от коэффициента передачи: амплитуда тока – *а*, фаза – *б*

С позиций энергетики интересно сопоставление характеристик входного тока резонансного

LLC-контура со случаем $m \to \infty$, предполагающим отсутствие повышающего режима и вырождение *LLC*-контура в *LC*-контур, характеристики приведены в функции от коэффициента передачи (рис. 3). Можно отметить, что при равном диапазоне регулирования *LLC*-контур характеризуется меньшими значениями фазы и амплитуды тока, что свидетельствует о меньшей рекуперации энергии и большей энергетической эффективности. Данный эффект обусловлен параметрическим преобразованием импеданса нагрузки, осуществляемым *LLC*-контуром за счет шунтирования ее тока.

Диаграммы работы *LLC*-преобразователя (рис. 4) раскрывают суть вышесказанного. Прежде всего, нужно отметить, что ток дросселя $L\mu$ имеет линейную форму, и ток инвертора формируется его сложением с синусоидальным током выпрямителя. На частоте предвключенного *LC*-контура при $\Omega = 1$ ток L_μ сдвинут на $\pi/2$ относительно напряжения инвертора (его среднее значение на полупериоде $I_{L\mu_avg} = 0$), таким образом, средние значения тока инвертора и выпрямителя равны, коэффициент передачи равен единице, присутствует положительная фаза тока. Введение частотной расстройки $\Omega < 1$ смещает фазу тока L_μ, что приводит к увеличению среднего значения тока инвертора относительно тока выпрямителя и регулированию выходного напряжения. В предельном случае образуется фазовый сдвиг тока, формирующий максимальную ампер-секундную площадь тока L_μ на полупериоде (рис. 4, *б*) и максимальный коэффициент передачи.

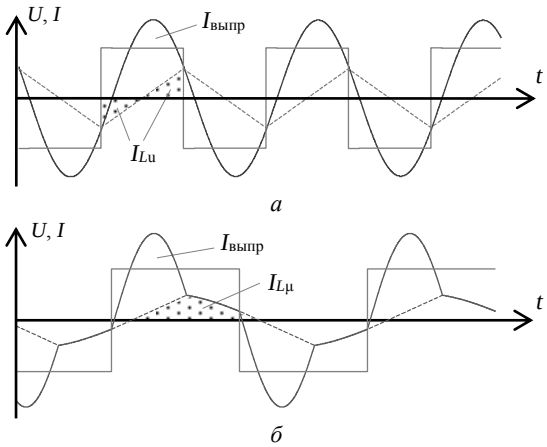


Рис. 4. Диаграммы работы *LLC*-преобразователя: режим единичного коэффициента передачи – *а*, максимальный коэффициент передачи – *б*

Таким образом, регулирование в *LLC*-преобразователе происходит не за счет введения интервалов рекуперации, а путем добавления ампер-секундной площади тока дросселя L_μ к току выпрямителя. Фаза тока инвертора (при $\Omega = 1$) не связана с регулированием и имеет побочный характер, т.е. регулирование основано прежде всего на параметрическом преобразовании импеданса резонансного контура.

Резонансный *LCC*-преобразователь

В резонансном *LCC*-преобразователе шунтирование нагрузки выполнено реактивным элементом другого знака, т.е. конденсатором, что вызывает обратное смещение фазы выходного тока в сторону запаздывания. В этом случае образуется *LCC*-топология, дуальная к топологии *LLC* (рис. 5).

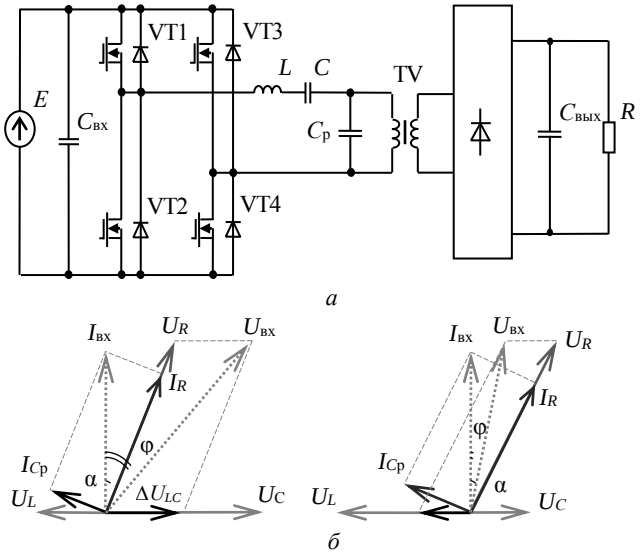


Рис. 5. Резонансный *LCC*-преобразователь – *а*. Векторная диаграмма *LCC*-контура – *б*

