

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Доклады ТУСУР. 2024 • Том 27, № 3

ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2024 • Том 27, № 3



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2024, том 27, № 3**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Редакционная коллегия

В.М. Рулевский, д.т.н., доцент, ректор ТУСУРа, научный руководитель направления НИИ АЭМ ТУСУРа, Томск (*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. Маслеников, 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 ЭнСВЧЭ, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, заслуженный изобретатель России, Красноярск.

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

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

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

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, почётный работник науки и техники РФ, почётный работник электронной промышленности, Мытищи, Московская обл.

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

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 «Синописис Армения», Ереван, Республика Армения, заслуженный деятель науки Республики Армения, Армения, Ереван, <https://orcid.org/0000-0002-1667-6860>.

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

Е.М. Окс, д.т.н., проф., зав. каф. физики, ТУСУР, 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 28.11.2024. Выход в свет 13.12.2024. Формат 60×84 1/8. Печ. л. 8,8. Тираж 500. Заказ 11. 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 (Krasnoyarsk), 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

Тисленко В.И. Квазиоптимальный адаптивный алгоритм фильтрации координат подвижного источника радиоизлучения при однопозиционном пассивном пеленговании на морских загоризонтных трассах	7
Черкашин М.В. Визуальное проектирование малошумящего усилителя Ku-диапазона на основе отечественной 0,5 мкм GaAs-pHEMT-технологии	17
Юнусов И.В., Арыков В.С., Степаненко М.В., Жук Г.Г., Аргунов Д.П., Шейнбергер А.А. Сверхширокополосный электрооптический модулятор с интегрированным источником излучения	25
Комнатнов М.Е. Методика оценки уровня излучаемой помехоэмиссии интегральной схемы в ТЕМ-камере при температурном воздействии	30
Плёткин А.П. Экспериментальная синхронизация системы квантовой связи	37
Подлиннов С.А., Фатеев А.В., Растрьгин Д.С. Экстракция результатов измерения комплексного коэффициента отражения радиопоглощающего материала фильтром с переменной полосой пропускания	42
Гордеева В.О., Белоусов А.О. Оптимизация конструкции модального фильтра при распространении сверхкоротких импульсов с двух направлений	48
Зима Е., Газизов Р.Р. Модальное резервирование: современное состояние	55

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Кривин Н.Н., Понамарев Д.Е., Шипуля М.А. Численное моделирование эффекта резонансного поглощения электромагнитных волн в среде со спиральной симметрией	73
Кочергин М.И. Компенсация амплитудно-временной погрешности в дискретно-непрерывных компонентных моделях на основе задачи обратной интерполяции	79
Теплюк П.А., Якунин А.Г. Методика фазинга системных вызовов ядра Linux с применением больших языковых моделей	85
Ван С., Елисеев В.Л. Методика повышения качества нейросетевого моделирования динамических объектов	92
Грибанова Е.Б., Леонов Д.В. Разработка моделей условной оптимизации с использованием экспертных оценок	100
Кузнецов А.М. Информационная технология автоматизации социологических исследований: методы, технологии и преимущества	109
Афанасьева Н.С., Ложников П.С. Наборы данных, используемые для определения ботов на основании движения компьютерной мыши	118
Mekecha B.B., Gorbатов A.V. Crop yield prediction in Ethiopia using gradient boosting regression	125

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Авдзейко В.И., Дроздова А.А., Рулевский В.М., Ляпунов Д.Ю. Анализ способов формирования дискретных зон в конверторах с многозонным регулированием выходных параметров	133
Требования	140

Contents
ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Tislenko V.I. Quasi-optimal adaptive algorithm for filtering the coordinates of a moving source of radio emission during single-position passive direction finding on sea over-the-horizon paths	7
Cherkashin M.V. Visual design of Ku-band linear amplifier based on Russian 0.5 um GaAs-pHEMT-technology	17
Yunusov I.V., Arykov V.S., Stepanenko M.V., Zhuk G.G., Argunov D.P., Sheinberger A.A. Ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser	25
Komnatnov M.E. Technique for estimating the radiated emission of an integrated circuit in a TEM-cell under temperature exposure ...	30
Pljonkin A.P. Experimental Synchronization of a Quantum Communication System	37
Podlinnov S.A., Fateev A.V., Rastrygin D.S. Extraction of measurement results for the complex reflectivity of a radio-absorbing material using a filter with a variable bandpass	42
Gordeyeva V.O., Belousov A.O. Optimization of modal filter design for ultrashort pulses propagation from two directions	48
Zima Y., Gazizov R.R. Modal reservation: state of the art	55

CONTROL, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Krivin N.N., Ponamarev D.E., Shipulia M.A. Numerical simulation of the electromagnetic waves resonant absorption effect in a medium with spiral symmetry ...	73
Kochergin M.I. Compensation of amplitude-time error in discrete-continuous component models based on the inverse interpolation problem	79
Teplyuk P.A., Yakunin A.G. Methodology for fuzzing Linux kernel system calls using large language models	85
Wang X., Eliseev V.L. Methodology to improve the quality of neural network modeling of dynamic objects	92
Gribanova E.B., Leonov D.V. Development of conditional optimization models taking into account weighting factors of relative importance	100
Kuznetsov A.M. Information technology for automation of sociological research: methods, technologies and advantages	109
Afanaseva N.S., Lozhnikov P.S. Datasets for bot detection using mouse behavior	118
Mekecha B.B., Gorbatov A.V. Crop yield prediction in Ethiopia using gradient boosting regression	125

ELECTRICAL ENGINEERING

Avdzeiko V.I., Drozdova A.A., Rulevskiy V.M., Lyapunov D.Yu. Analysis of methods to form discrete zone in converters with multi-zone control of output parameters	133
Manuscript requirements	140

**ЭЛЕКТРОНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 621.396.96

В.И. Тисленко

Квазиоптимальный адаптивный алгоритм фильтрации координат подвижного источника радиоизлучения при однопозиционном пеленговании на морских загоризонтных трассах

Приведено экспериментальное обоснование статистической модели пассивных угломерных измерений в условиях приема сигналов УКВ подвижного источника радиоизлучения на загоризонтных морских трассах протяженностью до 300–500 км. Показано, что последовательность отсчетов пеленга на источник, работающий в режиме сканирования диаграммы направленности антенны, является неравноточной. Она случайно «засорена» аномальными ошибками. Для предложенной модели на основе известного в марковской теории нелинейной фильтрации принципа разделения представлен многоканальный адаптивный к неизвестным скорости и курсу движения объекта алгоритм оценки текущих координат и параметров движения источника излучения. Показана работоспособность алгоритма с учетом случайной «засоренности» оценок текущего пеленга аномальными ошибками при наличии случайных пропусков, получены оценки для относительной среднеквадратической ошибки текущей дальности.

Ключевые слова: пассивный пеленгатор, загоризонтный прием, оценка координат, аномальные ошибки, адаптивный алгоритм, оценка координат и параметров движения.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-7-16

Пассивные радиоэлектронные комплексы (ПРЭК) являются основой эффективной организации и ведения действий кораблей и соединений на море. Задачи совершенствования этих средств в плане улучшения их тактико-технических характеристик и, прежде всего, оперативности, точности определения координат и дальности действия представляют интерес для специалистов по разработке этого типа радиосистем [1].

Распространение электромагнитного излучения с длиной волны $\lambda = (3-70)$ см за радиогоризонт существенно расширяет возможности корабельных ПРЭК обзора надводной обстановки и целеуказания. Энергетические характеристики современных РЛС и ПРЭК в диапазоне УКВ позволяют обнаружить источники радиоизлучения (ИРИ) на дальности до 300–450 км, а в ряде случаев и более [2, 3]. Физические процессы, происходящие при распространении радиоволн (РРВ) на морских трассах, характеризуются тем, что электрические параметры тропосферы (диэлектрическая проницаемость, индекс коэффициента преломления) являются случайными функциями пространственных координат и времени. Это приводит к пространственно-частотно-временным случайным искажениям параметров электромагнитного поля в месте расположения корабля – носителя ПРЭК [2, 4]. Вследствие многолучевого характера РРВ разрушается пространственно-временная когерентность поля. В угломерных системах амплитудного и фазового типов возникает внешняя, обусловленная трассой погрешность при измерении координат ИРИ и параметров их движения. В современных ПРЭК ее величина является определяющей [5].

Достижение максимальной точности и оперативности решения задачи пассивного целеуказания возможно на основе оптимизации и адаптации алгоритмов оценки координат с учетом статистических

свойств сигналов, зависящих от состояния канала РРВ. Применение современной цифровой техники позволяет реализовать сложные в вычислительном отношении алгоритмы обработки данных, основанные, в частности, на марковской теории нелинейной фильтрации [6–8].

В работе показано, что последовательность монопольных оценок пеленга, формируемая пассивным угломером при приеме сигналов подвижного ИРИ, работающего в режиме сканирования диаграммы направленности антенны (ДНА), является статистически неоднородной даже на интервалах нескольких периодов сканирования ДНА ИРИ. Она состоит из условно нормальных (точных) и аномальных («грубых») оценок пеленга, следующих в случайном порядке. Предложена статистическая модель последовательности случайно «засоренных» наблюдений пеленга и выполнен синтез квазиоптимального алгоритма оценки координат и параметров движения подвижного ИРИ для пассивной однопозиционной угломерной системы. Показана работоспособность алгоритма.

Экспериментальное обоснование статистической модели наблюдений пеленга

В ТУСУРе в период с 1970 по 1990 г. проводились экспериментальные исследования статистических характеристик вариаций параметров поля в месте приема в различных районах Тихого океана и Черного моря на трассах протяженностью до 500 км [2, 3].

На рис. 1 показан гиростабилизированный пост с антенной системой, который был установлен на научно-исследовательском судне «Академик Ширшов». Экспериментальная приемная система использовалась для изучения статистических характеристик амплитуд и фаз импульсных сигналов при приеме сигналов береговых РЛС в см диапазоне волн на дальностях до 500 км.

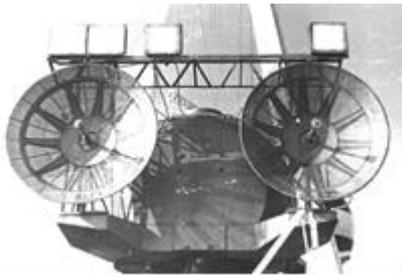


Рис. 1. Антенная система экспериментальной приемной установки

Экспериментальные величины временных интервалов корреляции быстрых вариаций амплитуд, фаз сигналов и угловых ошибок в минутных интервалах наблюдений составляют: (0,08–0,3) с для $\lambda = 3$ см; (0,2–0,7) с для $\lambda = 10$ см; (1–5) с для $\lambda = 35$ –50 см и (3–10) с для $\lambda = 150$ –200 см [2, 3].

Экспериментально показано [2], что интенсивность вариаций параметров поля в месте приема зависит от ориентации оси ДНА ИРИ относительно линии «приемник – излучатель». Физическая причина этого явления связана, в частности, с угловым смещением центра тропосферного объема рассеяния при отвороте максимума ДНА ИРИ от линии визирования. При этом уменьшается величина параметра когерентности (отношение уровней регулярной и случайной компонент поля в месте приема). При этом возникает угловая расстройка, равная разности среднего угла прихода рассеянной компоненты поля и прямой (регулярной) [2].

В итоге при приеме излучения РЛС со сканирующей ДНА разность фаз импульсных сигналов на выходе разнесенных поперек трассы приемных антенн изменяется в течение времени облучения [5, 9].

Таким образом, можно допустить, что в реальных условиях работы ПРЭК последовательные моноимпульсные оценки пеленга, формируемые угломерной системой, оказываются не равноточными.

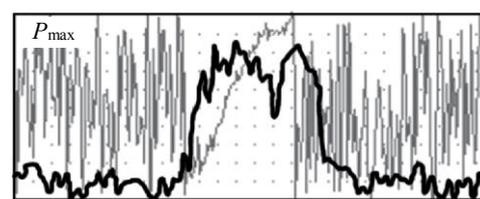
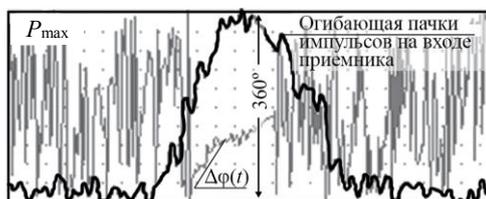


Рис. 3. Огибающие моноимпульсных вариаций уровня сигнала (черная линия) и разности фаз сигналов (серая линия) на интервале времени облучения – «мгновенные диаграммы»

Для проверки нуль-гипотезы о случайной «зазорности» выборочных значений разности фаз $\Delta\varphi_m$ совокупность пачек и, соответственно, значений $\Delta\varphi_m$ была разбита на два класса (группы). В первый класс были отнесены измерения $\Delta\varphi_{m1}$, принадлежащие тем пачкам, в которых на интервале времени облучения при линейной аппроксимации вариаций $\Delta\varphi(t)$ модуль скорости изменения разности фаз $|\Delta\dot{\varphi}| \leq 2$ (град/мс). Во второй класс – все остальные. Критерий разделения множества наблю-

Они принадлежат разным генеральным множествам даже на коротких интервалах времени. Достоверность этого утверждения показана в следующем эксперименте.

На рис. 2 приведена 2-часовая запись моноимпульсных отсчетов разности фаз $\Delta\varphi_m(t)$ сигналов на выходе, разнесенных по пространству на 2,92 м параболических антенн (см. рис. 1). Разность фаз $\Delta\varphi_m$ сигналов фиксировалась вблизи максимума огибающей пачки импульсов, принятых за время облучения. Запись получена при движении носителя со скоростью 14–15 узлов. Сеанс измерений проведен 14 августа 1982 г. по РЛС ($\lambda = 10$ см), период сканирования ДНА $\Delta T = 10$ с, расположенной в г. Йокосука (Япония), на дальности $D = 450$ км.

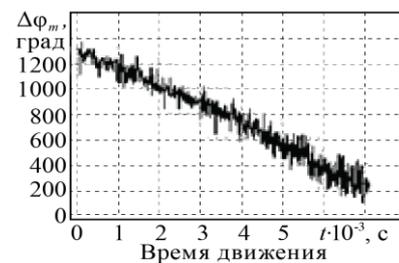


Рис. 2. Вариации разности фаз $\Delta\varphi_m(t)$

В сеансе измерений фазометр фиксировал изменение разности фаз $\Delta\varphi_m$ по каждому импульсу в пачке. Для обработки был выбран интервал из 335 отсчетов, в пределах которого корабельные надстройки не затеняли приемные антенны. На рис. 3 показаны осциллограммы «мгновенных диаграмм» моноимпульсных изменений уровня и разности фаз при приеме сигналов ИРИ со сканирующей ДНА. Видно, что моноимпульсные отсчеты разности фаз $\Delta\varphi(t)$ имеют линейный тренд в пределах главного лепестка ДНА ИРИ. При этом вертикальный размер графиков соответствует 360° по разности фаз.

дений на два класса в определенной мере произволен.

На рис. 4 показана гистограмма распределения вероятностей $P(\Delta\dot{\varphi})$ величины производной $\Delta\dot{\varphi}$.

На рис. 5 показаны гистограммы условных распределений вероятности $P(\Delta\varphi_m)$ (%) величин $\Delta\varphi_{m1}$ и $\Delta\varphi_{m2}$ для двух классов (слева первый класс). Сплошной линией показаны кривые, соответствующие гауссовским ПРВ. Оценка стандартного отклонения $\sigma_{\Delta\varphi}$ составила: для первого класса –

33° ($N_1 = 73$ отсчета), для второго – 53° ($N_2 = 262$ отсчета).

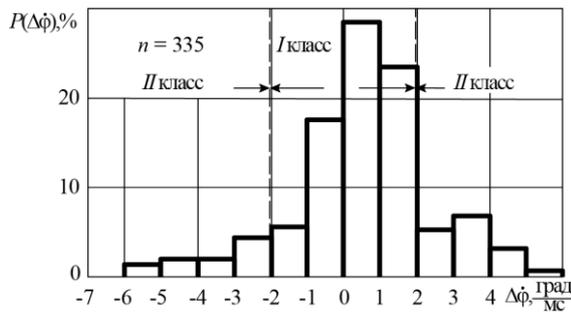


Рис. 4. Гистограмма распределения вероятностей $P(\Delta\varphi)$ вариаций $\Delta\varphi(t)$ в сеансе из 335 отсчетов

Проверка нуль-гипотезы о принадлежности двух выборок одной генеральной совокупности выполнялась с помощью непараметрического критерия

Зигеля–Тьюки [10]. В отличие от обычно используемого в таких случаях F-критерия данный критерий обладает меньшей чувствительностью к отклонениям от нормального распределения. Расчет статистики критерия предполагает упорядочение по рангам объединенной выборки из $(N_1+N_2) = 335$ отсчетов. При этом наименьшее значение получает ранг 1, два наибольших значения получают ранги 2 и 3, ранги 4 и 5 получают следующие наименьшие значения, 6 и 7 – следующие наибольшие и т.д.

Затем для каждой выборки были определены суммы ранговых чисел R_1 (сумма рангов меньшей выборки) и R_2 : $R_1 = 14597$ и $R_2 = 41683$. В качестве статистики критерия принимается величина [10]

$$z = z_0 + (1/10N_1 - 1/10N_2)(z_0^3 - 3z_0),$$

где $z_0 = \frac{2R_1 - N_1(N_1 + N_2 + 1) + 1}{\sqrt{N_1(N_1 + N_2 + 1)(N_2/3)}}$.

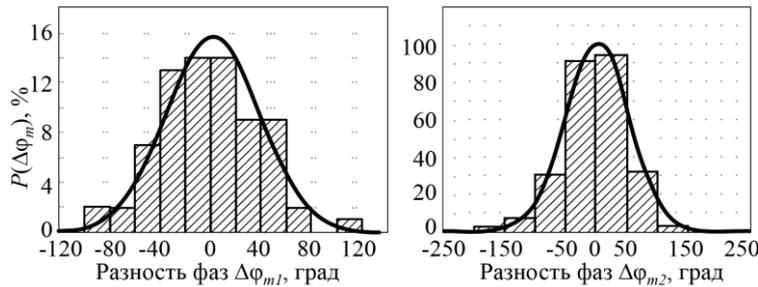


Рис. 5. Гистограммы условных распределений вероятностей $P(\Delta\varphi_m)$ для двух классов

Вычисляя, получаем $z_0 = 2945$ и $z = 2,961$. Статистика критерия при справедливости нуль-гипотезы имеет стандартное нормальное распределение [10]. Для доверительной вероятности $P_d = 0,95$ имеем пороговое значение статистики критерия $z_{п} = 1,65$ [10]. В итоге при 5% уровне значимости нуль-гипотеза отвергается, т.е. принимаем гипотезу о значимом различии дисперсий в двух классах. Аналогичные результаты получены еще в 2 сеансах (511 и 513); для них, соответственно, $z = 2,836$ и $z = 2,69$. Таким образом, можно полагать, что канал РРВ на интервале наблюдения «находится» в двух состояниях, которым можно условно сопоставить два значения дискретной случайной величины: +1 (для 1-го класса) и –1 (для 2-го класса). Дискретная последовательность $v(k)$ смены состояний канала показана на рис. 6. Уровень «засоренности» наблюдений аномальными отсчетами составил 78%.

Изучение корреляционных свойств случайного дискретного процесса $v(k)$ с двумя состояниями, соответствующими указанным выше классам, показало, что это процесс типа «белого шума». Действительно, при величине интервала пространственной корреляции быстрых вариаций амплитуд, фаз, моментов прихода сигналов и ошибок пеленгования в пределах $(10-100)\lambda$ этот пространственный интервал в диапазоне $\lambda = (3-35)$ см меньше, чем реальное

расстояние, которое проходит подвижный пеленгатор при скорости порядка 20 узлов за время периода сканирования ΔT ДНА ИРИ. В данном эксперименте это 10 с. Другими словами, есть и физические предпосылки считать дискретную последовательность $v(k)$ процессом типа «белого шума».

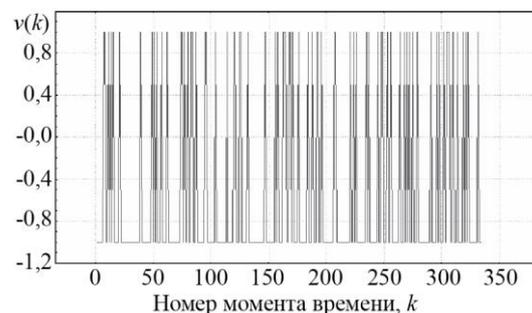


Рис. 6. Временная реализация дискретной последовательности $v(k)$

Математическая модель задачи фильтрации координат и параметров движения ИРИ со сканирующей ДНА

На рис. 7 на плоскости показано взаимное расположение носителя угломерной системы (сенсор S) и подвижного ИРИ (точка C). Рассмотрим задачу фильтрации координат одиночного ИРИ, скорость V_c и курс β_c движения которого неизвестны и по-

стоянны на интервале наблюдения порядка нескольких минут. Это допустимо для объектов с большим водоизмещением:

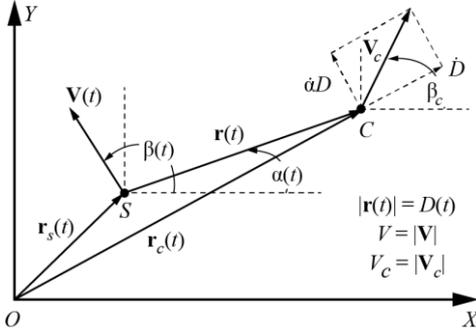


Рис. 7. Геометрия взаимного движения сенсора S (угломерная система) и ИРИ (точка C)

На рис. 7 $\mathbf{r}_s(t)$ и $\mathbf{r}_c(t)$ есть радиус-векторы подвижных объектов. Соответственно, вектор линии визирования ИРИ есть $\mathbf{r}_c(t) - \mathbf{r}_s(t) = \mathbf{r}(t)$ и его модуль $|\mathbf{r}(t)| = D(t)$ определяет текущую дальность.

С учетом изложенных выше свойств измерений пеленга на реальных морских трассах определим статистическую модель наблюдений моноимпульсного угломера при приеме сигналов ИРИ со сканирующей ДНА следующим соотношением:

$$z(k) = \gamma(k) [\alpha(k) + \nu(k) \cdot n(k)] \quad (1)$$

где k – дискретное время, кратное периоду сканирования ДНА ИРИ; $\gamma(k)$ – последовательность независимых случайных величин с двумя значениями: 0 (пропуск отсчета) и 1 (наличие отсчета); $\alpha(k)$ – текущий истинный пеленг; $n(k)$ – случайная гауссовская «белая» последовательность с математическим ожиданием и дисперсией, равными: $M[n(k)] = 0$, $M[n^2(k)] = 1$. Последовательность $\nu(k)$ независимых случайных величин, принимает два значения: σ_n – текущая оценка пеленга имеет нормальную величину среднеквадратической ошибки (СКО) и σ_a – отсчет является «грубым» – аномальным. Вероятность появления нормального отсчета p_n , аномального $p_a = (1 - p_n)$.

Следует отметить, что традиционно в алгоритмах фильтрации координат исключают значения текущих наблюдений (отметок) пеленга, которые значимо «отклоняются» от сопровождаемой траектории. Очевидно, что в условиях дефицита сигналов ИРИ, что характерно для условий работы ПРЭК, это ведет к потере данных и не является оптимальным.

В рамках марковской теории нелинейной фильтрации [11–13] при указанных выше ограничениях динамика взаимного перемещения сенсора и ИРИ определена заданием системы (2) нелинейных дифференциальных уравнений для вектора состояния $\mathbf{x}(t)$ с координатами $x_1(t) = D(t)$, $x_2(t) = \alpha(t)$. Введем

вектор управления $\mathbf{u}^T(t) = [V(t), \beta(t)]$ и вектор неизвестных параметров модели $\boldsymbol{\pi}$, состоящий из 3-х компонент: V_c , β_c и дальности $D(0)$. В скалярной форме уравнения для компонент вектора состояния имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &\triangleq \dot{D}(t) = V_c \cos(\alpha(t) - \beta_c) - \\ &- V(t) \cos(\alpha(t) - \beta(t)) = f_1[\mathbf{x}(t); \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\pi}]; \\ \dot{x}_2(t) &\triangleq \dot{\alpha}(t) = \frac{1}{D(t)} \times \\ &\times [V(t) \sin(\alpha(t) - \beta(t)) - V_c \sin(\alpha(t) - \beta_c)] = \\ &= f_2[\mathbf{x}(t); \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\pi}]. \end{aligned} \quad (2)$$

В дискретном времени, обозначив $x_k \equiv x(t_k)$, соотношениям (2) (при использовании алгоритма Эйлера) соответствует система нелинейных разностных уравнений вида

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{f}[\mathbf{x}_{k-1}; \mathbf{u}_{k-1}, \boldsymbol{\pi}] \cdot \Delta t, \quad \text{где } k = 1, \dots, N \quad (3)$$

со случайными (по ансамблю возможных траекторий взаимного расположения носителя и ИРИ) начальными условиями $\mathbf{x}_0^T = [D_0 \quad \alpha_0]$; интервал дискретизации $\Delta t = \Delta T$.

Статистические характеристики вектора \mathbf{x}_0 определены заданием математических ожиданий и дисперсий соответствующих компонент вектора. Уравнения (1), (3) определяют постановку задачи фильтрации текущих координат в рамках марковской теории нелинейной фильтрации [11–13]. Известно, что текущая байесовская оценка состояния $\hat{\mathbf{x}}_k$ по критерию минимума СКО определена в виде условного среднего по апостериорной плотности вероятностей (АПРВ) $W[\mathbf{x}_k / \mathbf{Z}_k, \boldsymbol{\pi}]$, где вектор $\mathbf{Z}_k = [z(1), \dots, z(k)]^T$.

При наличии случайных и постоянных во времени неизвестных параметров $\boldsymbol{\pi}$ применяют адаптивные алгоритмы [14, 15]. При этом возможны два подхода: расширение вектора состояния путем его пополнения вектором параметров $\boldsymbol{\pi}$ или построение алгоритма обработки на основе принципа разделения [14]. В работе используется этот последний вариант, и адаптивный алгоритм реализуется в виде условно оптимальных парциальных фильтров, «настроенных» на конечное (заданное) множество значений $\boldsymbol{\pi}_i \in \Omega_{\boldsymbol{\pi}}$; $i = 1, \dots, m$, где $\Omega_{\boldsymbol{\pi}}$ – непрерывное параметрическое множество.

Квазиоптимальный алгоритм фильтрации координат и параметров движения ИРИ со сканирующей ДНА

Решение задачи фильтрации координат и параметров движения ИРИ с использованием только угломерных данных изучается не в одном десятке работ, в частности [16–23]. Особенность ее в том, что она относится к классу задач для ненаблюдаемых динамических систем. Это структурное свойство системы и физически оно означает, что в общем

случае определить текущую дальность $D(k)$ до подвижного ИРИ из одного подвижного пункта при задании только угломерных данных невозможно. В [17, 21] этот вопрос рассмотрен строго, и определены требования к траектории измерителя. Показано, что носитель должен выполнять маневр – изменять свой вектор скорости на интервале наблюдения $(0; T)$, т. е. необходим режим работы с управлением наблюдениями.

Особенность задачи также в том, что она является нелинейной. В этом случае возможны квазиоптимальные решения [7, 11], поскольку точное решение не может быть определено. Решение задачи оценки координат подвижного ИРИ по угломерным данным с учетом особенностей приема сигналов ИРИ на загоризонтных трассах, т. е. при наличии случайных аномальных наблюдений и пропусков данных, в известных публикациях не представлено. Отметим также, что в большей части работ при наличии неизвестных параметров модели адаптив-

ная обработка предполагает расширение вектора состояния. При этом вектор неизвестных параметров содержит скорость и курс ИРИ и не содержит начальную дальность.

В работе решение задачи фильтрации выполняется в полярной системе координат, и структура фильтра следует из принципа разделения, используемого при построении адаптивных алгоритмов [14, 15]. Причем учитывается наличие пропусков и «засоренность» наблюдений пеленга аномальными ошибками, что характерно для условий работы ПРЭК на загоризонтных морских трассах.

Как отмечено выше, адаптивный фильтр содержит множество условно оптимальных парциальных каналов, настроенных на различные значения неизвестных параметров $\pi_i \in \Omega_\pi$; $i=1, \dots, m$, где Ω_π – множество априорных значений параметров и m – число каналов. Структура фильтра для скалярных наблюдений $z(k)$ показана на рис. 8.

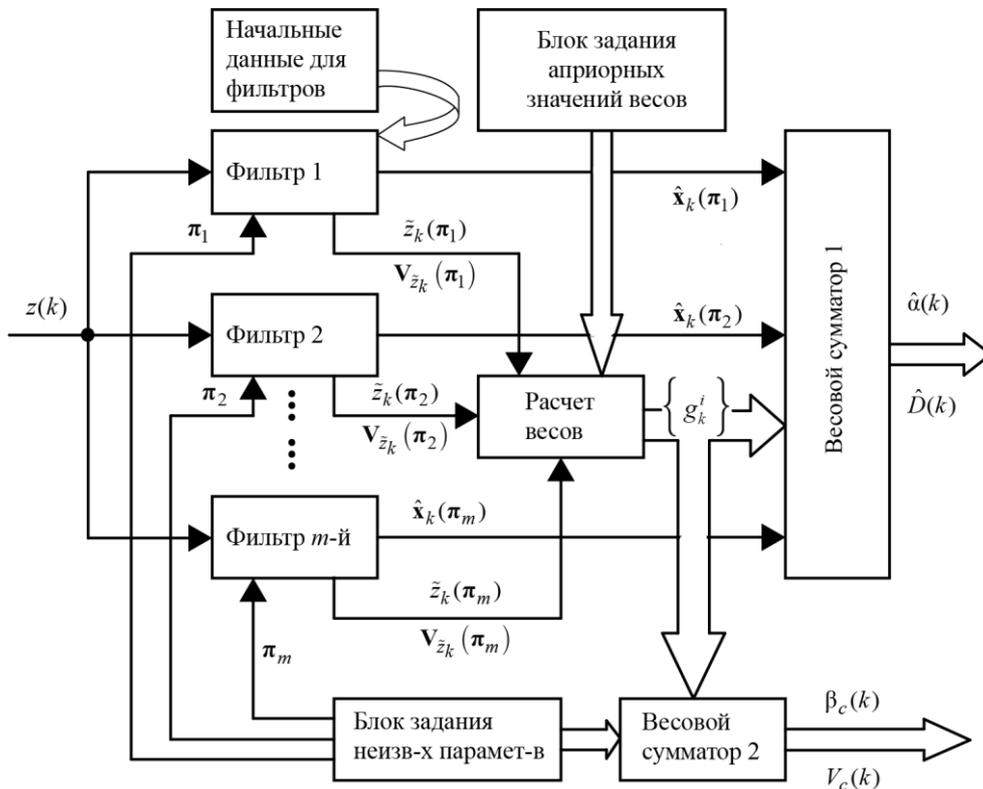


Рис. 8. Общая структура оптимального адаптивного фильтра

Поясним структуру фильтра и приведем основные соотношения, которые следуют из [14, 15]. В каждом i -м парциальном канале реализуется условная рекурсивная байесовская оценка $\hat{\mathbf{x}}_k(\pi_i)$ в виде условного среднего по АПРВ $W[\mathbf{x}_k / \mathbf{Z}_k, \pi]$. При этом предполагается, что АПРВ допускает гауссовскую аппроксимацию. Текущая оценка использует информацию, содержащуюся в векторе наблюдений $\mathbf{Z}_k = [z(1), \dots, z(k)]$.

В соответствии с правилами вычисления условных и совместных ПРВ для апостериорной АПРВ текущего состояния справедливо соотношение

$$W[\mathbf{x}_k / \mathbf{Z}_k] = \int_{\Omega_\pi} W[\mathbf{x}_k / \mathbf{Z}_k, \pi] \cdot W[\pi / \mathbf{Z}_k] d\pi. \quad (4)$$

Заменив несчетное множество Ω_π конечной совокупностью точек π_i , для АПРВ неизвестных параметров в формуле (4) справедливо представление в виде конечной суммы

$$W(\boldsymbol{\pi} / \mathbf{Z}_k) \approx \sum_{i=1}^m g_k^i \cdot \delta(\boldsymbol{\pi} - \boldsymbol{\pi}_i), \quad (5)$$

где $\delta(\boldsymbol{\pi} - \boldsymbol{\pi}_i)$ – дельта-функция; $g_k^i \triangleq P(\boldsymbol{\pi}_i / \mathbf{Z}_k)$ – апостериорная вероятность i -го значения параметров $\boldsymbol{\pi}_i$ на k -м шаге. Совокупность векторов $\{\boldsymbol{\pi}_i\}$, на которые «настроены» парциальные фильтры, формируется в блоке задания неизвестных параметров (см. рис. 8). Количество фильтров m зависит от уровня априорной параметрической неопределенности и возможных вычислительных ресурсов системы. Формирование текущих оценок состояния $\hat{\mathbf{x}}_k(\boldsymbol{\pi}_i)$, т.е. дальности $\hat{D}_i(k)$ и пеленга $\hat{\alpha}_i(k)$, выполнено в работе по схеме алгоритма расширенного фильтра Калмана (РФК) [11], который в силу предположения о гауссовости АПРВ реализует квазиоптимальную оценку состояния.

В итоге, согласно (4), (5), оценка состояния $\hat{\mathbf{x}}_k$ на выходе многоканального адаптивного фильтра определена как весовая сумма текущих оценок $\hat{\mathbf{x}}_k(\boldsymbol{\pi}_i)$, которые формируют парциальные фильтры, в виде

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{i=1}^m \hat{\mathbf{x}}_k(\boldsymbol{\pi}_i) \cdot g_k^i. \quad (6)$$

Ковариационная матрица оценки (6) определена соотношением [14]

$$\mathbf{V}_k = \sum_{i=1}^m \left[\mathbf{V}_k(\boldsymbol{\pi}_i) + (\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_k(\boldsymbol{\pi}_i))(\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_k(\boldsymbol{\pi}_i))^T \right] \cdot g_k^i, \quad (7)$$

где $\mathbf{V}_k(\boldsymbol{\pi}_i)$ – ковариационная матрица оценки состояния на выходе i -го парциального фильтра, которая вычисляется в соответствии с алгоритмом РФК [11].

Функция правдоподобия параметров для последовательности независимых наблюдений (1) имеет вид

$$W(\mathbf{Z}_k / \boldsymbol{\pi}_i) = \prod_{j=1}^k W(z_j / \boldsymbol{\pi}_i).$$

В этом случае на основе формулы Байеса с учетом (5) справедливо рекурсивное соотношение для расчета весовых коэффициентов [14]

$$P(\boldsymbol{\pi}_i / \mathbf{Z}_k) \equiv g_k^i = \frac{g_{k-1}^i \cdot W(z_k / \mathbf{Z}_{k-1}, \boldsymbol{\pi}_i)}{\sum_{i=1}^m g_{k-1}^i \cdot W(z_k / \mathbf{Z}_{k-1}, \boldsymbol{\pi}_i)}, \quad (8)$$

где $W(z_k / \mathbf{Z}_{k-1}, \boldsymbol{\pi}_i)$ – условная ПРВ текущего наблюдения z_k при заданном векторе \mathbf{Z}_{k-1} всех прошлых наблюдений до момента k . По существу, эта гауссовская ПРВ определена ПРВ ошибки (невязки) предсказания (9) наблюдений в условно оптимальном фильтре, который «настроен» на i -е значение вектора неизвестных параметров. Начальные значения g_0^i в (8) поступают из блока задания начальных весов (см. рис. 8). При этом возможен учет априорной информации о скорости, курсе ИРИ

и начальной дальности. В случае ее отсутствия коэффициенты $g_0^i = 1/m$.

Невязка $\tilde{z}_k(\boldsymbol{\pi}_i)$ в i -м фильтре

$$\tilde{z}_k(\boldsymbol{\pi}_i) = [z_k - \hat{z}_k^-(\boldsymbol{\pi}_i)] \triangleq q_k^i, \quad (9)$$

$$\hat{z}_k^-(\boldsymbol{\pi}_i) = \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}_k^-(\boldsymbol{\pi}_i),$$

где $\hat{z}_k^-(\boldsymbol{\pi}_i)$ – предсказание (экстраполяция на один шаг) текущего наблюдения в i -м фильтре; $\hat{\mathbf{x}}_k^-(\boldsymbol{\pi}_i)$ – оценка предсказания (на один шаг) состояния; матрица наблюдения $\mathbf{H} = [0 \ 1]$ определяет связь наблюдений (1) и вектора состояния (2).

В итоге оценка неизвестного вектора параметров $\boldsymbol{\pi}$ формируется на выходе сумматора 2 (см. рис. 8) как весовая сумма значений $\boldsymbol{\pi}_i$ с коэффициентами (8) в виде

$$\hat{\boldsymbol{\pi}}_k = \sum_{i=1}^m \boldsymbol{\pi}_i \cdot g_k^i. \quad (10)$$

Выше отмечено, что в данной работе в парциальных фильтрах реализуется квазиоптимальный алгоритм РФК. Он предполагает представление нелинейных функций в (2) в виде линейной части ряда Тейлора с вычислением производных в точке оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}_i(k-1)$ и последующим применением соотношений для традиционного линейного фильтра Калмана [5].

Кратко поясним, следуя [24], алгоритм обработки в каждом i -м из m фильтров, которые формируют оценки $\hat{\mathbf{x}}_i(k)$ с учетом наличия случайных аномальных ошибок и пропусков. Квазиоптимальный алгоритм получен в предположении, что для i -го фильтра условная плотность распределения вероятностей $W_i[\mathbf{x}(k) / z(1), \dots, z(k-1)]$ является гауссовской с вектором средних $\hat{\mathbf{x}}_i(k/k-1)$ и ковариационной матрицей $\mathbf{P}_i(k/k-1)$, которые вычисляются по соотношениям для РФК [11]. При этом текущая оценка вектора состояния на выходе i -го парциального фильтра определена соотношением

$$\hat{\mathbf{x}}_i(k) = \hat{\mathbf{x}}_i(k/k-1) + \{p_{ni}(k) \mathbf{K}_{ni}(k) + [1 - p_{ni}(k)] \mathbf{K}_{ai}(k)\} q_k^i, \quad (11)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_i(k/k-1)$ – экстраполированное на один шаг значение оценки вектора состояния; $\mathbf{K}_{ni}(k)$ и $\mathbf{K}_{ai}(k)$ – матричные коэффициенты усиления i -го парциального фильтра, которые вычисляются в предположении нормальной и аномальной вариаций ошибки в канале наблюдения; $p_{ni}(k)$ – расчетное значение вероятности того, что в k -й момент времени при заданном векторе наблюдений \mathbf{Z}_1^k текущее наблюдение пеленга (1) является нормальным; q_k^i – обновляющий процесс (9) («невязка» наблюдений) на k -м шаге в i -м фильтре.

Матрица ковариаций текущих оценок $\hat{\mathbf{x}}_i(k)$ на выходе i -го фильтра приводится к виду [24]

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_i(k/k) = & \mathbf{P}_i(k/k-1) - p_{ni}(k)\mathbf{K}_{i\Delta}(k)\mathbf{H}\mathbf{P}_i(k/k-1) + \\ & + p_{ni}(k) \times p_{ai}(k) \times (q_k^i)^2 \times \\ & \times \mathbf{K}_{i\Delta}(k)\mathbf{K}_{i\Delta}^T(k) - \mathbf{K}_{ai}(k)\mathbf{H}\mathbf{P}_i(k/k-1), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\mathbf{K}_{\Delta i}(k) = \mathbf{K}_{ni}(k) - \mathbf{K}_{ai}(k)$; $\mathbf{H} = [0 \ 1]$ – матрица наблюдений; $\mathbf{P}_i(k/k-1)$ – ковариационная матрица текущей экстраполированной оценки состояния в i -м фильтре.