Входной импеданс резонансного контура в этом случае выражен соотношениями

$$Z(\omega) = j\omega L - j\frac{1}{\omega C} - \frac{j\frac{1}{\omega Cp}\cdot R_{ac}}{R_{ac} - j\frac{1}{\omega C_p}},$$

$$\mathrm{Re}\, Z(\Omega) = R_{ac}\frac{Q^2m^2}{Q^2m^2+\Omega^2},$$

$$\mathrm{Im}\ Z(\Omega) = R_{ac}\left(\xi(\Omega) - \frac{Q\Omega m}{Q^2m^2+\Omega^2}\right),$$

где $m = C/C_p$ отношение резонансных конденсаторов. Условие $\mathrm{Re}\, Z(\Omega) < R_{ac}$ позволяет реализовать повышающий режим. Реактивная составляющая состоит из слагаемых, обусловленных расстройкой входного *LC*-контура и сопротивлением конденсатора C_p. Из импедансных характеристик несложно получить АЧХ и ФЧХ входного тока *LCC*-контура

$$I^*_{вх}(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Q^2m^2}{Q^2m^2+\Omega^2}\right)^2 + \left(\xi(\Omega,Q) - \frac{Q\Omega m}{Q^2m^2+\Omega^2}\right)^2}},$$

$$\varphi(\Omega) = \mathrm{arctg}\left(\frac{\xi(\Omega)\cdot\left(Q^2m^2+\Omega^2\right) - Q\Omega m}{Q^2m^2}\right).$$

Анализ резонансного *LCC*-контура на основе векторной диаграммы показывает, что вектор тока нагрузки I_R запаздывает относительно входного тока контура $I_{вх}$ на угол α, являющийся в данном случае положительным:

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(R\omega C_p\right) = \mathrm{arctg}\frac{\Omega}{Qm}.$$

Коэффициент передачи *LCC*-контура по напряжению, как и в *LLC*-контуре, определяется углами векторной диаграммы, и после несложных преобразований с помощью теоремы косинусов

$$K_U = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\Omega^2-1}{m}-1\right)^2+\left(Q\frac{\Omega^2-1}{\Omega}\right)^2}}.$$

Частотные характеристики *LCC*-контура показаны на рис. 6 и во многом аналогичны характеристикам *LLC*, частота Ω = 1 разбивает диапазон регулирования на два участка, обеспечивающих понижающий (Ω < 1) и повышающий (Ω > 1) режимы. Однако в обоих случаях фаза входного тока контура отрицательна, что обеспечит жесткое включение транзисторов инвертора. Условие ZVS выполняется на частотах выше резонансной, которая соответствует максимальному коэффициенту передачи напряжения

$$K_{U\max} = \frac{1}{\cos\alpha} = \sqrt{1+\frac{\Omega^2}{Q^2m^2}}$$

и является нижней границей участка повышения выходного напряжения.

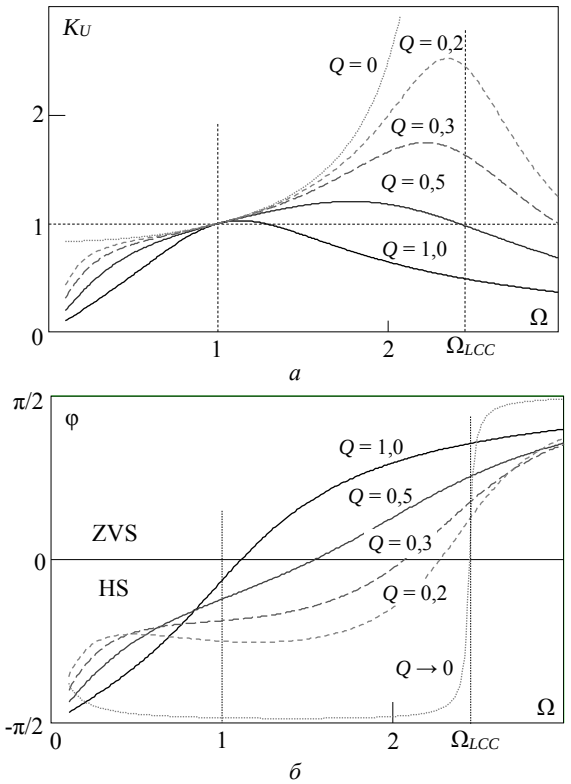


Рис. 6. Характеристики резонансного *LCC*-контура при отношении *m* = 5: АЧХ – *а*, ФЧХ – *б*

Следует сказать, что обе границы частотного диапазона участка повышения выходного напряжения зависят от нагрузки. Резонансная частота, т.е. нижняя граница диапазона, находится на интервале $\Omega_0 = [1\ldots\ \Omega_{LCC}]$, где $\Omega_{LCC} = \sqrt{m+1}$, уменьшение нагрузки приводит к смещению $\Omega_0 \to \Omega_{LCC}$. Частота единичного коэффициента передачи $K_U = 1$ (т.е. верхняя граница) также зависит от нагрузки и ограничена значением $\Omega_1 = \sqrt{2m+1}$ при $Q \to 0$. Таким образом, при регулировании коэффициента передачи $K_U = [K_{U\max}\ldots 1]$ и обеспечении условия ZVS обе границы частотного диапазона $\Omega = [\Omega_0\ldots\Omega_1]$ не являются фиксированными и зависят от нагрузки.