Вероятность $p_{ni}(k)$, что текущий отсчет $z(k)$, возможно, является нормальным, вычисляется с учетом расчетных значений ПРВ невязок $W_a(q_k^i)$ и $W_n(q_k^i)$ в i -ом фильтре по формуле

$$p_{ni}(k) = p_n W_n(q_k^i) \left[p_n W_n(q_k^i) + p_a W_a(q_k^i) \right]^{-1}, \quad (13)$$

где $W_n(\bullet)$, $W_a(\bullet)$ – гауссовские ПРВ процесса невязки q_k^i (9) в предположении нормальной и аномальной величин СКО ошибок пеленга в последовательности наблюдений (1).

Результаты моделирования

Численное моделирование адаптивного алгоритма обработки выполнено методом прямого вероятностного моделирования при статистическом усреднении по ансамблю из 1 000 реализаций при следующих исходных данных. Число парциальных каналов по начальной дальности $m_D = 6$: $D_0 = (50-300)$ км с интервалом 50 км; по скорости $m_{V_c} = 4$: $V_c = (0-45)$ км/ч с интервалом 15 км/ч; по курсу цели $m_{\beta} = 8$ равномерно в полном секторе углов. Скорость носителя $V = 80$ км/ч, $\beta(0) = 0^\circ$, $\alpha(0) = 90^\circ$. Время наблюдения $T = 15$ мин, период поступления данных $\Delta T = 10$ с. С момента времени $k = 35$ в течение 15 тактов носитель выполняет маневр с изменением курса движения на 180° . Данный вид маневра близок к оптимальному, поскольку, согласно (1), обеспечивает наибольшую скорость изменения пеленга. На интервале выполнения маневра угловые данные не поступают. При этом в качестве текущих оценок состояния используются их экстраполированные значения. Все расчеты выполнены для СКО $\sigma_n = 1^\circ$. На графиках показаны зависимости величины $\delta(k) = (\sigma_{\hat{D}(k)} / D_k)$, %, которая определяет зависимость текущей относительной СКО (ОСКО) оценки дальности от дискретного времени k .

На рис. 9 для случая отсутствия пропусков и аномальных ошибок показаны две группы кривых: $A1, B1, C1$ и $A2, B2, C2$. Условия расчета для этих групп различаются только начальным значением курса носителя: для первой группы $\beta(0) = 180^\circ$, для второй – $\beta(0) = 0^\circ$. Скорость и курс движения ИРИ: $V_c = 40$ км/ч и $\beta_c = 180^\circ$. При расчете ОСКО дальности статистическое усреднение выполнялось как по

ансамблю ошибок пеленгования, так и по значениям истинной начальной дальности D_0 . Величина D_0 принимала равновероятные значения в заданных интервалах: $D_0 \in [50 \div 80)$ для кривых, обозначенных «А»; для кривых «В» – $D_0 \in [80 \div 150)$ и $D_0 \in [150 \div 200]$ – для кривых «С». Видно, что сходимость оценок происходит после начала движения носителя с противоположным курсом (на шаге $k = 50$). Для всех вариантов расчета $\delta(k) < 10\%$.

СКО нормального отсчета пеленга $\sigma_n = 1^\circ$, аномальные отсчеты (при их наличии) имеют СКО $\sigma_a = 2^\circ$ при уровне «засоренности» $p_a = 0,6$. Статистическое усреднение при моделировании выполнено по 1 000 реализациям случайных факторов.

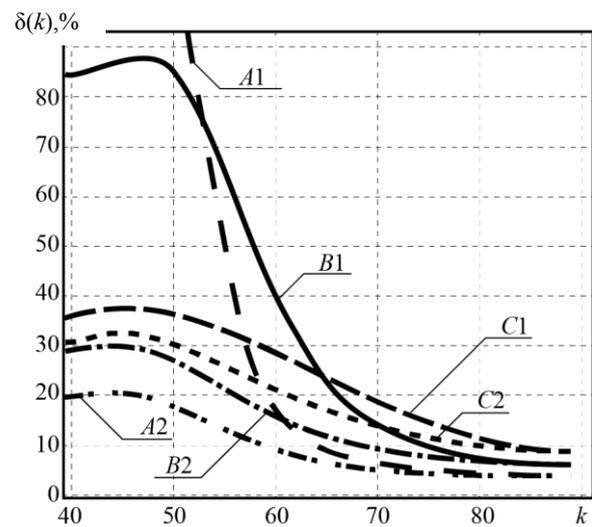


Рис. 9. Зависимость ОСКО оценки дальности от номера отсчета при отсутствии аномальных ошибок

Отметим, что установившееся значение ОСКО текущей дальности не зависит от начального значения курса носителя. Однако, если на первом галсе движение носителя и ИРИ выполняется в противоположных направлениях, то в переходном режиме работы алгоритма (на втором галсе) ОСКО дальности значительно меньше. При сравнении кривых $B1$ и $B2$ $D_0 \in [80 \div 150)$ при $k = 60$ (10-я минута), снижение ОСКО составляет 2,8 раза (с 40 до 15%).

Результаты, приведенные на рис. 10, показывают работу адаптивного алгоритма с прежней структурой фильтра. Для всех кривых на рис. 10 вероятность пропуска 15% и $D_0 \in (150; 200)$. Кривая 1 соответствует случаю отсутствия «засоренности» наблюдений. Для кривых 2–4 величина СКО $\sigma_a = 2^\circ$ и вероятность $p_a = 0,6$. При этом для кривой 2 расчет выполнен в предположении, что алгоритм ориентирован на обработку аномальных отсчетов; кривая 4 рассчитана в предположении, что алгоритм «не предполагает» наличие в наблюдениях аномальных отсчетов. Для всех кривых кроме 3-й, скорость и курс ИРИ: $V_c = 40$ км/ч и $\beta_c = 180^\circ$.

Кривая 3 рассчитана при усреднении по множеству значений $\beta_c \in [150^\circ; 210^\circ]$

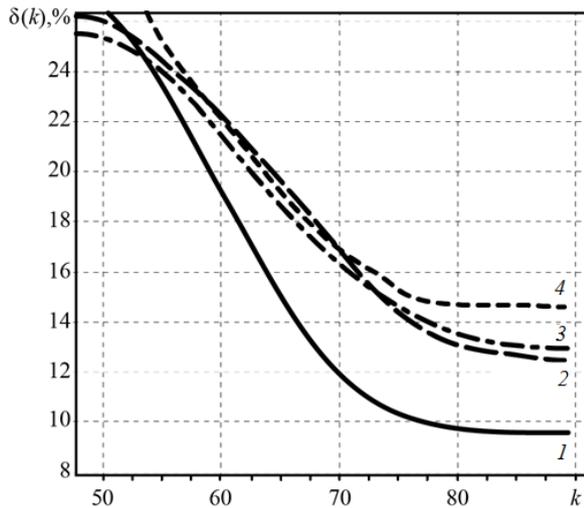


Рис. 10. Зависимость ОСКО оценки дальности от номера отсчета

Сравнение кривых 1 и 4 показывает, что наличие «засоренности» оценок пеленга с параметрами, указанными выше, увеличивает ОСКО дальности в 1,6 раза, если алгоритм не ориентирован на их обработку. Применение адаптивного алгоритма (кривая 2) дает увеличение ОСКО дальности в 1,38 раза. Таким образом, увеличение относительного значения ОСКО дальности при неучёте «засоренности» наблюдений составляет 16% (кривые 4 и 2 при $k = 90$). Следует отметить, что на более близких дистанциях, когда угломерные наблюдения более информативны, преимущество алгоритма, учитывающего наличие аномальных отсчетов, возрастает.

Расчеты, проведенные в более широком диапазоне значений исходных данных, показали, что относительный выигрыш адаптивного алгоритма фильтрации по ОСКО дальности достигает 25% даже при 30% «засоренности» наблюдений пеленга. При этом на дистанциях (50–80) км выигрыш более выражен, что обусловлено влиянием на больших дальностях иных факторов, в частности, погрешностей за счет ошибок по скорости и курсу ИРИ.

Заключение

Статистическая обработка данных эксперимента на морской загоризонтной трассе по измерению пеленга на ИРИ с борта подвижного пассивного угломера при приеме сигналов импульсной РЛС, работающей в режиме сканирования ДНА, подтверждает, что последовательность моноимпульсных отсчетов пеленга является неравноточной. Она может рассматриваться как некоррелированная последовательность случайно смешанных нормальных (точных) и аномальных (грубых) отсчетов оценок пеленга. В эксперименте уровень «засоренности» наблюдений составил 78% при соотношении СКО грубых и точных отсчетов $(\sigma_a / \sigma_n) = 1,6$.

Для условий работы пассивного угломера на морских загоризонтных трассах предложен и исследован

квазиоптимальный фильтр, который реализует фильтрацию текущих координат ИРИ с адаптацией к неизвестным параметрам его движения с учетом «засоренности» и пропуска наблюдений пеленга.

Показана работоспособность алгоритма. В условиях заданных параметров задачи наличие аномальных отсчетов с уровнем «засоренности» 60% при $(\sigma_a / \sigma_n) = 2$ приводит к увеличению ОСКО дальности в 1,6 раза, когда фильтр не ориентирован на наличие грубых отсчетов. Квазиоптимальный алгоритм, ориентированный на обработку «засоренных» наблюдений, дает увеличение ОСКО в 1,38 раза.

В случае возможности выбора курса носителя следует выполнять первый галс в направлении, противоположном направлению движения ИРИ. При этом в переходном режиме ОСКО дальности уменьшается. Установившееся значение ОСКО дальности не зависит от выбора начального курса носителя.

Автор выражает глубокую признательность своим коллегам по работе в НИИ РТС ТУСУРа, совместно с которыми выполнялись на протяжении многих лет трудоемкие экспериментальные исследования характеристик радиосигналов на морских полигонах и судах, а также студенту А. Чаусенко, усилиями которого было разработано программное обеспечение для моделирования алгоритмов на ЭВМ.

Литература

1. Интегрированные системы управления ракетным оружием корабля / Г.А. Коржавин, В.А. Никольцев, Ю.Ф. Подоплекин, И.В. Симановский, С.Н. Шаров; под ред. Г.В. Анцева // Проблемы интеллектуального и военного транспорта, ОАО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс». – СПб.: Логос, 2005. – Вып. № 6. – С. 294–300.
2. Шарыгин Г.С. Статистическая структура поля УКВ за горизонтом. – М.: Радио и связь, 1983. – 139 с.
3. Радиоклиматический тропосферный атлас Тихого океана / под ред. Г.С. Шарыгина. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2000. – 171 с.
4. Акулиничев Ю.П. Теория и методы диагностики многолучевости для повышения помехоустойчивости систем радиолокации и дистанционного зондирования тропосферы: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.2004 / ТУСУР. – Томск, 2002. – 298 с.
5. Бабушкин Л.Н. Адаптация систем пассивной радиолокации к условиям тропосферного распространения УКВ над морем. – Томск: Изд. ИОА СО РАН, 2004. – 240 с.
6. Тисленко В.И. Оптимальная фильтрация координат подвижных источников излучения в бортовой пассивной РЛС // Труды 2-й Всерос. НТК по проблемам создания перспективной авионики, 15–17 апреля 2003 г. – Томск: ТУСУР, 2003. – С. 277–281.
7. Логинов В.П. Приближенные алгоритмы нелинейной фильтрации. – Ч. I: Обзор // Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – № 2. – С. 28–48.
8. Гриценко Н.С. Адаптивное оценивание / Н.С. Гриценко, В.П. Логинов, К.К. Севостьянов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1983. – № 7, ч. I: Обзор. – С. 3–27.
9. Distortion of Patterns of Transmitting and Receiving Antennas over Beyond-the Horizon Paths / Yu.P. Akulinichev,

A.A. Mescheryakov, L.N. Babushkin, M.V. Krutikov, V.I. Tislenko // «Wave propagation and remote sensing». Proceedings of the 7th URSI Commission F. Open Symposium, 20–24 Nov. – Ahmedabad: India, 1995. – P. 137–142.

10. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем.; под ред. Ю.П. Адлера и В.Г. Горского. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.

11. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс: пер. с англ.; под ред. Б.Р. Левина. – М.: Связь, 1976. – 496 с.

12. Ярлыков М.С. Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1980. – 358 с.

13. Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.

14. Лайниотис Д.Г. Разделение – единый метод построения адаптивных систем // ТИИЭР. – 1976. – Т. 64, № 8. – С. 8–27.

15. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. – М.: Наука, 1980. – 401 с.

16. Lindgren A.G. Position and Velocity Estimation via Bearing Observations / A.G. Lindgren, K.F. Gong // IEEE Trans. On AES. – 1978. – Vol. 14, July. – P. 564–577.

17. Le Cadre J.P. Discrete-time Observability and Estimability Analysis for Bearings-Only Target Motion Analysis / J.P. Le Cadre, C. Jauffret // IEEE Trans. on AES. – 1997. – Vol. 33, No. 1. – P. 178–201.

18. Nardone S.C. Fundamental properties and performance of conventional bearing-only target motion analysis / S.C. Nardone, A.G. Lindgreen, K.F. Gong // IEEE Trans. on Autom. Control. – 1984. – Vol. 29, No. 9. – P. 775–787.

19. Farina A. Target tracking with bearings – Only measurements. Signal Processing // Elsevier. – 1999. – Vol. 78, No. 1. – P. 61–78.

20. Sindhu B. Bearing only Target Tracking using Single and Multisensor / B. Sindhu, J. Valarmathi, S. Christopher / Journal of Engineering Science and Technology. A Review. – 2019. – Vol. 12, No. 1. – P. 50–65.

21. Nardone S.C. Observability Criteria for Bearing – only Tracking / S.C. Nardone, V.J. Aidala // IEEE Trans. On AES. – 1981. – Vol. 17, No. 2. – P. 162–166.

22. Дрогалин В.В. Определение координат и параметров движения источников радиоизлучений по угломерным данным в однопозиционных бортовых радиолокационных системах / В.В. Дрогалин, П.И. Дудник, А.И. Канашенков // Зарубежная радиоэлектроника. – 2002. – № 3. – С. 64–94.

23. Spingarn K. Passive Position Location Estimation Using the Extended Kalman Filter // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1987. – Vol. AES-23. – P. 558–567.

24. Гришин Ю.П. Динамические системы, устойчивые к отказам / Ю.П. Гришин, Ю.М. Казаринов. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.

Тисленко Владимир Ильич

Д-р техн. наук, проф. каф. радиотехнических систем
Томского государственного университета

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

гл. науч. сотр. НИИ РТС ТУСУРа

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

ORCID: 0000-0001-8851-1873

Тел. +7 (382-2) 41-36-84

Эл. почта: wolar1491@yandex.ru

Tislenko V.I.

Quasi-optimal adaptive algorithm for filtering the coordinates of a moving source of radio emission during single-position passive direction finding on sea over-the-horizon paths

The work provides an experimental substantiation of the statistical model of passive bearing only measurements in conditions of receiving UHF signals from a mobile source of radio emission on over-the-horizon sea paths with a length of up to 300–500 km. It is shown that the sequence of bearing readings to a source operating in the scanning mode of the antenna pattern is unequally accurate. It is accidentally «clogged» with anomalous errors. For the proposed model, based on the separation principle known in the Markov theory of nonlinear filtering, a multi-channel algorithm for estimating the current coordinates and parameters of the radiation source's movement is presented, that is adaptive to the unknown speed and heading of the object's movement. The performance of the algorithm is shown taking into account the random contamination of current bearing estimates with anomalous errors in the presence of random omissions, and estimates for the relative mean square error of the current range are obtained.

Keywords: passive direction finder, over-the-horizon reception, coordinate estimation, anomalous errors, adaptive algorithm, estimation of coordinates and motion parameters.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-7-16

References

1. Korzhavin G.A., Nikoltsev V.A., Podoplekin Yu.F., Simanovsky I.V., Sharov S.N. Integrated ship missile control systems. *Problems of Intellectual and Military Transport*, vol. Ed. G.V. Antseva, OJSC Scientific and Production Enterprise Radar MMS. SP-b, Logos, 2005, No. 6, pp. 294–300. (In Russ.).

2. Sharygin G.S. *Statistical structure of the VHF field beyond the horizon*. Moscow, Radio and Communication, 1983, 139 p. (In Russ.).

3. *Radioclimatic tropospheric atlas of the Pacific Ocean*. Ed. G.S. Sharygin. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2000, 171 p. (In Russ.).

4. Akulinichev Yu.P. Theory and methods of multipath diagnostics for increasing the noise immunity of radar systems and remote sensing of the troposphere: Dissertation for Doctor of Science in Engineering title: 05.12.04. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2002, 298 p. (In Russ.).

5. Babushkin L.N. *Adaptation of passive radar systems to the conditions of tropospheric VHF propagation over the sea*. Tomsk, Ed. by V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2004, 240 p. (In Russ.).

6. Tislenko V.I. Optimal filtering of coordinates of moving radiation sources in an on-board passive radar // *Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific Conference. STC on the Problems of Creating Advanced Avionics, April 15–17, 2003*. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, pp. 277–281. (In Russ.).

7. Loginov V.P. Approximate nonlinear filtering algorithms. Part I (Review) // *Foreign Radio Electronics*, 1975, no. 2, pp. 28–48. (In Russ.).

8. Gritsenko N.S., Loginov V.P., Sevostyanov K.K. Adaptive assessment. Part I (Review) // *Foreign Radio Electronics*, 1983, no. 7, pp. 3–27. (In Russ.).

9. Akulinichev Yu. P., Mescheryakov A.A., Babushkin L.N., Krutikov M.V., Tislenko V.I. Distortion of Patterns of

Trans-mitting and Receiving Antennas over Beyond-the-Horizon Paths // «Wave propagation and remote sensing». *Proceedings of the 7th URSI Commission F. Open Symposium*. Ahmedabad, India, 20–24 Nov., 1995, pp. 137–142.

10. Zacks L. Statistical assessment. *Translated from German under the Editorship of Yu.P. Adler and V.G. Gorsky*. Moscow, Statistics, 1976, 598 p. (In Russ.).

11. Sage E., Mels J. *Estimation theory and its application in communications and management*. Translation from English edited by B.R. Levin. Moscow, Communication, 1976, 496 p. (In Russ.).

12. Yarlykov M.S. *Application of Markov theory of non-linear filtering in radio engineering*. Moscow, Soviet Radio, 1980, 358 p. (In Russ.).

13. Tikhonov V.I., Kharisov V.N. *Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems*. Moscow, Radio and Communications, 1991, 608 p. (In Russ.).

14. Lainiotis D.G. Division – a unified method for building adaptive systems. *TIEER*, 1976, vol. 64, no. 8, pp. 8–27.

15. Saridis J. *Self-organizing stochastic control systems*. Moscow, Nauka, 1980, 401 p. (In Russ.).

16. Lindgren A.G. Gong K.F. Position and Velocity Estimation via Bearing Observations // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1978, vol. 14, July, pp. 564–577.

17. Le Cadre J.P., Jauffret C. Discrete-time Observability and Estimability Analysis for Bearings-Only Target Motion Analysis. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1997, vol. 33, no. 1, pp. 178–201.

18. Nardone S.C., Lindgreen A.G. Gong K.F. Fundamental properties and performance of conventional bearing-only target motion analysis. *IEEE Transactions on Automated Control*, 1984, vol. 29, no. 9, pp. 775–787.

19. Farina A. Target tracking with bearings – Only measurements. *Signal Processing, Elsevier*, 1999, vol. 78, no. 1, pp. 61–78.

20. Sindhu B., Valarmathi J., Christopher S. Bearing only Target Tracking using Single and Multisensor: A Review. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 50–65.

21. Nardone S. C., Aidala V. J. Observability Criteria for Bearing – only Tracking. *Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981, vol. 17, no. 2, pp. 162–166.

22. Drogalin V.V., Dudnik P.I., Kanashchenkov A.I. Determination of coordinates and movement parameters of radio emission sources using angular data in single-position airborne radar systems. *Foreign Radio Electronics*, 2002, no. 3, pp. 64–94. (In Russ.).

23. Spingarn K. Passive Position Location Estimation Using the Extended Kalman Filter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, vol. AES-23, pp. 558–567.

24. Grishin Yu.P., Kazarinov Yu.M. *Dynamic systems that are resilient to failures*. Moscow, Radio and Communications, 1985. 176 p. (In Russ.).

Vladimir I. Tislenko

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department Radio Engineering Systems,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin prospect, Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-8851-1873
Phone: +7 (382-2) 41-36-84
Email: wolar1491@yandex.ru

Ответственный за техническое редактирование и внесение корректорской правки
в данной статье – В.Н. Масленников

УДК 621.375.4

М.В. Черкашин

Визуальное проектирование малошумящего усилителя Ku-диапазона на основе отечественной 0,5 мкм GaAs-pHEMT-технологии

Рассматривается проектирование монолитной интегральной схемы (МИС) малошумящего СВЧ-усилителя (МШУ) Ku-диапазона на основе применения алгоритмов, методов и программных средств визуального синтеза активных СВЧ-устройств. МИС МШУ выполнена на основе отечественной 0,5 мкм GaAs-pHEMT-технологии АО «Светлана-Рост».

Ключевые слова: малошумящий СВЧ-усилитель, load-pull-моделирование, визуальное проектирование, монолитная интегральная схема, GaAs, pHEMT.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-17-24

При построении современных радиоэлектронных систем различного назначения важнейшими элементами входного тракта являются приемопередающие модули (ППМ). Одним из главных функциональных узлов в составе ППМ является малошумящий усилитель (МШУ), параметры которого во многом определяют как характеристики ППМ, так и параметры всей системы в целом. Основные требования к МШУ в составе ППМ: малый коэффициент шума, достаточно большой коэффициент

усиления, небольшой потребляемый ток – являются противоречивыми и требуют от разработчика принятия компромиссных решений [1–3].

При этом одного усилительного каскада (активного элемента), как правило, недостаточно для достижения заданных параметров. Поэтому чаще всего интегральные МШУ состоят из нескольких каскадов усиления (обычно от 2 до 5 в зависимости от частотного диапазона). Типовая структурная схема многокаскадного МШУ представлена на рис. 1 [4, 5].

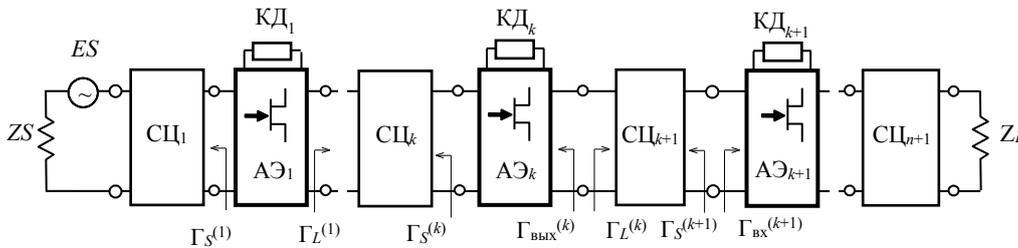


Рис. 1. Структурная схема многокаскадного усилителя

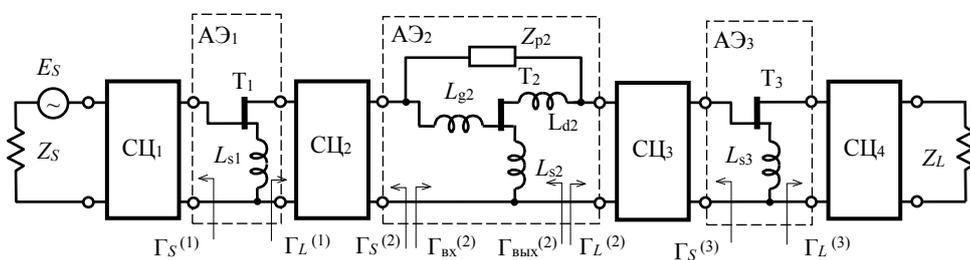


Рис. 2. Структурная схема трехкаскадного МШУ

Активный элемент (АЭ) представляет собой транзистор с цепями коррекции и смещения по постоянному току. Согласующие цепи (ЦЦ) между АЭ обычно выполняют задачу согласования импедансов транзисторов между собой и с трактом передачи сигнала, иногда на них также возлагают задачу выравнивания АЧХ МШУ, двухполюсные цепи коррекции и обратной связи (КД) служат для выравнивания АЧХ и увеличения устойчивости всего МШУ [4, 5].

Обычно при проектировании многокаскадных усилителей общие требования к характеристикам

МШУ разделяют на требования к каждому каскаду в отдельности с дальнейшим расчетом на основе типовых графоаналитических методов [1–3, 6] или численных процедур синтеза [4, 7, 8]. Такой подход сложен (особенно в случае широкой полосы рабочих частот), не разрешает учитывать взаимное влияние каскадов друг на друга, зачастую требует дополнительной параметрической оптимизации всей схемы устройства.

Существуют также методы и программные средства для автоматической генерации схемы СВЧ-

усилителей на основе применения генетических алгоритмов [7, 8]. Однако они хорошо работают при небольшом числе каскадов (обычно 1–2), не позволяют выполнить исследование характеристик устройства в процессе синтеза, не гарантируют получения схемы усилителя минимальной сложности и с наилучшими характеристиками.

Ускорить процесс проектирования, выполнить всесторонний анализ характеристик устройства, оценить предельные значения параметров, а также выполнить расчет МШУ по комплексу требований в полосе частот с учетом взаимного влияния каскадов друг на друга позволяют методика визуального проектирования [9] и комплекс программ Microwave Look [10, 11], разработанные на кафедре КСУП ТУСУРа. В нем реализованы процедуры визуального проектирования транзисторных СВЧ-усилителей с двухполюсными корректирующими (КЦ) и четырехполюсными согласующими (СЦ) цепями.

Процесс проектирования СВЧ-усилителя с КЦ и СЦ состоит из двух следующих этапов [12]:

1) расчет на выбранных частотах полосы пропускания областей допустимых значений (ОДЗ) иммитанса КЦ или коэффициента отражения СЦ, отвечающих заданным требованиям к характеристикам усилителя;

2) синтез (определение структуры и значений элементов) КЦ и СЦ по найденным ОДЗ [13]. В данной статье рассмотрим применение данной методики и программных средств для проектирования трехкаскадного интегрального МШУ Ku-диапазона, выполненного на основе отечественной 0,5 мкм GaAs-pHEMT-технологии АО «Светлана-Рост» [14].

Проектирование МШУ

Усилитель должен соответствовать требованиям, представленным в табл. 1.

Параметры транзисторов, которые используются в составе МШУ, представлены в табл. 2.

Таким образом, для получения заданного коэффициента усиления МШУ нам потребуется три каскада усиления.

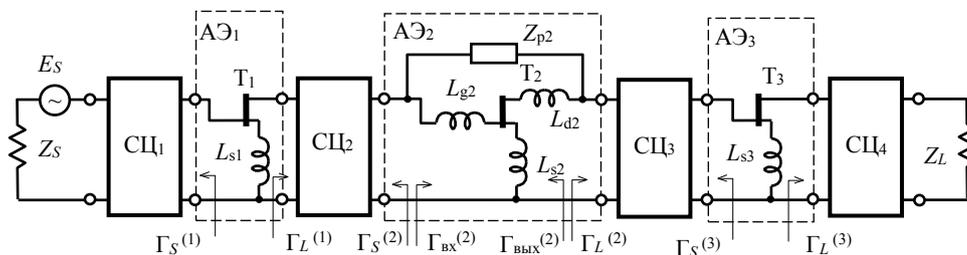


Рис. 2. Структурная схема трехкаскадного МШУ

Описание визуальной методики и программного комплекса на примере расчета двухкаскадного усилителя X-диапазона ранее было представлено в [15]. В данной статье ограничимся демонстрацией основных этапов проектирования и возможностей программ визуального синтеза.

Этап 1. Расчет входной СЦ1. Входная СЦ1 обеспечивает согласование входа усилителя по сиг-

Таблица 1

Требования к МШУ

Характеристика	Значение
Полоса рабочих частот Δf , ГГц	13...17
Коэффициент усиления G_T , дБ	Не менее 27,0
Неравномерность коэффициента усиления в полосе рабочих частот ΔG , дБ	$\pm 1,0$
Выходная мощность $P_{\text{вых1dB}}$, дБм	Не менее 15,0
Коэффициент отражения, дБ: по входу $m_1 = s_{11} $ по входу $m_2 = s_{22} $	Не более -10,0 Не более -10,0
Коэффициент шума NF , дБ	Не более 3,5
Напряжение питания V_D , В	4 ... 5
Потребляемый ток I_D , мА	Не более 100

Таблица 2

Параметры транзисторов T1–T3

Транзистор	Ширина затвора, W , мкм	$f = 17$ ГГц		f_T , ГГц	f_{max} , ГГц	I_D , мА	V_D , В
		G_A , дБ	F_{min} , дБ				
T1, T2	4x50	9	2,1	40	70	20	4
T3	6x50	8	2,3			40	4

Структурная схема МШУ показана на рис. 2. Первый каскад обеспечивает согласование входа усилителя с трактом передачи сигнала и заданный коэффициент шума, применение индуктивной обратной связи (ОС) в цепи истока T_1 (L_{S1}) позволяет сблизить условия согласования по сигналу и шуму [15]. Второй каскад на транзисторе T_2 охвачен цепью, параллельной ОС Z_{p2} , которая служит для выравнивая АЧХ и повышения устойчивости МШУ. Третий каскад на транзисторе T_3 обеспечивает согласование выхода усилителя и заданную выходную мощность. Индуктивности выводов транзисторов T_2 и T_3 являются элементами дополнительной ВЧ-коррекции и выбираются в процессе синтеза. Кроме того, в составе усилителя для выравнивания АЧХ и согласования входа и выхода транзисторов между собой и с трактом передачи сигнала используются согласующие цепи СЦ1–СЦ4 [9].

Для синтеза входной СЦ1 с помощью программы REION [10, 12, 13] на частотах 13, 15 и 17 ГГц были построены ОДЗ на плоскости коэффициента отражения $\Gamma_S^{(1)}$, которые отвечают следующим ограничениям на характеристики усилительного каскада: $7,0 \text{ дБ} < G^{(1)} < 10,0 \text{ дБ}$; $m_1^{(1)} < 0,33$; $m_2^{(1)} < 0,7$; $NF^{(1)} < 3,0 \text{ дБ}$. Также были построены допустимые области на частотах 0,01; 1 и 20 ГГц,

которые отвечают ограничениям $m_1^{(1)} < 1$ и $m_2^{(1)} < 1$ для контроля устойчивости каскада за полосой пропускания (рис. 3). При этом в процессе расчета ОДЗ в интерактивном режиме была выбрана величина индуктивности ОС $L_{s1} = 0,05$ нГн, которая соответствует максимально большому размеру допустимых областей в полосе рабочих частот.

Далее с помощью программы LOCUS [13, 15] по полученным областям устойчивости и ОДЗ была рассчитана СЦ₁, точки годографа $\Gamma_S^{(1)}(f)$ которой на выбранных частотах попадают внутрь соответствующих областей. При этом структура СЦ₁ была выбрана с учетом возможности подачи напряжения смещения на затвор транзистора Т₁. Схема СЦ₁ и ее годограф $\Gamma_S^{(1)}(f)$ показаны на рис. 3.

Моделирование показало, что в рабочем диапазоне частот АЧХ первого каскада усилителя с подключенной ко входу СЦ₁ имеет спад около 6 дБ/октаву.

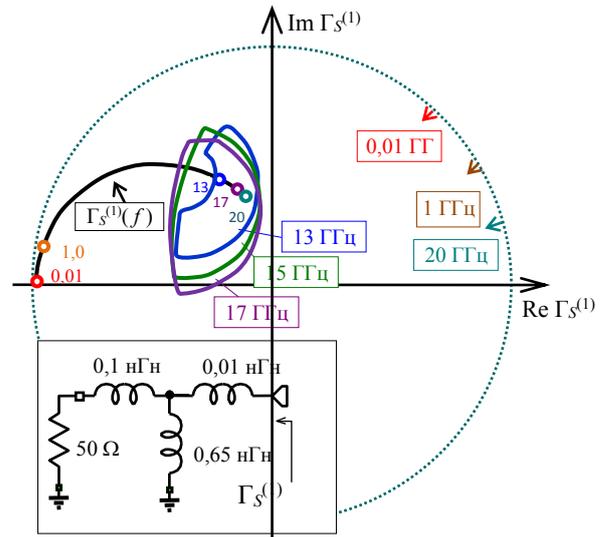


Рис. 3. ОДЗ, области устойчивости и годограф входной СЦ₁ на плоскости $\Gamma_S^{(1)}$

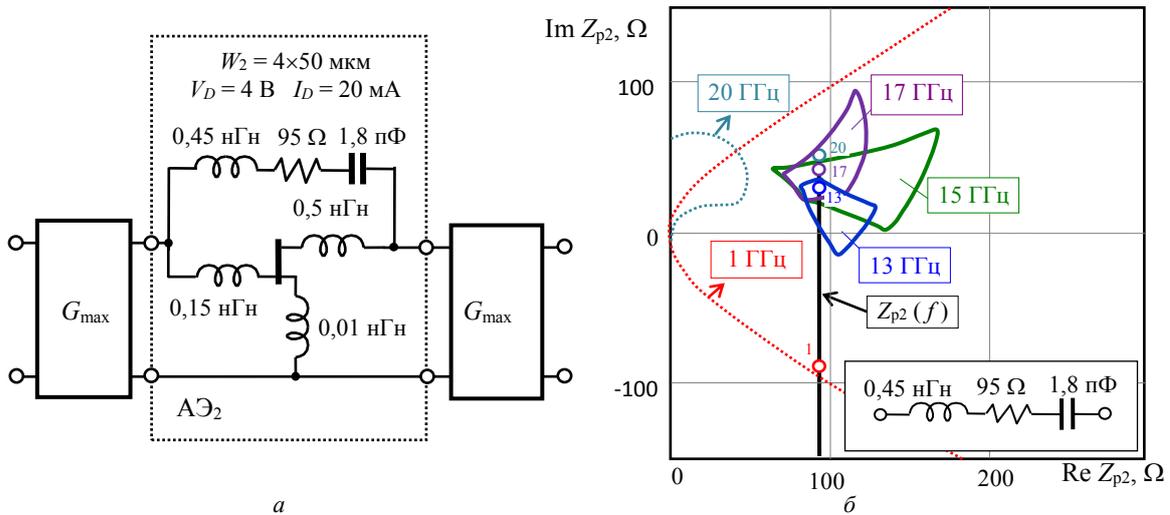


Рис. 4. Схема второго каскада – а; ОДЗ, области устойчивости и годограф цепи, параллельной ОС, на плоскости импеданса Z_{p2} – б

Этап 2. Расчет активного элемента АЭ₂. Далее было выполнено проектирование второго каскада (АЭ₂) с цепью, параллельной ОС (рис. 4, а). С помощью программы AMP-CF были получены ОДЗ на плоскости импеданса КЦ Z_{p2} [15]. Для компенсации спада коэффициента усиления 6 дБ/октаву из-за первого каскада АЧХ второго должна иметь подъем, поэтому при расчете ОДЗ были заданы следующие требования к коэффициенту усиления второго каскада: $8,0 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 9,0 \text{ дБ}$ для частоты 13 ГГц, $9,0 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 10,0 \text{ дБ}$ для частоты 15 ГГц и $10,0 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 11,0 \text{ дБ}$ для частоты 17 ГГц. Остальные требования к характеристикам второго каскада были заданы следующими: $NF^{(2)} \leq 4,0 \text{ дБ}$, $k^{(2)} \geq 1$.

Программа AMP-CF позволяет рассчитывать ОДЗ иммитанса двухполюсной КЦ при условии подключения на входе и выходе каскада идеальных СЦ, которые могут быть настроены на максимум коэффициента усиления или минимум коэффициента шума [8, 9].

В данном случае расчет ОДЗ для двухполюсника Z_{p2} был выполнен в режиме комплексно-сопряженного согласования со стороны входа и выхода АЭ₂ (см. рис. 4, а)

Величины индуктивностей L_{g2} , L_{d2} и L_{s2} были выбраны из условий существования и получения ОДЗ максимальной «ширины» [12, 15]. Вид ОДЗ на плоскости импеданса Z_{p2} представлен на рис. 4, б, по ним с помощью программы LOCUS была синтезирована двухполюсная КЦ в виде последовательной RLC-цепочки, годограф которой также показан на рис. 4, б [15].

Этап 3. Расчет межкаскадной согласующей цепи СЦ₂. Межкаскадная СЦ₂ служит для согласования выхода первого каскада и входа второго между собой.

Исследование с помощью программы REGION показало, что выходное сопротивление соединения СЦ₁–Т₁ и входное сопротивление АЭ₂ близки к величине 50 Ом в полосе частот 12–17 ГГц. Это озна-

чает, что СЦ₂ можно реализовать в виде разделительного конденсатора достаточно большой емкости. Для сокращения объема статьи ОДЗ и годографы СЦ₂ на плоскостях коэффициентов отражения $\Gamma_L^{(1)}$ и $\Gamma_S^{(2)}$ здесь не представлены.

На рис. 5 показаны частотные характеристики активного блока в виде соединения первого и второго каскадов между собой с учетом включения синтезированных СЦ₁ и СЦ₂.

Этап 4. Расчет выходной согласующей цепи СЦ₄. Выходная СЦ₄ обеспечивает согласование выхода транзистора Т₃ с трактом передачи сигнала, а также задает оптимальный импеданс для обеспечения требуемой выходной мощности $P_{\text{вых1dB}}$. Для синтеза СЦ₄ с помощью программы REGION были получены ОДЗ, которые отвечают следующим ограничениям на характеристики каскада: $10 \text{ дБ} \leq G^{(3)} \leq 12 \text{ дБ}$; $m_1 < 0,5$; $m_2 < 0,33$ на частотах 13, 15 и 17 ГГц, а также $m_1 < 1,0$; $m_2 < 1,0$ на частотах 0,01; 1 и 20 ГГц. Кроме того, по нелинейной модели транзистора Т₃ в САПР AWR MWO было выполнено load-pull-моделирование [16] для получения контуров равных значений для выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и коэффициента усиления по мощности G_P при условии, что входная СЦ₃ настроена на сопряженное согласование входа транзистора и подключена ко входу Т₃ (см. рис. 6, а).

В данном случае ОДЗ на плоскости $\Gamma_L^{(3)}$ представляют собой общую часть (пересечение) областей, полученных с помощью программы REGION по s-параметрам и load-pull-контуров $P_{\text{вых}} = 15 \text{ дБм}$ и $G_P = 10 \text{ дБ}$ (см. рис. 6, б). Таким образом, при расчете СЦ₄ мы учли как малосигнальные (рассчитанные по s-параметрам), так и большесигнальные (полученные на основе по load-pull-моделирования) характеристики выходного усилительного каскада. Для построения общих ОДЗ был разработан специализированный программный модуль LP2RGN.