Принцип работы *LLC*-преобразователя далее раскрывается с помощью диаграмм (рис. 7). Ток инвертора $I_{инв}$ имеет близкую к синусоидальной форму и является суммой двух интервалов: интервала тока выпрямителя $I_{выпр}$ и конденсатора $I_{Ср}$, протекающих каждый на своем временном интервале, определяемом состоянием проводимости диодов выпрямителя.

На резонансной частоте *LCC*-контура Ω_0 (см. рис. 7, *а*) коэффициент передачи максимален и зависит от емкости конденсатора $C_р$, которая определяет длительность временного интервала, необходимого для его перезаряда: чем больше емкость, тем меньше интервал проводимости выпрямителя и тем больше коэффициент передачи по напряжению.

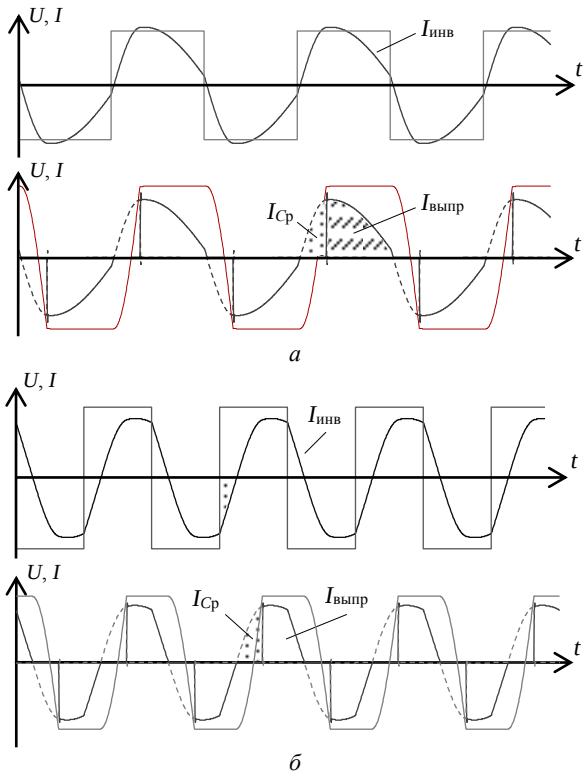
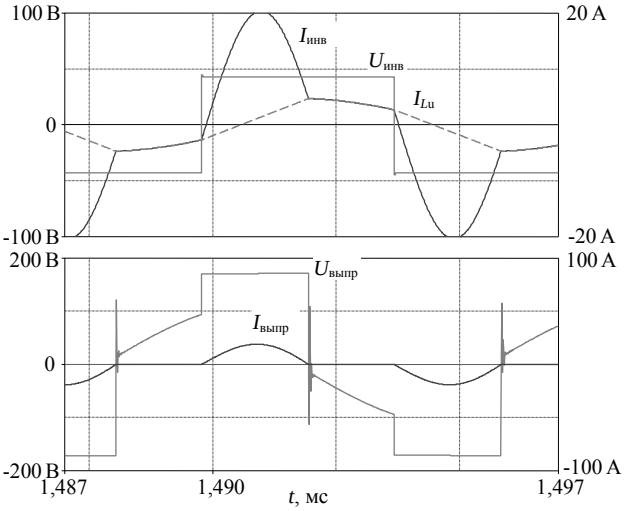


Рис. 7. Диаграммы работы *LCC*-преобразователя при *m* = 5: максимальный коэффициент передачи – *а*, единичный коэффициент передачи – *б*

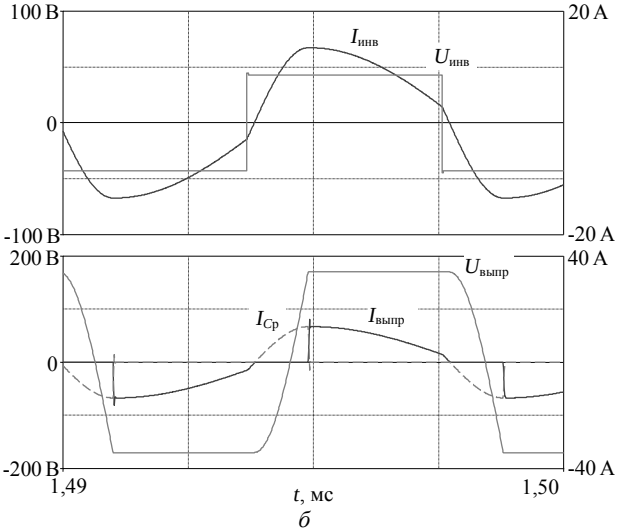
Регулирование обеспечивается частотной расстройкой контура путем введения интервала рекуперации в инвертор. При этом временной интервал перезаряда конденсатора стабилен, регулирование коэффициента передачи происходит исключительно за счет рекуперации тока инвертора.