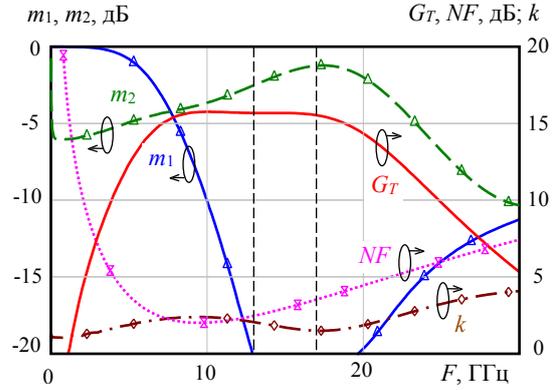


Рис. 5. Частотные характеристики активного блока СЦ₁+АЭ₁+СЦ₂+АЭ₂

Далее по полученным общим ОДЗ с помощью программы LOCUS была синтезирована выходная СЦ₄. Результирующие ОДЗ, схема и годограф СЦ₄ на плоскости коэффициента отражения $\Gamma_L^{(3)}$ представлены на рис. 7, а.

Этап 5. Расчет межкаскадной согласующей цепи СЦ₃. Межкаскадная СЦ₃ служит для согласования выхода АЭ₂ и входа АЭ₃ между собой, она должна реализовать импедансы нагрузок для Т₂ и Т₃, близкие к комплексно-сопряженным. Для этого с помощью программы REGION были построены ОДЗ и области устойчивости на плоскости $\Gamma_L^{(2)}$ для активного блока, состоящего из СЦ₁+АЭ₁+СЦ₂+АЭ₂, и на плоскости $\Gamma_S^{(3)}$ для активного блока АЭ₃+СЦ₄.

Подробно процедура синтеза межкаскадной СЦ с помощью программ REGION и LOCUS описана в [9, 11, 15]. Отметим только, что СЦ₃ рассчитывается таким образом, чтобы ее годограф одновременно попадал в заданные ОДЗ как на плоскости $\Gamma_L^{(2)}$, так и на плоскости $\Gamma_S^{(3)}$. Для примера на рис. 7, б приведены ОДЗ, схема СЦ₃ и годограф для плоскости $\Gamma_S^{(3)}$.

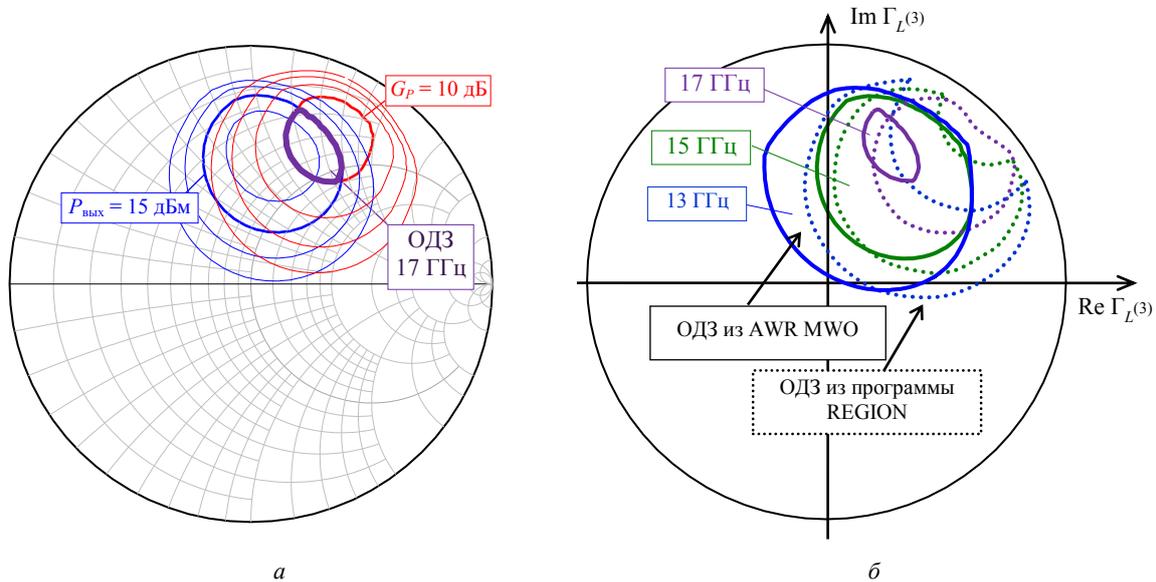


Рис. 6. Контуров равной выходной мощности и коэффициента усиления по мощности для Т₃ на частоте 17 ГГц – а; б – ОДЗ на плоскости коэффициента отражения $\Gamma_L^{(3)}$ для частот 13, 15 и 17 ГГц

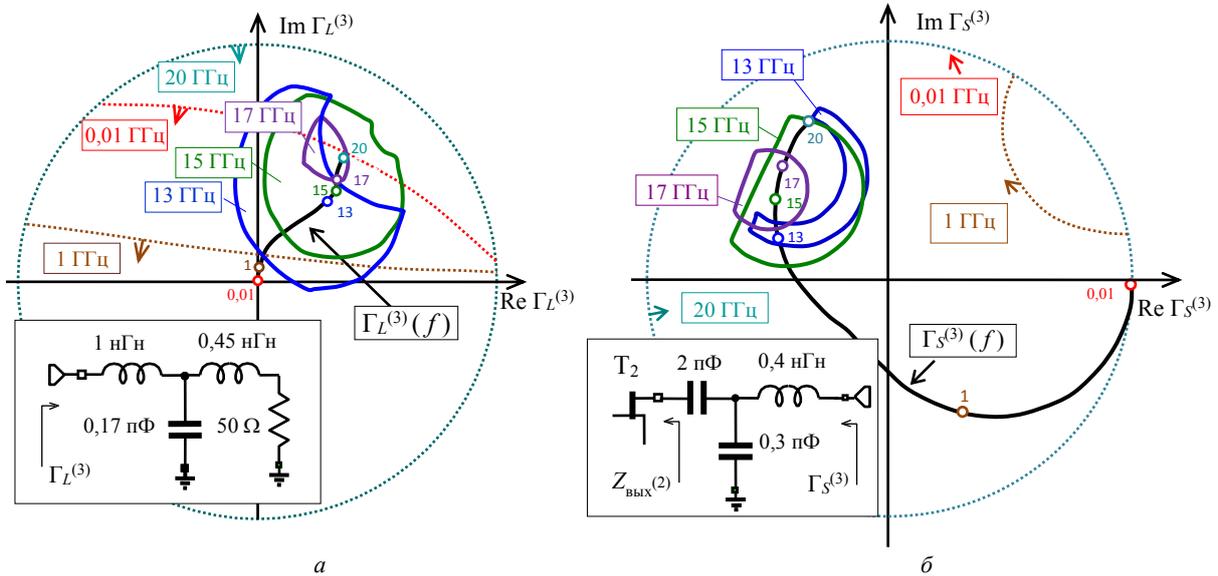


Рис. 7. Общие ОДЗ, области устойчивости, схема и годограф выходной СЦ₄ на плоскости $\Gamma_L^{(3)}$ – а; и межкаскадной СЦ₃ на плоскости $\Gamma_S^{(3)}$ – б

Полученная схема усилителя на идеальных элементах по переменному току показана на рис. 8, а, а ее характеристики, полученные с помощью моделирования в САПР AWR MWO, представлены в табл. 3.

Этап 6. Переход к реальной схеме МШУ. Далее в схему устройства были добавлены элементы, которые обеспечивают выбранный режим работы транзисторов по постоянному току – индуктивности по питанию, разделительные и блокировочные конденсаторы, резисторы автосмещения для обеспечения работы каскадов от однополярного источника питания. Их величины подобраны таким образом, чтобы

они не влияли на основные характеристики МШУ в полосе рабочих частот.

Этап 7. Построение топологии МИС МШУ. Последний этап проектирования заключался в построении топологии МИС усилителя и окончательной параметрической оптимизации всей схемы. Результирующая топология МИС МШУ показана на рис. 8, б, размер кристалла МИС 2,5×1,2 мм².

Характеристики МИС усилителя, полученные на основе ЭМ моделирования в САПР AWR MWO, представлены на рис. 8, в, а также приведены в табл. 3.

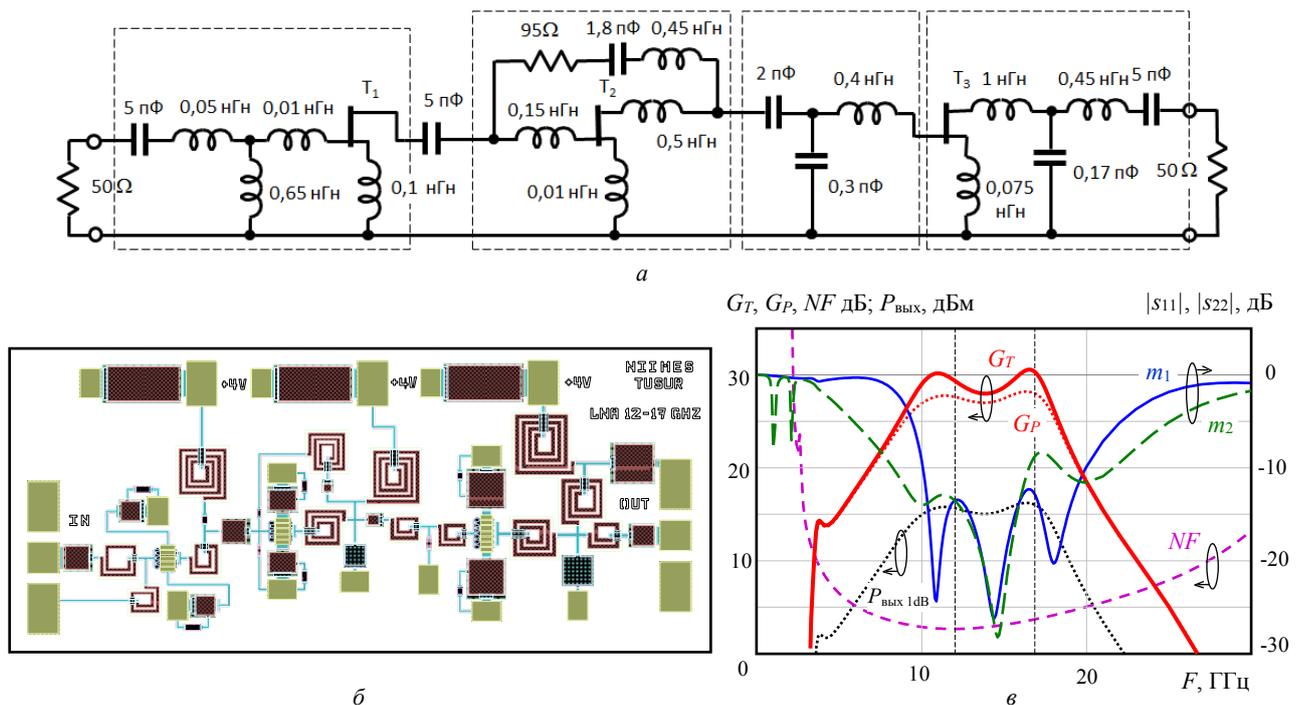


Рис. 8. Схема МШУ на идеальных элементах – а; топология МИС МШУ – б; частотные характеристики МИС МШУ – в (при уровне входного сигнала $P_{вх} = -12$ дБм)

Характеристики МШУ

Усилитель	Δf , ГГц	G_T , дБ	Коэф. отражения, дБ		NF , дБ	$P_{\text{вых } 1\text{дБ}}$, дБм	V_D , В	I_D , мА	Технология	Размер чипа МИС, мм ²
			$ S_{11} $	$ S_{22} $						
На идеальных элементах	12–17	$27 \pm 0,7$	-9,5	-8	3,6	15,2	4	80	0,5 мкм рНЕМТ	2,5×1,2
МИС МШУ	12–17	$27 \pm 0,5$	-8,5	-12	3,7	15,0	4	90		
НМС 565 Hittite США	6–18	$22,5 \pm 2,0$	-10	-11	2,3	11,0	3	53	0,15 мкм рНЕМТ	2,53×0,98
TGA 2512 Triquint США	6–12	$25 \pm 1,0$	-13	-15	1,6	6	5	90	0,15 мкм рНЕМТ	2,05×1,2
LA 0812.2.11 ИСВЧПЭ, Москва	6–12	$28 \pm 1,0$	-10	-12	1,6	10	5	92	0,15 мкм рНЕМТ	2,4×1,4
MP531 Микран, Томск	8–12	$27,5 \pm 1,5$	-14	-5	1,6	13	5	90	0,25 мкм рНЕМТ	2,5×1,5
QPA 2735 Qorvo США	13–17	$25,5 \pm 0,5$	-12	-15	1,3	18	3,5	105	0,1 мкм рНЕМТ	–

Разработанная МИС МШУ имеет следующие характеристики (по результатам ЭМ-моделирования) в полосе частот 12–17 ГГц: коэффициент усиления $G_T = 27,5 \pm 0,5$ дБ, выходная мощность при уменьшении коэффициента усиления на 1 дБ $P_{\text{вых } 1\text{дБ}} > 15$ дБм, входной коэффициент отражения $m_1 < -8,5$ дБ; выходной коэффициент отражения $m_2 < -12$ дБ; коэффициент шума $NF < 3,7$ дБ, МШУ работает от однополярного источника питания $V_D = 4$ В; потребляемый ток $I_D < 95$ мА.

В табл. 3 также представлены параметры существующих аналогов отечественных и зарубежных производителей. Видно, что разработанный МШУ не уступает существующим решениям, реализованным на технологических процессах с меньшей топологической нормой.

Заключение

В статье представлено проектирование схемы и топологии МИС линейного СВЧ-усилителя диапазона частот 12–17 ГГц на основе применения алгоритмов, методов и средств визуального проектирования.

Описанная ранее методика визуального синтеза линейных СВЧ-усилителей [15] была расширена для учета выходной мощности усилителя, т.е. помимо типовых линейных параметров СВЧ-усилителя (таких, как малосигнальный коэффициент усиления, коэффициент шума, согласование, устойчивость) при проектировании теперь можно учитывать характеристики, которые относятся к нелинейным свойствам усилителя: например, уровень выходной мощности, КПД, коэффициент усиления по мощности и др. Это стало возможным за счет совмещения ОДЗ, полученных по малосигнальной модели АЭ (на основе s-параметров), и контуров равных значений характеристик, получаемых на основе load-pull-моделирования (или измерений) по нелинейной модели АЭ.

Интегральная схема МШУ выполнена на базе отечественной 0,5 мкм GaAs-рНЕМТ-технологии АО «Светлана-Рост». Применение методики и программных средств для визуального синтеза позволило разработать МИС МШУ с характеристиками, не уступающими (кроме коэффициента шума) параметрам существующих аналогов, выполненных на

технологиях с меньшей топологической нормой (см. табл. 3).

В настоящий момент топология МИС устройства передана для изготовления на фабрику.

Разработанный МШУ предназначен для применения в составе приемопередающих модулей для радиотехнических систем различного назначения.

Данная работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор FEWM-2023-0014).

Производство интегральных микросхем финансируется за счет средств Министерства образования и науки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по государственному заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008)».

Литература

1. Virdee B.S. Broadband microwave amplifiers / B.S. Virdee, A.S. Virdee, B.Y. Banyamin. – Boston, London: Artech House, 2004. – 231 p.
2. Abrie P.L.D. Design of RF and microwave amplifiers and oscillators. – Boston, Mass: Artech House, 1999. – 480 p.
3. Grebennikov A. Broadband RF and microwave amplifiers / A. Grebennikov, N. Kumar, B.S. Yarman. – New-York, London: CRC Press, 2017. – 743 p.
4. Yarman B.S. A simplified real frequency technique applied to broad-band multistage microwave amplifiers / B.S. Yarman, H.J. Carlin // IEEE Trans. on MTT-30. – 1982. – Vol. 12. – P. 2216–2222.
5. Babak L.I. Design of multistage low-noise amplifiers using «visual» CAD tools / L.I. Babak, M.V. Cherkashin, F.I. Sheyerman, Yu.V. Fedorov // Microwave Symp. Digest (MTT), IEEE MTT-S Int. – Baltimore, MD, 2011. – P. 1–4.
6. Eroglu A. Introduction to RF power amplifier design and simulation. – New-York, London: CRC Press, 2018. – 450 p.
7. Калентьев А.А. Структурный синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с применением моделей пассивных элементов в виде наборов S-параметров / А.А. Калентьев, И.М. Добуш,

Д.В. Гарайс, А.Е. Горяинов, Л.И. Бабак // Сб. трудов 24-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2014. – Т. 1. – С. 117–118.

8. Данильченко В.И. Автоматизированный структурно-параметрический синтез однокаскадного СВЧ-транзисторного усилителя на основе генетического алгоритма / В.И. Данильченко, Е.В. Данильченко, В.М. Курейчик // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2020. – № 4. – С. 83–89.

9. Babak L.I. A new «region» technique for designing microwave transistor low-noise amplifiers with lossless equalizers / L.I. Babak, M.V. Cherkashin, A.Yu. Polyakov // Proc. of the 38th European MW Conf., (EuMC–2008). – Amsterdam, 2008. – Vol. MTT-S. – P. 1402–1405.

10. Бабак Л.И. Комплекс программ «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей и пассивных цепей / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». – Томск: В-Спектр, 2007. – Ч. 2. – С. 113–115.

11. Бабак Л.И. Программы «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, А.Ю. Поляков // Сб. трудов 15-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 425–426.

12. Бабак Л.И. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. – Ч. 1: Описание процедуры проектирования / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // Доклады ТУСУР. – 2006. – № 6 (14). – С. 11–23.

13. Бабак Л.И. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. – Ч. 2: Программная реализация и примеры / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // Доклады ТУСУР. – 2007. – № 1 (15). – С. 10–19.

14. АО «Светлана-Рост». Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.svetlanarost.ru/?page=faundry>, свободный (дата обращения: 25.09.2024).

15. Разработка комплекта монолитных малошумящих усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии / В.Г. Мокеров, Л.И. Бабак, Ю.В. Федоров, М.В. Черкашин, Ф.И. Шеерман, А.С. Бугаев, А.Л. Кузнецов, Д.Л. Кузнецов, Д.Л. Гнатюк // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 105–117.

16. Ghannouchi F.M. Load-pull techniques with applications to power amplifier design / F.M. Ghannouchi, M.S. Hashmi. – New-York: Springer Science & Business Media, 2012. – 234 p.

Cherkashin M.V.

Visual design of Ku-band linear amplifier based on Russian 0.5 um GaAs-pHEMT-technology

The design procedure of Ku-band low-noise amplifier based on the application of algorithms, methods and software tools for the visual synthesis of active microwave devices is presented.

Keywords: GaAs, pHEMT, MMIC, MW linear amplifier, load-pull analysis, visual design procedure.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-17-24

References

1. Virdee B.S., Banyamin B.Y. *Broadband microwave amplifiers*. Boston, London: Artech House, 2004, 231 p.

2. Abrie P.L.D. *Design of RF and microwave amplifiers and oscillators*. Boston, Mass: Artech House, 1999, 480 p.

3. Grebennikov A., Kumar N., Yarman B.S. *Broadband RF and microwave amplifiers*. New-York, London: CRC Press, 2017, 743 p.

4. Yarman B.S., Carlin H.J. A simplified real frequency technique applied to broad-band multistage microwave amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques-30*, 1982, vol. 12, pp. 2216–2222.

5. Babak L.I., Cherkashin M.V., Sheyerman F.I., Fedorov Yu.V. [Design of multistage low-noise amplifiers using «visual» CAD tools]. *Microwave Symposium Digest (MTT), IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. Baltimore, MD, 2011, pp. 1–4.

6. Eroglu A. *Introduction to RF power amplifier design and simulation*. New-York, London: CRC Press, 2018, 450 p.

7. Kalentyev A.A., Dobush I.M., Garays D.V., Goryainov A.E., Babak L.I. [Structural synthesis of microwave transistor amplifiers based on a genetic algorithm using models of passive elements in the form of sets of S-parameters]. *Proceedings of the 24th International Crimean Conference «Microwave Technology and Telecommunication Technologies»*, 2014, vol. 1, pp. 117–118 (in Russ.).

8. Danilchenko V.I., Danilchenko E.V., Kureichik V.M. [Automated structural-parametric synthesis of a single-stage microwave transistor amplifier based on a genetic algorithm]. *Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development*, 2020. No 4, pp. 83–89 (in Russ.).

9. Babak L.I., Cherkashin M.V., Zaitsev D.A. [A new «region» technique for designing microwave transistor low-noise amplifiers with lossless equalizers]. *Proceedings of the 38th European Microwave Conference, EuMC 2008, MTT-S, Amsterdam*, 2008, pp. 1402–1405.

10. Babak L.I., Cherkashin M.V., Zaitsev D.A. [A software tools for the «visual» design of transistor microwave amplifiers and passive circuits]. *Proceedings of International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems. The Experience of Innovative Development*. Tomsk, V-Spektr, 2007, pt. 2, pp. 113–115 (in Russ.).

11. Babak L.I., Cherkashin M.V., Polyakov A.Yu. [Software tools for «visual» design of transistor microwave amplifiers]. *Proceedings of the 15th International Crimean Conference «Microwave Equipment and Telecommunication Technologies»*. Sevastopol, Weber, 2005, vol. 2, pp. 425–426 (in Russ.).

12. Babak L.I., Cherkashin M.V., Zaitsev D.A. [The «visual» design of correction and matching networks of semiconductor microwave devices. Part 1. Description of the design procedure]. *Proceedings of TUSUR University*, 2006, no. 6 (14), pp. 11–23 (in Russ.).

13. Babak L.I., Cherkashin M.V., Zaitsev D.A. [The «visual» design of correction and matching circuits of semi-

Черкашин Михаил Владимирович

Канд. техн. наук, доцент, с.н.с. научно-исследовательского института микроэлектронных систем (НИИ МЭС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7-906-948-86-48
Эл. почта: mcher@kcup.tusur.ru

conductor microwave devices. Part 2. Software implementation and examples]. *Proceedings of TUSUR University*, 2007, no. 1 (15), pp. 10–19 (in Russ.)

14. AO «Svetlana-Rost». Web-site (in Russ.). Available at: <http://www.svetlana-rost.ru/?page=technology>, free (Accessed: September 25, 2024).

15. Mokerov V.G., Babak L.I., Fedorov Yu.V., Cherkashin M.V., Sheerman F.I., Bugaev A.S., Kuznetsov A.L., Kuznetsov D.L., Gnatyuk D.L. [Development of a set of MMIC low-noise X-band amplifiers based on 0,15 μm GaAs-pHEMT-technology]. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, No. 2 (22), pt. 1, pp. 105–117 (in Russ.).

16. Ghannouchi F.M., Hashmi M.S. *Load-pull techniques with applications to power amplifier design*. New-York, Springer Science & Business Media, 2012, 234 p.

Mikhail V. Cherkashin

Candidate of Sciences in Engineering,
Senior Researcher of Research Institute of Microelectronic
Systems, Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7-906-948-86-48
Email: mcher@kcup.tusur.ru

УДК 621.373.826, 621.376.2

И.В. Юнусов, В.С. Арыков, М.В. Степаненко, Г.Г. Жук, Д.П. Аргунов, А.А. Шейнбергер

Сверхширокополосный электрооптический модулятор с интегрированным источником излучения

Приведены результаты оптимизации конструкции микросборки сверхширокополосного электрооптического модулятора с интегрированным лазерным диодом для её использования в составе оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов. Также данное изделие может быть использовано для модуляции цифрового сигнала на длине волны оптической несущей 1,31 мкм. В результате оптимизации конструкции микросборки сверхширокополосного электрооптического модулятора диапазон его рабочих частот расширен до 27 ГГц по уровню -3 дБ. Максимальная мощность оптического излучения интегрированного лазера микросборки превышает 10 мВт при токе потребления 90 мА.

Ключевые слова: электрооптический модулятор, микросборка.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-25-29

Одной из основных задач при создании высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи данных (ВОСП) является измерение частотных характеристик электрооптического преобразования передатчика и оптоэлектронного преобразования приемника. Для измерения данных характеристик используются векторные анализаторы цепей с оптическими приставками, которые включают передающий и приемный модуль с известными заранее характеристиками [1]. Технически приставка представляет собой ВОСП аналогового сигнала [2–5], для которой выполнена калибровка трактов передатчика и приемника. Использование передающего модуля приставки позволяет выполнять измерение характеристик приемной части ВОСП, а приемный модуль приставки позволяет выполнять измерение параметров передающей части ВОСП. Использование одновременно передающего и приемного модуля приставки позволяет также измерять характеристики устройств с оптическими входами и выходами.

Основой передающего модуля приставки (передатчика) являются источник излучения и модулятор, выполняющие функцию формирования модулированного оптического сигнала. Существует два пути конструктивной реализации передатчика. В первом случае используются отдельные корпусированные модули лазера и модулятора. Во втором – единое устройство, выполненное по принципу монолитной или гибридно-монолитной интеграции, что позволяет получить более компактное и недорогое техническое решение.

Ранее авторами была разработана микросборка сверхширокополосного электрооптического модулятора с рабочей частотой до 18–20 ГГц [6], а также определены направления дальнейших работ, в частности, расширение диапазона рабочих частот до 40 ГГц.

Целью настоящей работы является оптимизация конструкции микросборки электрооптического модулятора с интегрированным источником излучения для расширения диапазона её рабочих частот и использования в качестве основного функционального блока передатчика оптической приставки.

Конструкция микросборки модулятора

Схема электрическая принципиальная микросборки приведена на рис. 1. Микросборка имеет СВЧ-вход, который также используется для подачи постоянного смещения на электроабсорбционный модулятор (ЭАМ) VD1, RC-цепь, вывод питания лазерного диода VD2, вывод смещения и контроля тока мониторингового фотодиода VD3, а также общий вывод. Элементы, входящие в кристалл ЭАМ с интегрированным лазером, помещены на рис. 1 в прямоугольник с пунктирной границей.

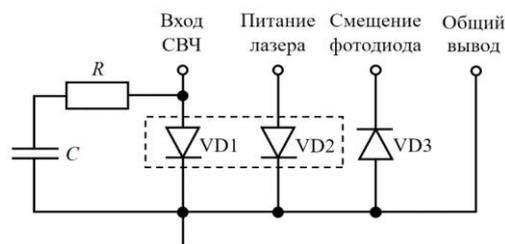


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная микросборки: VD1 – ЭАМ; VD2 – встроенный в ЭАМ лазерный диод; VD3 – мониторинговый фотодиод

При разработке топологии платы микросборки она была условно поделена на высокочастотную часть и низкочастотную часть. Высокочастотная часть платы включает себя сверхвысокочастотную (СВЧ) линию передачи до микросхемы ЭАМ (включая разварочные проволочки), интегрированный тонкопленочный резистор и керамический конденсатор, а также разводку общего контакта платы под микросхемой ЭАМ и керамическим конденсатором. Низкочастотная часть включает подводящие линии питания лазера VD2 и мониторингового фотодиода VD3, а также сам фотодиод.

Проектирование микросборки модулятора

При проектировании микросборки основное внимание уделялось высокочастотной части платы. Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе был выполнен упрощенный аналитический расчет, на втором этапе – моделирование с применением электромагнитного анализа.

Для контроля температуры микросборки необходимо предусмотреть ее размещение на элементе Пельтье. В связи с этим отсутствует возможность реализации микрополосковой линии передачи с металлизацией оборотной стороны платы. Поэтому в качестве линии передачи выбрана копланарная линия. Линия передачи располагается на диэлектрической подложке из AlN. В электрической схеме для учёта ёмкости диода ЭАМ включён идеальный конденсатор, одна из обкладок которого заземлена. СВЧ-характеристики керамического конденсатора в электрической схеме учитываются на основе параметров рассеяния, предоставленных производителем. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

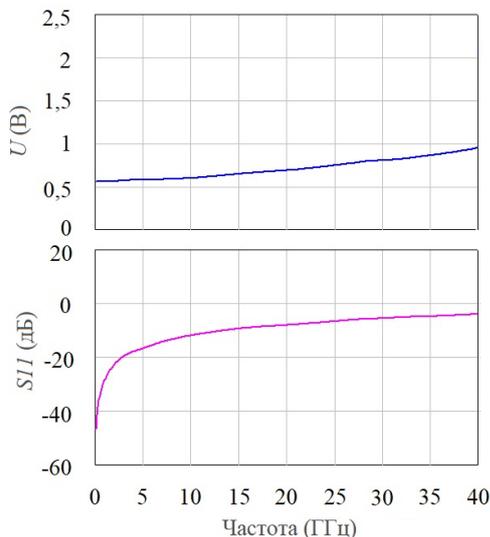


Рис. 2. Частотные зависимости, полученные в результате аналитического расчёта модели микросборки: зависимость амплитуды напряжения на ЭАМ (сверху); зависимость модуля коэффициента S_{11} от СВЧ-входа (снизу)

Амплитуда напряжения на диоде модулятора монотонно увеличивается с ростом частоты в требуемом частотном диапазоне: от 0 до 40 ГГц. Рост амплитуды напряжения на диоде связан с изменением импеданса цепи, состоящей из проволоочки, идущей от микросхемы лазера на RC -цепь. С ростом частоты модуль импеданса данной цепи растёт, что позволяет компенсировать частотные потери амплитуды напряжения на диоде модулятора. При этом коэффициент отражения от СВЧ-входа микросборки возрастает.

При проведении электромагнитного анализа некоторые элементы и компоненты платы были рассмотрены в качестве сосредоточенных элементов и упрощённых моделей (диод электроабсорбционного модулятора, разварочные проволоочки) и включены в аналитическую модель наряду с электромагнитной моделью высокочастотной части платы.

Диэлектрические материалы модели платы заданы в виде стека из слоя воздуха толщиной 500 мкм и слоя диэлектрика AlN толщиной 450 мкм. Металлизация на поверхности диэлектрика выполнена из золота толщиной 6 мкм. Удельное сопротивление резистивной пленки согласующего тонкопленочного резистора составляет 20 Ом/кв.

В связи с требованиями по подключению платы разварочными проволочками на лицевую сторону платы в одной плоскости, были рассмотрены два варианта конфигурации СВЧ-линии на плате: копланарная и щелевая. Анализ результатов расчета показал, что сборка с щелевой линией имеет более равномерную частотную характеристику напряжения. Копланарная линия демонстрирует наличие резонанса в полосе рабочих частот, предположительно связанного с задержкой протекания тока в заземленной линии, приводящей к изменению фаз распространения сигнала в сигнальной и заземленной линии. Таким образом, была разработана плата на AlN микросборки с щелевой линией передачи СВЧ-сигнала.

Внешний вид изготовленной микросборки на разработанной плате из AlN представлен на рис. 3. Габаритные размеры платы составляют $1,76 \times 1,70$ мм², толщина – 0,25 мм.

СВЧ-линия передачи выполнена на основе двухслойной металлизации Cu + Au и имеет конфигурацию «щелевая линия» с волновым сопротивлением 50 Ом.

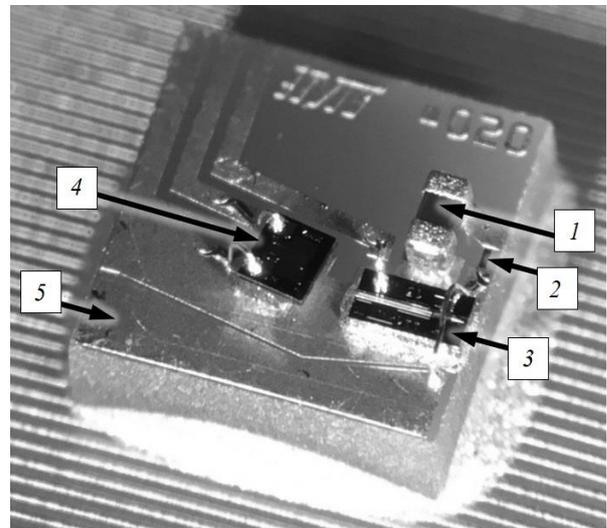


Рис. 3. Фотография установленной в корпус микросборки: 1 – блокировочная емкость; 2 – согласующий резистор; 3 – ЭАМ с интегрированным лазерным диодом; 4 – мониторинг фотодиод; 5 – металлизированная разводка СВЧ-платы

По сравнению с представленным ранее результатом, описанным в [6], топология платы была переработана с целью уменьшения влияния размеров блокировочного конденсатора и необходимых для его монтажа площадок. В качестве блокировочной емкости был применен конденсатор с типоразмером 01005 с размерами $0,4 \times 0,2 \times 0,2$ мм³ (ранее использовался 0402) емкостью 100 нФ. Сформированная RC -цепь на СВЧ-входе необходима для согласования по СВЧ-сигналу, а также для блокировки постоянной составляющей смещения на ЭАМ.

ЭАМ с интегрированным лазерным диодом с длиной волны излучения 1,31 мкм выполнен на подложке InP. Его паспортная максимальная рабочая частота превышает 45 ГГц.

Мониторный фотодиод выполнен также в виде отдельного кристалла на основе InGaAs на подложке InP и обеспечивает обратную связь, детектируя оптическое излучение лазера.

Измерение характеристик микросборки и обсуждение результатов

Для измерения передаточной характеристики модулятора был собран измерительный стенд, состоящий из лабораторных источников напряжения, задающих режим работы элементов микросборки, приборов для измерения тока и напряжения, а также системы сбора и измерения оптической мощности излучения.

Система сбора и измерения оптической мощности излучения лазера состояла из одномодового оптоволоконна SMF-28 с сформированной на торце принимающей излучение микролинзой и подключенного к измерителю оптической мощности PM20CH (Thorlabs, США). Для совмещения полупроводникового волновода ЭАМ и фокуса микролинзы линзованный торец оптоволоконна был установлен в микропозиционер наноразмерной точности MAX609/M (Thorlabs, США).

Измеренное максимальное значение оптической мощности излучения лазера ЭАМ превышает 10 мВт при питающем токе лазерного диода 90 мА. Измеренное значение соответствует паспортным характеристикам кристалла ЭАМ.

Для определения рабочего диапазона напряжений, в котором ЭАМ имеет наибольший коэффициент преобразования, была измерена его передаточная характеристика (рис. 4).

Наибольшая крутизна измеренной передаточной характеристики наблюдается в диапазоне напряжений на ЭАМ минус (1,3–1,7) В. Указанный диапазон соответствует снижению выходной мощности относительно состояния без подачи напряжения на ЭАМ в два раза. Исходя из измерений, оптимальная рабочая точка смещения ЭАМ была выбрана равной –1,5 В.

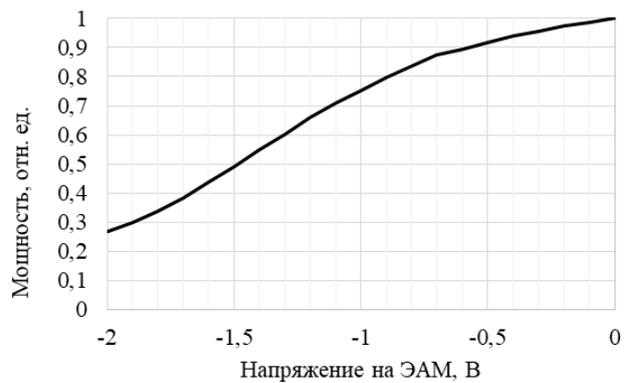


Рис. 4. Передаточная характеристика микросборки сверхширокополосного ЭАМ

Для определения частотных характеристик нормализованного коэффициента передачи по мощности векторным анализатором цепей MS46122B-043 (Anritsu, США) с калибровочным модулем O/E MN4765B (Anritsu, США) измерялись частотные характеристики параметров рассеяния микросборки. Подача постоянного напряжения смещения на ЭАМ осуществлялась через коаксиальный широкополосный инжектор питания K251 (Anritsu, США).

На рис. 5 приведены полученные частотные зависимости нормированного коэффициента передачи сигнала по мощности — кривая 1 и модуля коэффициента отражения сигнала от входа микросборки — кривая 2. При проведении измерений напряжение смещения на ЭАМ соответствовало определенной оптимальной рабочей точке –1,5 В, а величина тока лазерного диода составляла 40 мА. При установленном токе лазера 40 мА фототок мониторингового фотодиода составлял около 0,83 мА. Для проведения сравнительного анализа на рис. 5 также приведена частотная зависимость нормированного коэффициента передачи по мощности для микросборки модулятора предыдущей конструкции, описанной в [6] (кривая 3).

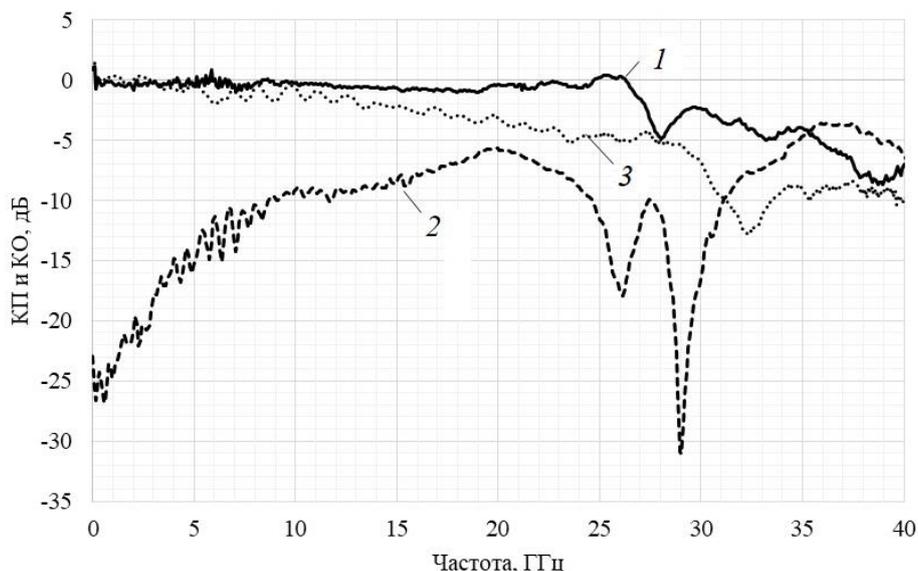


Рис. 5. Частотная зависимость нормированного коэффициента передачи (КП) по мощности и модуля коэффициента отражения (КО) от входа микросборки: 1 — КП; 2 — КО; 3 — КП для результата, описанного в [6]

Анализ приведенных на рис. 5 частотных зависимостей микросборки оптимизированной конструкции показывает, что:

1) нормированный коэффициент передачи по мощности (кривая 1) снижается на 3 дБ относительно низкочастотного значения на частоте 27–28 ГГц, при этом функциональность микросборки с некоторым снижением коэффициента передачи сохраняется вплоть до 40 ГГц;

2) модуль коэффициента отражения СВЧ-сигнала от входа микросборки во всей полосе рабочих частот не превышает минус 6 дБ;

3) нормированный коэффициент передачи по мощности (кривая 1) имеет значительно более высокую равномерность в диапазоне частот до 26 ГГц по сравнению с ранее опубликованным результатом (кривая 3);

4) диапазон рабочих частот микросборки увеличен с 18–20 до 26–27 ГГц по уровню –3 дБ по сравнению с предыдущим результатом [6].

Улучшение результатов, указанных в последних двух пунктах, связывается, в первую очередь, с переработкой топологии платы и использованием конденсатора меньшего типоразмера.

Заключение

В результате проведенной работы был разработан, изготовлен и исследован сверхширокополосный электрооптический модулятор с интегрированным источником излучения. В результате оптимизации топологии и использования конденсатора меньшего размера удалось значительно повысить рабочую частоту микросборки, что позволит успешно использовать ее до частоты 40 ГГц в составе модуля передатчика оптической приставки. Кроме того, полученный модулятор может быть использован для модуляции цифрового сигнала в одном из форматов амплитудной модуляции.