Моделирование *LLC*- и *LCC*-преобразователей в режиме стабилизации выходного напряжения

Для количественной оценки энергетических характеристик проведено имитационное моделирование *LLC*- и *LCC*-преобразователей в среде OrCad9.2. Реализован режим стабилизации выходного напряжения $U_{вых} = 170$ В при изменении входного напряжения в диапазоне $U_{вх} = [42…56$ В], стабилизация производилась частотным регулированием при постоянном сопротивлении нагрузки $R_н = 25$ Ом. Согласование уровней напряжения в точке максимального входного напряжения $U_{вх} = 56$ В обеспечено трансформатором с коэффициентом $K_{тр} = 3$. Максимальный коэффициент передачи контура настроен на резонансную частоту $f_0 = 128$ кГц. Параметры элементов резонансного *LLC*-контура: $L = 6{,}8$ мкГн, $C = 75$ нФ, $L_ц = 50$ мкГн – обеспечивают его приведенные параметры: $m = 7{,}35$; $R_{ac} = 8/\pi^2 \cdot R_н = 20{,}3$ Ом; $Q = 0{,}47$; $f_{LC} = 223$ кГц; $\Omega_0 = 0{,}57$. Результаты моделирования при минимальном входном напряжении $U_{вх} = 42$ В и максимальном коэффициенте передачи показаны на рис. 8, *а*.



а

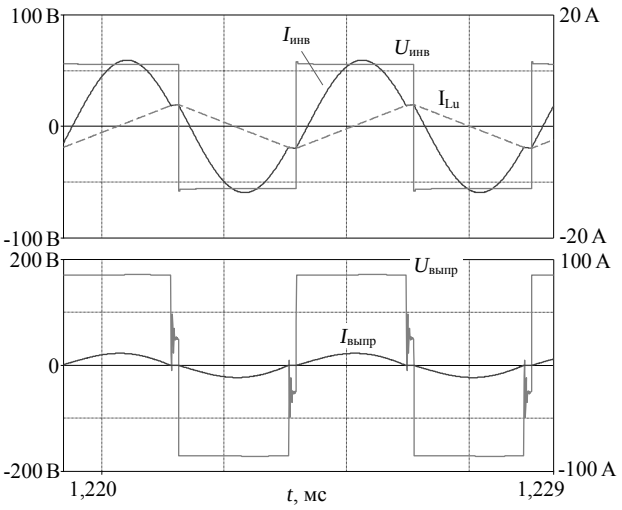


б

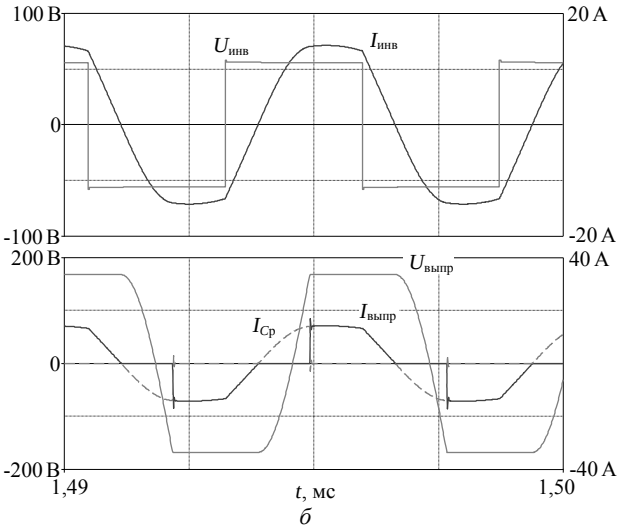
Рис. 8. Результаты моделирования при максимальном коэффициенте передачи: *LLC*- преобразователь – *а*, *LCC*-преобразователь – *б*

При моделировании параметры резонансного контура подобраны таким образом, чтобы обеспечить ZCS. Получено действующее значение тока инвертора $I_{инв_rms} = 33{,}5$ А. Данное значение превышает эквивалентное, соответствующее синусоидальному току на 12,4%, что связано с искажениями формы тока инвертора, которая существенно отличается от синусоидальной. Коэффициент формы тока можно примерно оценить как $K_f = 1{,}23$. Моделирование *LCC*-преобразователя показано на рис. 8, *б*. Максимальный коэффициент передачи получен при параметрах *LCC*-контура: $L = 20$ мкГн, $C = 190$ нФ, $C_р = 27$ нФ, которые обеспечивают приведенные параметры: $m = 7$, $Q = 0{,}5$, $f_{LC} = 81{,}6$ кГц, $\Omega_0 = 1{,}57$. Получено действующее значение тока инвертора $I_{инв_rms} = 29{,}9$ А, что соответствует эквивалентному значению, так как ток синусоидален.

Проведено моделирование рассматриваемых преобразователей при единичном коэффициенте передачи и максимальном значении входного напряжения (рис. 9). В случае *LLC*-преобразователя (см. рис. 9, *а*) настройка произведена на частоту $f = 208$ кГц, близкую к $\Omega = 1$.



а



б

Рис. 9. Результаты моделирования при единичном коэффициенте передачи: *LLC*- преобразователь – *а*, *LCC*-преобразователь – *б*

Получено действующее значение тока инвертора $I_{инв_rms} = 24{,}5$ А при среднем потребляемом токе $I_{вх} = 22$ А, что является фактически минимальным значением. Моделирование резонансного *LCC*-преобразователя в точке единичного коэффициента передачи (см. рис. 9, *б*) показало действующее значение тока инвертора $I_{инв_rms} = 33{,}4$ А, при аналогичном среднем токе с учетом коэффициента формы синусоидального тока можно зафиксировать завышение действующего тока на 37%.

Заключение

Проведено сопоставление энергетических характеристик резонансных *LLC*- *LCC*-преобразователей в режиме стабилизации выходного напряжения. В первую очередь, оценивалось действующее значение тока инвертора, определяющее статические потери. Установлено, что, несмотря на то, что в обоих типах преобразователей максимальный коэффициент передачи соответствует резонансной частоте (т.е. $\varphi = 0$), они имеют совершенно разную энергетику. В частности, режим *LLC*-преобразователя в данной точке менее эффективен из-за искажений формы тока инвертора. Формирование единичного коэффициента передачи в *LLC*-преобразователе происходит за счет смещения фазы тока L_u, что позволяет фактически минимизировать ток инвертора, незначительная рекуперация обусловлена током L_u. В *LCC*-преобразователе форма тока близка к синусоидальной во всем диапазоне регулирования. В точке максимального коэффициента передачи это позволяет получить меньшее, чем в *LLC*-преобразователе действующее значение тока. Однако изменение частоты не вызывает параметрического уменьшения тока конденсатора C_p, регулирование осуществляется исключительно за счет введения интервала рекуперации, завышающего ток инвертора.

Таким образом, при стабилизации выходного напряжения максимальные статические потери одинаковы для обоих преобразователей, отличие состоит в том, что в *LLC*-преобразователе они соответствуют максимальному коэффициенту передачи (минимальное входное напряжение), а в *LCC*-преобразователе – единичному. При этом необходимо учитывать, что в *LLC*-преобразователе при регулировании происходит параметрическое уменьшение тока инвертора, уменьшающее потери, а в *LCC*-преобразователе действующее значение тока сохраняется.

Литература

1. Hsieh G. Design Considerations for LLC Series-Resonant Converter in Two-Resonant Regions / G. Hsieh, C. Tsai, S. Hsieh // IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando, FL, USA, 17–21 June 2007. – P. 731–736. DOI: 10.1109/PESC.2007.4342078.

2. Park H. Design considerations of 1 MHz LLC resonant converter with GaN E-HEMT / H. Park, J. Jung // 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), Geneva, Switzerland, 08–10 September 2015. – P. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2015.7309283.

3. Hangseok C. Analysis and Design of LLC Resonant Converter with Integrated Transformer // Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), Anaheim, CA, USA, 25 February – 01 March 2007. – P. 1630–1635. DOI: 10.1109/APEX.2007.357736.

4. Hillers A. Design of a Highly Efficient Bidirectional Isolated LLC Resonant Converter / A. Hillers, D. Christen, L. Biela // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), Novi Sad, Serbia, 04–06 September 2012. – P. DS2b.13-1–DS2b.13-8.

5. Белов Г.А. Анализ резонансного преобразователя постоянного напряжения типа *LLC* методом основной гармоники / Г.А. Белов, А.А. Павлова // Практическая силовая электроника. – 2018. – № 1. – С. 2–10.

6. Столярова А.А. Математическая модель резонансного LLC-преобразователя / А.А. Столярова, С.Г. Михальченко, В.И. Апасов // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 86–91.

7. Gupta P.P. Design and Analysis of LLC Resonant Converter and CCCV Topology for Battery Charging / P.P. Gupta, N. Kumar, U. Nangia // 2nd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON), 2022. – P. 1–5.

8. Tsang H.K.T. A Study of LLC Converter with Buck Converter for CC-CV Charging / H.K.T. Tsang, Y.C. Fong, K.L.J. Kan, S.R. Raman, K.W.E. Cheng // 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2020. – P. 1.