Направления дальнейшего развития работы включают непосредственно разработку и сборку модуля передатчика оптической приставки.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Литература

1. Wong R.W. High-Speed Lightwave Component Analysis to 20 GHz / R.W. Wong, P.R. Hernday, D.R. Harkins // HP Journal. – 1991. – Vol. 42, No. 1. – P. 6–13.
2. Seeds A. Microwave photonics // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2002. – Vol. 50, No. 3. – P. 877–887.
3. Cox C. Analog Optical Links. – Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004. – P. 1–18.
4. Limits on the Performance of RF-Over-Fiber Links and Their Impact on Device Design / C. Cox, E. Ackerman, G. Betts, J. Prince // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2006. – Vol. 54, No. 2. – P. 906–920.
5. Yao J. Microwave Photonics // J. Lightwave Technol. – 2009. – No. 27. – P. 314–335.
6. Микросборка сверхширокополосного электрооптического модулятора с интегрированным источником излучения / И. Юнусов, В. Арыков, М. Степаненко, Ю. Жидик, К. Петрухин, С. Иваничко, А. Майкова, М. Филюшин // Прикладная физика. – 2024. – № 1. – С. 91–95.

Юнусов Игорь Владимирович

Канд. техн. наук, вед. н.с. лаб. интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР)
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: igor.v.yunusov@yandex.ru

Арыков Вадим Станиславович

Канд. техн. наук, директор ООО «Ай Эм Тех», г. Томск; вед. н.с. ЛИОР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: arykov.v@ir-mw.com

Степаненко Михаил Валерьевич

Науч. сотр. ЛИОР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: stepanenko.m@ir-mw.com

Жук Григорий Григорьевич

Аспирант каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС), м.н.с. ЛИОР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-8929-2833
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: grigoriy26.04@mail.ru

Аргунов Дмитрий Пантелеевич

Мл. н.с. ЛИОР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Инженер-программист АО «НИИПП»
Красноармейская ул., 99а, г. Томск, Россия, 634034
ORCID: 0000-0002-8828-4014
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: argunov_dp@niipp.ru

Шейнбергер Анна Андреевна

Мл. н.с. ЛИОР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: annasejnberger@gmail.com

Yunusov I.V., Arykov V.S., Stepanenko M.V., Zhuk G.G., Argunov D.P., Sheinberger A.A.

Ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser

The paper presents the results of upgrading the design of a microassembly of an ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser diode with a radiation wavelength of 1.31 μm for its use in an optical attachment to analyze the parameters of components of high-speed fiber-optic systems used for transmitting analog and digital signals. This product can also be used to modulate a digital signal at an optical carrier wavelength of 1.31 μm . As a result of upgrading the design of the microassembly, it was possible to increase its maximum frequency to 40 GHz and expand the range of operating frequencies (100 kHz – 27 GHz). The maximum power of optical radiation of the integrated laser of the microassembly exceeds 10 mW at a consumption current of 90 mA.

Keywords: electro-optical modulator, microassembly.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-25-29

References

1. Wong R.W., Hernday P.R., Harkins D.R., High-Speed Lightwave Component Analysis to 20 GHz, *HP Journal*, 1991, vol. 42, no. 1, pp. 6–13.
2. Seeds A., Microwave photonics, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, vol. 50, no. 3, pp. 877–887.
3. Cox C., *Analog Optical Links*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004, pp. 1–18.
4. Cox C.H., Ackerman E.I., Betts G.E., and Prince J.L., Limits on the Performance of RF-Over-Fiber Links and Their Impact on Device Design, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 2, pp. 906–920.
5. Yao J., Microwave Photonics, *Journal of Lightwave Technology*, 2009, no. 27, pp. 314–335.
6. Yunusov I., Arykov V., Stepanenko M., Zhidik Yu., Petrukhin K., Ivanichko S., Maikova A., Filyushin M., *Mikrosborka sverkhshirokopolosnogo elektroopticheskogo modulyatora s integrirovannym istochnikom izlucheniya* [Microassembly of an ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser], *Applied Physics*, 2024, no. 1, pp. 91–95 (in Russ.).

Igor V. Yunusov

Doctor of Science in Engineering, Leading Researcher, Laboratory of Integrated Optics and Radiophotonics (LIOR), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: igor.v.yunusov@yandex.ru

Vadim S. Arykov

Doctor of Science in Engineering,
Director, IM Tech LLC, Tomsk,
Leading Researcher LIOR TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: arykov.v@ir-mw.com

Michael V. Stepanenko

Researcher LIOR TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: stepanenko.m@ir-mw.com

Gregory G. Zhuk

Postgraduate student, Department of Radio Electronics and Communication Systems, Junior Researcher LIOR TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-8929-2833
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: grigoriy26.04@mail.ru

Dmitry P. Argunov

Junior Researcher LIOR TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-8828-4014
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: sss@pgtu.bpla.ru

Anna A. Sheinberger

Junior Researcher LIOR TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: annasejnberger@gmail.com

УДК 621.3.015

М.Е. Комнатнов

Методика оценки уровня излучаемой помехоэмиссии интегральной схемы в ТЕМ-камере при температурном воздействии

Интегральные схемы (ИС), применяемые в радиоэлектронных средствах (РЭС), создают электромагнитное излучение, анализ уровня которого проводят при обеспечении электромагнитной совместимости. В реальных условиях эксплуатации РЭС подвергаются воздействию температуры, что оказывает влияние на амплитуды и частоты излучаемой помехоэмиссии ИС. Предложены методика и алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС при заданном температурном воздействии, с помощью которых измерен уровень излучаемой помехоэмиссии МК K1986BE91T в широких диапазонах частот (150 кГц – 1 ГГц) и температур (от –50 до 150 °С). Показано, что на основной частоте тактирования, вблизи 80 МГц и 2-й гармонике, воздействие температуры не оказывает влияние на уровень излучаемой помехоэмиссии МК, а его изменение не превышает $\pm 0,3$ дБ. Работа различных блоков МК при увеличении его температуры от –50 до +150 °С снижает на 5,5 дБ максимальный уровень излучаемой помехоэмиссии МК в диапазоне частот 8–27 МГц. Наиболее зависимые от температуры уровни помехоэмиссии наблюдаются до 6-й гармоники частоты тактирования МК и достигают 35,8 дБмкВ, что на 5,7 дБ выше по сравнению с измеренным уровнем при нормальной температуре.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ТЕМ-камера, помехоэмиссия, интегральная схема.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-30-36

Увеличение рабочих частот, снижение уровня питающих напряжений и переход на субмикронные технологии производства приводят к повышению уровней электромагнитной эмиссии (помехоэмиссии) [1] и восприимчивости электронных компонентов к внешним электромагнитным помехам (ЭМП) [2]. Высокие токи потребления быстродействующих интегральных схем (ИС), используемых в современных мобильных устройствах связи с рабочими частотами 5–6 ГГц [3], могут создавать электромагнитное излучение (ЭМИ) наравне с антеннами [4]. Анализ излучаемой помехоэмиссии ИС является сложной задачей, поскольку вклад в результирующий уровень вносит каждый функциональный блок [5]. Например, при работе блоков микроконтроллера (МК) повышение уровня помехоэмиссии может зависеть не только от системной частоты его арифметико-логического устройства (АЛУ) и процессора в целом, но и от типа используемой памяти [6].

Измерения уровня помехоэмиссии ИС проводят при нормальных климатических условиях (23 ± 5 °С, 40–60%), применяя стандартизированные методики [7, 8]. Используя ТЕМ-камеры, оценивают в соответствии со стандартом [7] уровень помехоэмиссии от экранированных ИС [9] и определяют влияние на них типа источника питания [10] и режима работы [11] МК. Для более детальной оценки излучаемой помехоэмиссии в ТЕМ-камере методики модифицируют, например, применяя направленный ответвитель со сдвигом фаз на 180° [12]. Кроме того, совмещают результаты измерений, проводимых в ТЕМ-камере, с методом поверхностного сканирования [13] и применяют математические модели на основе эквивалентных дипольных моментов [14].

В реальных условиях эксплуатации РЭС подвергается влиянию температуры [15], влияющей на излучаемую помехоэмиссию ИС [16]. При этом из-за

температуры изменяются характеристики пассивных и активных компонентов [17]. Например, ёмкости конденсаторов тактового генератора могут повлиять на время запуска МК или рабочую частоту во время его работы [18]. В результате, использование различных блоков МК с изменением параметров их работы может повлиять на уровень помехоэмиссии в реальных условиях эксплуатации, что необходимо учитывать на этапе проектирования РЭС, проводя оценку и локализацию источников ЭМП.

Цель работы – предложить методику и оценить с её помощью уровень излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере при температурном воздействии.

Методика измерения уровня излучаемой помехоэмиссии интегральной схемы в ТЕМ-камере

Измерение уровней излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере проводят при её размещении на специальной измерительной ПП (1), соответствующей стандартам [7, 8], при нормальной температуре ($+23 \pm 5$ °С). Измерительная ПП (1) устанавливается в апертуру ТЕМ-камеры, один порт которой соединяется с согласованной нагрузкой (2), а другой – с измерительным приёмником (ИП) или анализатором спектра (3) (рис. 1) через внутренний или внешний аттенуатор (4).

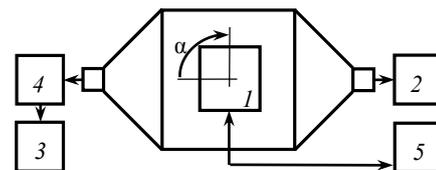


Рис. 1. Схема измерительной установки для оценки излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере

Используя ИП с выбранным детектором, измеряют напряжение на его входе при последовательном повороте ИС относительно центрального про-

водника ТЕМ-камеры на угол $\alpha = 90^\circ$. Устройством мониторинга (5) может являться программатор для МК, которым проверяется корректность выполняемой задачи, или, например, осциллограф, которым контролируют параметры ИС, после чего устройство отключается.

Алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере (рис. 2) включает следующие этапы:

1. Собирается и настраивается измерительная установка. Выбирается в ИП квазипиковый или пиковый детектор в режиме накопления максимальных значений.

2. Проверяется работоспособность ИС-устройством мониторинга.

3. Устанавливается диапазон частот согласно [7]: 0,15–30 МГц с разрешением по полосе частот 9 кГц по уровню 6 дБ для ИП и 10 кГц по уровню 3 дБ для анализатора спектра; 0,03–1 ГГц с разрешением по полосе частот 120 кГц для ИП и 100 кГц для анализатора спектра. Для специальных случаев, не регламентированных [7], он делится на поддиапазоны от низких до высоких частот, например: 9–150 кГц, 0,15–1 МГц, 1–30 МГц и т.д.

4. Настраиваются скорость свипирования (развертки), чувствительность преселектора ИП и измеряются напряжения $|U|(f)$ на входе ИП в исследуемом диапазоне частот при заданном положении угла α ИС относительно центрального проводника ТЕМ-камеры.

5. Изменяется угол α измерительной ПП с ИС на 90° в апертуре ТЕМ-камеры относительно её центрального проводника, и измерения повторяются.

6. Сравниваются измеренные максимумы $|U|(f)$ с кривыми из [7] в требуемом диапазоне частот, и для них присваивается норма соответствия.

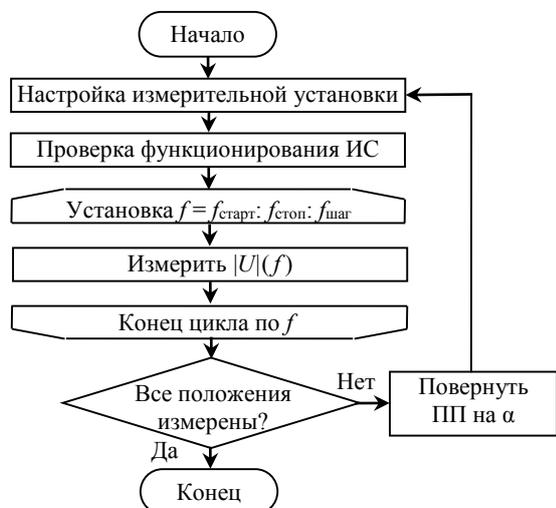


Рис. 2. Алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере при нормальной температуре

В результате, используя методику и алгоритм, можно измерить уровень излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере, который при необходимости

сопоставляют с результатами измерения в безовой (БЭК) или реверберационной (РК) камерах, пересчитывая $|U|(f)$ с использованием электрических и магнитных дипольных моментов [7, 19, 20].

Методика измерения уровня излучаемой помехоэмиссии интегральной схемы в ТЕМ-камере при температурном воздействии

Методика измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере при температурном воздействии предполагает аналогичные этапы измерения ИС в ТЕМ-камере, размещенной в температурной или климатической камерах. Измерения при температурном воздействии проводят после измерений при нормальной температуре.

Схема установки для измерения уровня излучаемой помехоэмиссии (рис. 3) включает испытуемую ИС (1), размещенную в апертуре ТЕМ-камеры (2), с подключенной к камере согласованной нагрузкой (3). Электропитание измерительной ПП осуществляется от аккумуляторной батареи (АКБ) (4). Для контроля работоспособности ИС используются устройства мониторинга (5), подключаемые к рабочей станции (6). Кроме того, используя рабочую станцию (6), управляют температурной или климатической камерой (7) и процессом измерения в целом. Измерение уровня излучаемой помехоэмиссии от ИС при температурном воздействии проводят, подключив ко входу ТЕМ-камеры (2), через внутренний или внешний аттенуатор (8), ИП или анализатор спектра (9), которым измеряют $|U|(f)$.

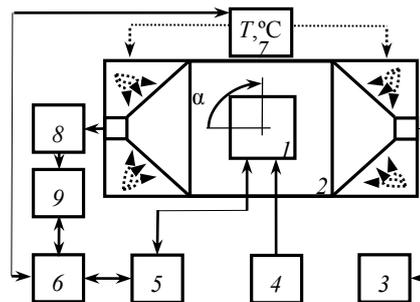


Рис. 3. Схема измерительной установки для оценки излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере при температурном воздействии

Алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии при температурном воздействии (рис. 4) аналогичен приведенному на рис. 2, но включает цикл для изменения с заданным шагом температуры воздействия на поверхность ТЕМ-камеры с измерительной ПП. При этом настройка температуры проводится после настройки ИП и контроля работоспособности ИС устройством мониторинга, а температура изменяется после измерения $|U|(f)$ в заданном диапазоне частот.

Сборка и настройка измерительной установки включают размещение ТЕМ-камеры в климатической или температурной камерах. При этом используются термостабильные кабельные сборки минимальной длины. Измерения частотной зависимости уровня помехоэмиссии проводят в климатической

камере при относительной влажности воздуха 40–60% с выдерживанием заданной температуры в течение не менее 30 с. При этом в соответствии с алгоритмом измерения (см. рис. 4) для климатической камеры («тепло–холод» или «тепло–холод–влага») изначально задаётся режим охлаждения от нормальной температуры до нижней рабочей температуры ИС, и далее от неё до верхней рабочей температуры ИС – режим нагрева. Данные режимы выбраны для повышения эффекта теплового удара, проявляющегося при воздействии градиента температур на разных участках измерительной ПП и ИС, изменяющиеся параметры металлов и диэлектриков, а следовательно, плотность поверхностного тока на ИС. В результате дестабилизирующее воздействие проявляется не только за счет электрического воздействия, но и вследствие теплового удара, что является более экстремальным режимом работы для ИС и приводит к максимальным уровням излучаемой помехоэмиссии.

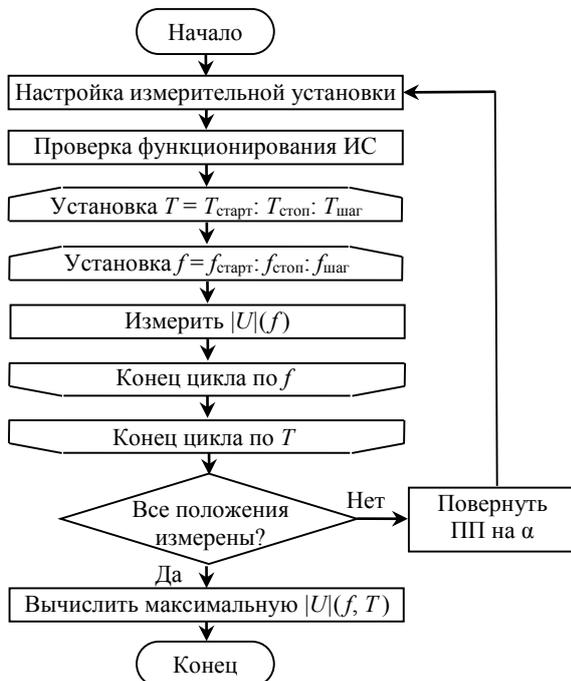


Рис. 4. Алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС при температурном воздействии

В результате, используя методику, можно измерить уровни излучаемой помехоэмиссии при температурном воздействии, что позволит симитировать реальные и экстремальные условия эксплуатации ИС, а на этапе проектирования ИС – учесть и снизить помехоэмиссии от них и РЭС в целом.

Измерение излучаемой помехоэмиссии микроконтроллера в ТЕМ-камере при температурном воздействии

Создана в соответствии со стандартом [7] измерительная ПП размерами 100×100 мм (рис. 5). В качестве ИС выбран МК K1986BE91T, имеющий ядро ARM Cortex M3. Схема измерительной ПП включает фильтры для ослабления ЭМП по цепи

электропитания МК, отладочный интерфейс (Joint Test Action Group (JTAG)) для программирования, а также дополнительные интерфейсы ввода/вывода сигналов, в том числе для блоков аналого-цифрового (АЦП) и цифроаналогового (ЦАП) преобразователей. Также измерительная ПП содержит кнопки управления, светодиоды для индикации работы при испытании и кварцевые резонаторы на 8 МГц и 32 кГц.

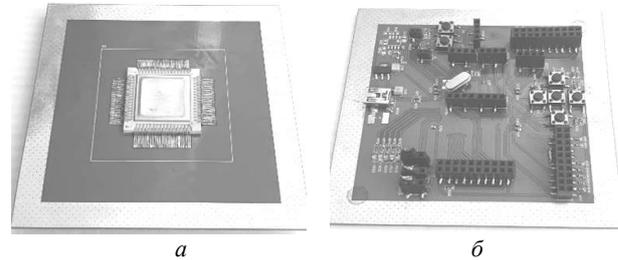


Рис. 5. Измерительная ПП с МК K1986BE91T: вид со стороны ИС (а) и компонентов (б)

Конструктивно измерительная ПП со стороны размещения МК (рис. 5) имеет сплошной полигон «земли», а с другой стороны – периферийные устройства и компоненты для его функционирования, соединенные с ним через сквозные металлизированные отверстия под корпусом МК. Края ПП содержат сплошные полигоны «земли» (без паяльной маски) для электрического контакта с корпусом ТЕМ-камеры.

Исследуемый МК программировался тестовыми задачами, задействующими определённые функциональные блоки МК, что позволило комплексно оценить уровни излучаемой помехоэмиссии МК при его максимальной нагрузке [21]. В качестве тестовой задачи для АЛУ использовалась стандартизированная задача умножения матриц, используемая в сложных вычислительных алгоритмах. Тестовая задача для АЦП обрабатывала данные от внутренних датчиков температуры и напряжения. Также тестовыми задачами формировались сигнал ШИМ таймерами с частотой 9 кГц, быстрый режим чтения входного сигнала портами и асинхронная передача данных по UART и CAN интерфейсам. Тактовый генератор МК работал с множителем на 10 от внешнего кварцевого резонатора (8 МГц) на максимальной частоте (80 МГц) тактирования МК.

Собрана установка (рис. 6) по схеме на рис. 3, включающая ТЕМ-камеру [22], ИП Rohde&Schwarz ESPR7, камеру «тепло-холод» Espec SU-262, согласованную нагрузку сопротивлением 50 Ом, АКБ и измерительную ПП с исследуемым МК K1986BE91T. Измерения $|U|(f)$ проводились по алгоритму из рис. 4. После включения внешнего источника электропитания измерительной ПП и проверки корректности функционирования МК программатором частотная зависимость $|U|(f)$, формируемая наведенными токами от МК на центральный проводник ТЕМ-камеры, измерялась на её входе ИП.