9. Daying S. A Constant Current Digital Control Method for Primary-Side Regulation Half-Bridge LLC Resonant Converter / S. Daying, C. Lihui, Y. Yu, D. Mian, W. Chong, G. Wenhua // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2023. – P. 3104–3108.

10. Zhang G. Application of Improved Linear Active Disturbance Rejection Control in LLC-Converters for Battery Formation / G. Zhang, X. Zhang, C. Fu, B. Qi // 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS), 2023. – P. 680–684.

11. Gilbert A.J. Rapid design of LCC current-output resonant converters with reduced electrical stresses / A.J. Gilbert, D.A. Stone, C.M. Bingham // European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Germany. – 2005. – P. 9. DOI: 10.1109/EPE.2005.219579.

12. Cheng C. DC power supply based on half bridge LCC resonant converter / C. Cheng, Y. Lee // International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Taipei, Taiwan. – 2009. – P. 1102–1106. DOI: 10.1109/PEDS.2009.5385676.

13. Jain A. LCC-Resonant Converter Design and Transfer Function Computation Using FHA Analysis / A. Jain, I.C. Massimiani // 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), 2021. – P. 1–5.

14. Attanasio R. A GaN Based LCC Converter for Lithium-Ion Battery Chargers / R. Attanasio, H. Ademane, J. Hyslop, G. Vitale // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2023. – P. 2489–2495.

15. Chen Z. A Hybrid Half-bridge LCC Resonant Converter and Phase-Shift Full-bridge Converter for High Step-up Applications / Z. Chen, P. Liu, S. Fan // 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA), 2022. – P. 123–129.

16. Zhong S. Limitations and Solutions of LLC Topology in High Power High Step-up Applications on Aircraft / S. Zhong, X. Wu, B. Wang, X. Zhao, X. Chen, X. Wu // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2022. – P. 1–5.

Осипов Александр Владимирович
Д-р техн. наук, доцент каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского государственного 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.

A Comparative Study of Energy Characteristics in Resonant LLC- and LCC- DC-DC-Converters

The results of comparison of resonant LLC- and LCC-converters in the output voltage stabilization mode are presented. It is shown that in the LLC-converter, the regulation occurs due to the parametric phase shift of the shunt choke current, that allows minimizing the inverter current. In the same time in the LCC-converter, the regulation is carried out exclusively due to the introduction of a recuperation interval, overestimating the losses. An assessment of the effective value of the inverter current is carried out, it is found that the maximum static losses are the same for both converters, the difference is that they correspond to different points of the regulation range.

Keywords: resonant LLC-converter, LCC-converter, energy characteristics.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-4-153-159

References

1. Hsieh G., Tsai C., Hsieh S. Design Considerations for LLC Series-Resonant Converter in Two-Resonant Regions. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Orlando, FL, USA, 17–21 June 2007, pp. 731–736. DOI: 10.1109/PESC.2007.4342078.

2. Park H., Jung J. Design considerations of 1 MHz LLC resonant converter with GaN E-HEMT. *The 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, Geneva, Switzerland, 08–10 September 2015, pp. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2015.7309283.

3. Hangseok C. Analysis and Design of LLC Resonant Converter with Integrated Transformer. *Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC)*, Anaheim, CA, USA, 25 February – 01 March 2007, pp. 1630–1635. DOI: 10.1109/APEX.2007.357736.

4. Hillers A., Christen D., Biela J. Design of a Highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter. *The 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Novi Sad, Serbia*, 04–06 September 2012, pp. DS2b.13-1–DS2b.13-8.

5. Belov G.A., Pavlova A.A. [LLC type resonant DC-DC converter analysis by fundamental harmonic method] *Practical Power Electronics*, 2018, no. 1, pp. 2–10 (in Russ.).

6. Stolyarova A.A., Mikhalcenko S.G., Apasov V.I. [Mathematical model of the LLC resonant converter] *Proceedings of TUSUR University,* 2020, Vol. 23, no. 3, pp. 86–91 (in Russ.).

7. Gupta P.P., Kumar N., Nangia U. Design and Analysis of LLC Resonant Converter and CCCV Topology for Battery Charging. *2nd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*, 2022, pp. 1–5.

8. Tsang H.K.T., Fong Y.C., Kan K.L.J., Raman S.R., Cheng K.W.E. A Study of LLC Converter with Buck Converter for CC-CV Charging. *8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 2020, pp. 1.

9. Daying S., Lihui C., Yu Y., Mian D., Chong W., Wenhua G. A Constant Current Digital Control Method for Primary-Side Regulation Half-Bridge LLC Resonant Converter. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2023,* pp. 3104–3108.

10. Zhang G., Zhang X., Fu C., Qi B. Application of Improved Linear Active Disturbance Rejection Control in LLC-Converters for Battery Formation. *3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS)*, 2023, pp. 680–684.

11. Gilbert A.J., Stone D.A., Bingham C.M. Rapid design of LCC current-output resonant converters with reduced electrical stresses. *European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Germany*, 2005, pp. 9. DOI: 10.1109/EPE.2005.219579.

12. Cheng C., Lee Y. DC power supply based on half bridge LCC resonant converter. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Taipei, Taiwan,* 2009, pp. 1102–1106. DOI: 10.1109/PEDS.2009.5385676.

13. Jain A. LCC Resonant Converter Design and Transfer Function Computation Using FHA Analysis / A. Jain, I.C. Massimiani // *4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2021. pp. 1–5.

14. Attanasio R. A GaN Based LCC Converter for Lithium-Ion Battery Chargers / R. Attanasio, H. Ademane, J. Hyslop, G. Vitale // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2023, pp. 2489–2495.

15. Chen Z. A Hybrid Half-bridge LCC Resonant Converter and Phase-Shift Full-bridge Converter for High Step-up Applications / Z. Chen, P. Liu, S. Fan // *9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)*, 2022, pp. 123–129.

16. Zhong S. Limitations and Solutions of LLC Topology in High Power High Step-up Applications on Aircraft / S. Zhong, X. Wu, B. Wang, X. Zhao, X. Chen, X. Wu // *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2022, pp. 1–5.

Alexander V. Osipov
Doctor of Science in Engineering, Associate Professor,
Department of Industrial Electronics
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

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

90 лет со дня рождения

Памяти профессора И.Н. Пустынского



Иван Николаевич Пустынский
(1934–2017)

И.Н. Пустынский родился 24.03.1934 г. в д. Бузыканово Богучанского района Красноярского края. В 1956 г. окончил с отличием радиотехнический факультет Томского политехнического института (ТПИ) по специальности «Радиотехника», где в 1956–1959 гг. учился в аспирантуре и одновременно работал младшим научным сотрудником НИСа. В 1959–1961 гг. ассистент, в 1961 г. назначен заведующим кафедрой радиопередающих устройств (РПУ).

В 1962 г. И.Н. Пустынский и возглавляемая им кафедра, которой он руководил по 2013 г. (сейчас называется кафедрой телевидения и управления), были переведены во вновь организованный ТИРиЭТ. В 1962/63 гг. был деканом радиотехнического факультета. Кандидат (1961) и доктор (1971) технических наук, доцент (1964), профессор (1971). Автор более 250 научных работ, в том числе 6 монографий, 7 учебных пособий, 14 изобретений.

В 1972–1984 гг. И.Н. Пустынский был проректором ТИАСУРа по научной работе, с 1984 по 1999 г. – ректором.

При его участии в ТУСУРе были созданы первые в стране автоматизированный центр профориентации (1983) и научно-технологический парк – новая форма образования, науки, производства и предпринимательства (1990). Он являлся научным руководителем региональной межвузовской целевой комплексной научно-технической программы (НТП) Минвуза РСФСР «Автоматизация» и регионально-отраслевой НТП Минприбора СССР и Минвуза РСФСР «Контур-90» (1986–1990), выполненных на высоком научно-техническом уровне. В 1991–1992 гг. был руководителем республиканской научной программы «Высшая школа России» по разделу «Создание научно-технических парков и полисов», в 1993–2002 гг. – председателем Головного совета Минобразования РФ по научному направлению «Автоматизированные системы, средства автоматизации и вычислительная техника», координировавшего деятельность около 50 вузов России, а в 1998–2002 гг. – руководителем научного проекта Международной программы «Эврика».

За время работы И.Н. Пустынского на посту проректора и ректора число докторов наук в ТУСУРе выросло с 4 до 46, кандидатов наук – 105 до 201, объёмы НИР к 1962 г. увеличились почти в 9 раз и достигли 17,4 млн руб., в 1987 г. институт получил статус ведущего вуза СССР. В сложные 90-е гг. команда И.Н. Пустынского смогла предотвратить развал вуза, сохранить основные кадры, найти новые «точки роста» университета, активизировать международную деятельность.

Основная область его научных исследований была связана с телевизионно-вычислительной автоматикой. Он один из первых в стране разработал теорию и методику расчёта транзисторных видеоусилителей. Это позволило создать самые малогабаритные в мире промышленные телевизионные установки, новый класс приборов, обеспечивающих возможность просмотра ранее «недоступных» мест в атомных реакторах, подземных выработках, скважинах, самолётах и других конструкциях, и осуществлять измерения необходимых параметров обнаруживаемых объектов. Опубликованные им работы по транзисторным видеоусилителям сыграли заметную роль в деле подготовки инженерных и научных кадров по транзисторной схемотехнике, проектированию и созданию различных приборов и устройств. В 1969 г. под его руководством была разработана и сдана в эксплуатацию первая в стране замкнутая система учебного телевидения с обратной связью, опыт по созданию которой использован во многих вузах страны. В 1970–1980-х гг. им впервые в мировой практике выполнены исследования и разработана теория по оптимизации основных параметров телевизионно-вычислительных измерительных систем с одновременным учётом низкочастотных и высокочастотных шумов видеотракта, а также с учётом нестационарности шума телевизионных датчиков. Это позволило заложить основы теории оптимальной нелинейной фильтрации телевизионного измерительного сигнала. Результаты исследований дали возможность существенно повысить чувствительность и точность измерений координат световых объектов в системах различного назначения, в том числе в системах астроориентации, наведения, сопровождения, технического зрения роботов и системах соответствующих стендов. Они использованы при построении телевизионных измерительных систем ориентации первых космических кораблей типа «Союз» и оптико-электронного комплекса контроля космического пространства «Окно», отмеченного Президентской государственной премией в области науки и технологии 2004 г.

И.Н. Пустынский вёл активную педагогическую деятельность, читал лекции, руководил студентами, аспирантами и докторантами, им были подготовлены 44 кандидата и 5 докторов наук. По его инициативе на кафедре была организована подготовка специалистов по новым специальностям: «Бытовая радиоэлектронная аппаратура» (1995), «Аудиовизуальная техника» (1997), «Сервис» (2001) и «Антикризисное управление» (1999), а с 2011 г. – бакалавров по направлениям: «Сервис», «Менеджмент» (профиль «Информационный менеджмент»), «Радиотехника» (профиль «Аудиовизуальная техника»), «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль «Цифровое телерадиовещание»).

Более 25 лет являлся председателем докторского диссертационного совета.

И.Н. Пустынский – заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1990), почётный доктор и заслуженный профессор ТУСУРа, награждён орденами «Знак почёта» (1974, 1986), «Почёта» (2000) и медалями «За трудовую доблесть» (1982), «За заслуги перед ТУСУРом», знаком отличия «За заслуги перед Томской областью» (2012) и многочисленными ведомственными наградами и знаками отличия. Лауреат Премий Томской области в сфере образования и науки (1996, 1999, 2000). И.Н. Пустынский был действительным членом Академии инженерных наук РФ им. А.М. Прохорова, действительным членом и вице-президентом Международной академии наук высшей школы.

М.И. Курячий, к.т.н., с.н.с., профессор каф. ТУ ТУСУРа

Требования к подготовке рукописей статей,

для публикации в журнале

«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»

1. Электронный вариант статьи должен быть передан в редакцию в виде файла в формате Word 2003–2016, названного по-русски фамилией первого автора, через сайт https://journal.tusur.ru или по электронной почте в адрес, указанный на этом сайте.

2. Оригинал статьи в формате .pdf с подписями авторов должен полностью соответствовать Word-варианту.

3. Статья должна иметь (в порядке следования): УДК; И.О. Фамилии авторов; заглавие; аннотация (не реферат); ключевые слова; основной текст статьи; список библиографий под подзаголовком «Литература»; сведения об авторах; далее на английском языке: Фамилии авторов И.О., заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова. Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, электронный адрес.

4. Текст статьи должен быть размещен в две колонки без принудительных переносов через один интервал шрифтом Times New Roman 10 кегля на одной стороне листа белой писчей бумаги формата А4, без помарок и вставок. Для облегчения форматирования прилагается **шаблон статьи**, который размещен на сайте: **journal.tusur.ru.** Размер статьи со всеми атрибутами должен быть, как правило, не более пяти страниц.

5. Одни и те же символы в тексте, формулах, таблицах и рисунках должны быть единообразными по написанию. Русские буквы и греческие символы набираются прямым шрифтом, а переменные, обозначенные латинскими – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул.

6. Формулы должны быть набраны в формульном редакторе (MathType) программы Word. Русские буквы, греческие символы, математические знаки (+, –, ×, ∈, =, скобки, …) и цифры всегда набираются прямым не жирным шрифтом, а переменные (и кривые на графиках), обозначенные латинскими буквами или цифрами – курсивом, кроме англ. слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул (const, input; $\sin x(t_1)$; U_{in}; $I_{\text{вх}}$; T_z; β_2; H_2O, Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) – $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{M}(f)$, $\boldsymbol{\beta}_x$. 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 (*x*, ГГц; 20 ГГц; *T*, град; 7 °С). 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 – также, 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, сгруп-пированными. Графики – линиями разных начертаний, не жирно, четко. Единицы измерения – на русском. 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 размер надписей – 9 пт).

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 содержать всю необходимую для идентификации источника информацию и соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и Р 7.0.5–2008, а именно: *для непериодических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; *для периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Рекомендуется чтобы не менее 50% публикаций, на которые есть ссылки в статье, были за последний 5-летний период.

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 редакции: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
МК, каб. 310/2, тел. +7 (382-2) 70-15-82 (редакция),
51-21-21 (отв. секретарь: В.Н. Масленников)
Эл. почта: journal@tusur.ru

9 771818 044708 02007



9 771818 044708 02007