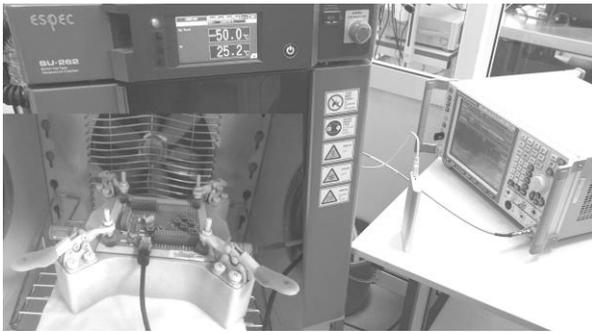


Рис. 6. Установка для измерения уровня излучаемой помехоэмиссии МК в малогабаритной ТЕМ-камере, размещенной внутри камеры «тепло-холод»

Измерены уровни излучаемой помехоэмиссии от МК в диапазонах частот 0,15–30 МГц и 0,03–1 ГГц и температур (T) от минус 50 до +150 °С. Диапазоны выбраны в соответствии с рабочими параметрами устройства, в котором предполагалось использовать МК. Измерение частотных зависимостей $|U|(f)$ проводилось с шагом 10 °С. Они представлены на рис. 7 при нормальной температуре (+20 °С) и на краях температурного диапазона минус 50 и +150 °С.

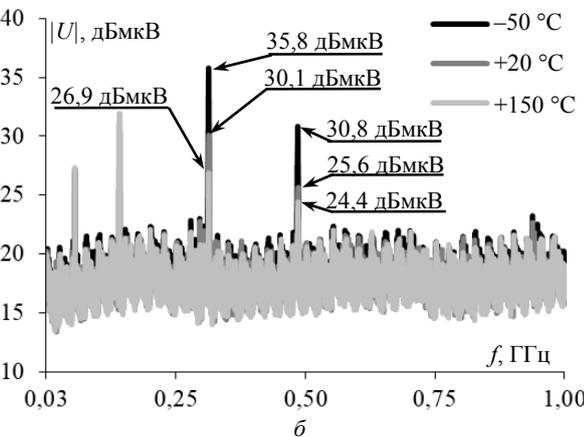
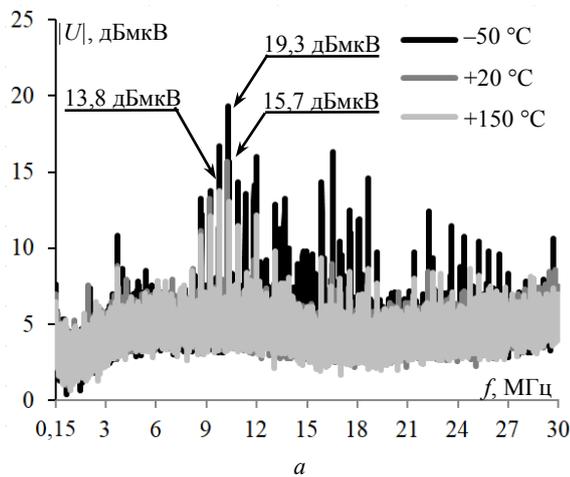


Рис. 7. Частотные зависимости $|U|$, измеренные на входе ИП для МК K1986BE91T при разных T и диапазонах частот: 0,15–32 (а) и 32–1000 (б) МГц

Из рис. 7, а виден рост уровня помехоэмиссии в диапазоне частот 8–27 МГц, что связано с формированием ШИМ-сигналов и работой блока АЛУ. При

$T = -50$ °С уровень помехоэмиссии максимален (19,3 дБмкВ вблизи 10 МГц), а рост T до +150 °С уменьшает его на 5,5 дБ до 13,8 дБ.

Из рис. 7, б виден рост уровня помехоэмиссии на 10–15 дБ на частотах выше 30 МГц, вызванный увеличением разрешения до 120 кГц в полосе частот преселектора ИП. Максимальный уровень помехоэмиссии достигает 24–36 дБ вблизи частоты тактирования МК 83 МГц и её гармоник (167, 334 и 501 МГц). Так, вблизи частоты тактирования МК 83 МГц и её 2-й гармоники (167 МГц) существенных изменений уровня и частоты излучаемой помехоэмиссии при воздействии температуры не наблюдается (рис. 8). При этом изменение уровня помехоэмиссии вблизи частоты тактирования МК (см. рис. 8, а) при воздействии на него температуры не более $\pm 0,3$ дБ и при $T = +20$ °С составляет 27,2 дБмкВ, а при температурах +150 и –50 °С – 27,5 и 26,9 дБмкВ соответственно. Аналогичное ($\pm 0,3$ дБ) изменение наблюдается вблизи 2-й гармоники от частоты тактирования (см. рис. 8, б) и при $T = -50$ °С составляет 31,6 дБмкВ, а при температурах +20 и +150 °С – 31,9 дБмкВ. Кроме того, из рис. 8 видно, что при минимальной и максимальной температурах уровень помехоэмиссии смещается вниз на 0,3–0,6 МГц относительно частоты измеренного уровня при нормальной температуре.

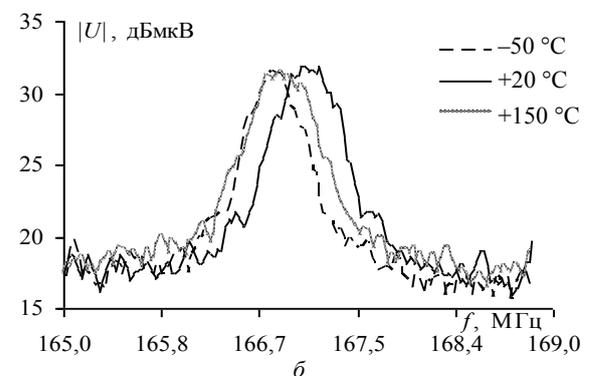
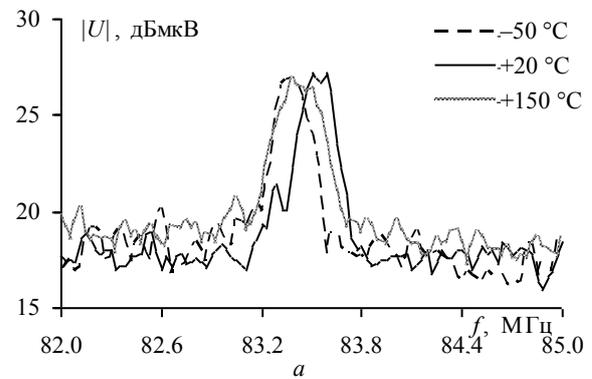


Рис. 8. Частотные зависимости $|U|$ на основной (80 МГц) и 2-й гармонике частоты тактирования МК K1986BE91T при разных температурах

Существенные различия уровней помехоэмиссии при изменении T наблюдаются на 4-й (рис. 9, а) и 6-й (рис. 9, б) гармониках частоты тактирования

МК. Так, рост T от -50 до $+20$ °С уменьшает $|U|$ с 35,8 до 30,1 дБмкВ вблизи 334 МГц и с 30,8 до 25,6 дБмкВ вблизи 501 МГц. Дальнейший рост T до $+150$ °С снижает $|U|$ с 30,1 до 26,9 дБмкВ вблизи 334 МГц и с 25,6 до 24,4 дБмкВ вблизи 501 МГц.

Детальный анализ (см. рис. 9) показал, что с ростом T от -50 до $+90$ °С уровень помехоэмиссии достигает 35,8 дБмкВ на частоте 333,7 МГц и увеличивается по частоте на 1 МГц, а его уровень снижается на 5 дБ. Дальнейший нагрев МК от $+90$ до $+150$ °С снижает частоту максимума помехоэмиссии с 334,7 до 333,1 МГц и уровень помехоэмиссии до 26,9 дБмкВ. Из рис. 9, б видно, что вблизи 6-й гармоники максимум помехоэмиссии (30,8 дБмкВ) проявляется при $T = -50$ °С и с ростом T до $+20$ °С постепенно уменьшается до 25,6 дБмкВ, при этом увеличив его по частоте (до 501,9 МГц) на 1 МГц. Рост T до $+90$ °С изначально приводит к повышению максимума на 1,6 дБ, но при дальнейшем повышении T до $+150$ °С – к его снижению до 24,4 дБмкВ, а частота снижается до 500,1 МГц. В результате наибольшее влияние на уровень излучаемой помехоэмиссии МК 1986ВЕ91Т оказывает отрицательная температура, воздействие которой приводит к его повышению на 5,7 дБ.

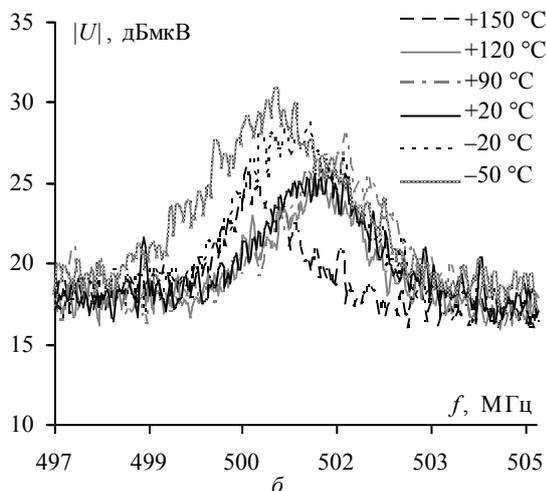
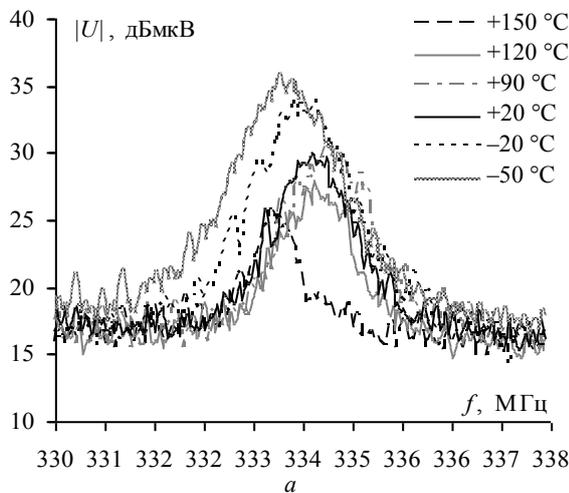


Рис. 9. Частотные зависимости максимумов $|U|$, на 4-й (а) и 6-й (б) гармониках частоты тактирования МК К1986ВЕ91Т

Заключение

Предложена методика оценки уровня излучаемой помехоэмиссии ИС при температурном воздействии, включающая алгоритм измерения с внешним циклом по температуре. На её основе исследованы уровни излучаемой помехоэмиссии МК К1986ВЕ91Т в диапазоне температур от -50 до $+150$ °С. Показано, что увеличение уровня помехоэмиссии в диапазоне частот 8–27 МГц объясняется формированием ШИМ-сигналов и работой блока АЛУ, а также частотами тактирования (80 МГц) и гармоник (до 6).

При изменении температуры от -50 до $+150$ °С максимальный уровень помехоэмиссии снижается с 19,3 до 13,8 дБмкВ в указанном диапазоне частот. На основной частоте тактирования вблизи 80 МГц и 2-й гармоники воздействие температуры не оказывает влияние на уровень помехоэмиссии МК, а его изменение не превышает $\pm 0,3$ дБ. Максимальные уровни помехоэмиссии, зависящие от температуры, наблюдаются на 4-й и 6-й гармониках частоты тактирования и составляют 35,8 и 30,8 дБмкВ на частотах 333,7 и 500,9 МГц, что выше на 5,7 и 5,2 дБ соответственно, чем измеренные уровни при нормальной температуре.

В результате уровень помехоэмиссии зависит как от выполняемых функций ИС (тестовой задачи, задействующей определенные функциональные блоки ИС), так и от токов, протекающих по межсоединениям (межсоединения кристалла ИС с электродами корпуса, корпуса и его электродов, посадочного места с электродами ИС), амплитуда которых зависит от частоты и температуры. Учет влияния межсоединений ИС имеет важное значение, поскольку для рассматриваемой ИС габариты корпуса и посадочного места велики в связи со специальным назначением ИС. В этой связи на уровни излучаемой помехоэмиссии ИС влияют не только температура и типоразмер корпуса, но и задействованные блоки, а также её топология.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Литература

- ГОСТ 30372–2017. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 58 с.
- Ramdani M. The electromagnetic compatibility of integrated circuits – Past, present, and future / M. Ramdani, E. Sicard, A. Boyer et al. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2009. – Vol. 51, No. 1. – P. 78–100.
- Mohajer-Iravani B. Reactive power radiated from the planar electromagnetic bandgap structures, a source of EMI in high speed packages / B. Mohajer-Iravani, O.M. Ramahi // IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation. – 2011. – P. 1840–1843.
- Song E. A component-level radio-frequency interference evaluation method for mobile devices / E. Song, H.H. Park // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2013. – Vol. 55, No. 6. – P. 1358–1361.
- Muccioli J.P. Predicting module level RF emissions from IC emissions measurements using a 1 GHz TEM or GTEM cell – a review of related published technical papers /

J.P. Muccioli, T.M. North, K.P. Slattery // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). – 2008. – P. 1–7.

6. Lin H.-N. Analysis of EMI effect on flash memory IC / H.-N. Lin, C.-W. Kuo, C.-K. Cheh et. al. // IEEE Int. Asia-Pacific Symp. on Electromagn. Compat. (APEMC). – 2012. – P. 757–760.

7. IEC 61967-2:2005. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz. – Part 2: Measurement of radiated emissions – TEM cell and wideband TEM cell method. – First Edit., 2005. – 43 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/6185>, свободный (дата обращения: 31.03.2024).

8. IEC 61000-4-20:2022. Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides. – 2022. – 229 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/34378> (дата обращения: 31.03.2024).

9. Park H.H. Simple shielding evaluation method of small shield cans on printed circuit boards in mobile devices // Electronics Letters. – 2013. – Vol. 49, No. 15. – P. 936–938.

10. Demakov A.V. Research of radiated emissions of a microcontroller using various power supplies / A.V. Demakov, V.A. Semenjuk, M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Novosibirsk, Russia, 2021. – P. 1–4.

11. Measurement of microcontroller radiated emissions at different operation modes / A.V. Demakov, A.V. Osintsev, V.A. Semenjuk et al. // IEEE 21th Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials. – Chelam, Russia, 2021. – P. 193–197.

12. Boyer A. Low-Cost broadband electronic coupler for estimation of radiated emission of integrated circuits in TEM-cell / A. Boyer, S. Dhia // IEEE Trans. on Electromag. Compat. – 2021. – Vol. 63, No. 2. – P. 636–639.

13. Zhang J. Source reconstruction for IC radiated emissions based on magnitude-only near-field scanning / J. Zhang, J. Fan // IEEE Trans. on Electromag. Compat. – 2017. – Vol. 59, No. 2. – P. 557–566.

14. Capriglione D. Accurate models for evaluating the direct conducted and radiated emissions from integrated circuits / D. Capriglione, A.G. Chiariello, A. Maffucci // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, No. 4. – P. 477.

15. Parker W.H. The case for combining EMC and environmental testing / W.H. Parker, W. Tustin, T. Masone // ITEM. – 2002. – P. 54–60.

16. Dhia S.B. Thermal influence on 16-bits microcontroller emission / S.B. Dhia, E. Sicard, Y. Mequignon et al. // IEEE Int. Symp. on Electromag. Compat. – 2007. – P. 1–4.

17. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2014. – Т. 34, № 4, ч. 1. – С. 39–45.

18. Dienot J.M. Dual experimental approach for thermal impacts on electromagnetic behavior of electronic circuit board configurations / J.M. Dienot, E. Batista, M. Bernard // IEEE Trans. on Instrum. and Measur. – 2008. – Vol. 57, No. 11. – P. 2405–2413.

19. Wilson P.F. On correlating TEM cell and OATS emission measurements // IEEE Trans. on Electromag. Compat. – 1995. – Vol. 37, No. 1. – P. 1–16.

20. Wilson P.F. A review of dipole models for correlating emission measurements made at various EMC test facilities / P.F. Wilson, C.L. Holloway, G. Koepke // Int. Symp. on Electromag. Compat. – 2004. – P. 898–901.

21. Осинцев А.В. Метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера на основе

аппаратного подсчета контрольной суммы / А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2022. – № 1 (25). – С. 70–78.

22. Пат. RU 2 727 075 C1, МПК H01P 1/00. ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем / Т.Р. Газизов (РФ), А.В. Демаков (РФ), М.Е. Комнатнов (РФ). – № 2019140183; заявл. 09.12.2019; опубл. 17.07.2020, Бюл. № 20. – 12 с.

Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-15, доб. 2561
Эл. почта: maxmek@mail.ru

Komnatnov M.E.

Technique for estimating the radiated emission of an integrated circuit in a TEM-cell under temperature exposure

The integrated circuits (IC) used in radioelectronic devices create electromagnetic radiation, the level of which is analyzed while ensuring electromagnetic compatibility. In real-world operating conditions, the radioelectronic devices are exposed to temperature, that affects the amplitudes and the frequencies of the radiated emission of the IC. This paper proposes a technique and an algorithm to measure the level of radiated emissions of IC at a given temperature. Using the technique, the levels of radiated emissions of the K1986VE91T microcontroller were measured in a frequency of 150 kHz – 1 GHz and the temperatures from –50 to +150 °C ranges. It is shown that at the main clocking frequency, around 80 MHz and the 2nd harmonic, the effect of temperature does not affect the level of radiated emission of the microcontroller and the change is no more than ± 0.3 dB. The operation of various microcontroller units with an increase in its temperature from minus 50 to +150 °C reduces by 5.5 dB the maximum level of radiated emission of the microcontroller in the frequency range of 8–27 MHz. The most temperature-dependent levels of radiated emission are observed up to the 6th harmonic of the clock frequency of the microcontroller and reach 35.8 dBμV, which is 5.7 dB higher than the measured level at normal temperature.

Keywords: electromagnetic compatibility, TEM-cell, radiated emissions, integrated circuit.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-30-36

References

1. GOST 30372–2017. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya*. [Electromagnetic compatibility of technical means. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 58 p. (in Russ.).

2. Ramdani M., Sicard E., Boyer A. et al. The electromagnetic compatibility of integrated circuits – Past, present, and future. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 78–100.

3. Mohajer-Iravani B., Ramahi O.M. Reactive power radiated from the planar electromagnetic bandgap structures, a source of EMI in high speed packages. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2011, pp. 1840–1843.

4. Song E., Park H.H. A component-level radio-frequency interference evaluation method for mobile devices. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 1358–1361.
5. Muccioli J.P., North T.M., Slattery K.P. Predicting module level RF emissions from IC emissions measurements using a 1 GHz TEM or GTEM cell – a review of related published technical papers. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2008, pp. 1–7.
6. Lin H.-N., Kuo C.-W., Cheh C.-K., et. al. Analysis of EMI effect on flash memory IC. *IEEE International Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, 2012, pp. 757–760.
7. *Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2*. First Ed., 2005. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication-on/6185>, free (Accessed: March 31, 2024).
8. *IEC 61000-4-20, Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-20: Testing and measurement techniques – emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides, 2022-02*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/34378> (Accessed: March 31, 2024).
9. Park H.H. Simple shielding evaluation method of small shield cans on printed circuit boards in mobile devices. *Electronics Letters*, 2013, pp. 936–938.
10. Demakov A.V., Semenjuk V.A., Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Research of radiated emissions of a microcontroller using various power supplies. *IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2021, pp. 1–4.
11. Demakov A.V., Osintsev A.V., Semenjuk V.A., Komnatnov M.E. Measurement of microcontroller radiated emissions at different operation modes. *IEEE International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 2021, pp. 193–197.
12. Boyer A., Dhia S. Low-Cost broadband electronic coupler for estimation of radiated emission of integrated circuits in TEM cell. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 636–639.
13. Zhang J., Fan J. Source reconstruction for IC radiated emissions based on magnitude-only near-field scanning. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 557–566.
14. Capriglione D., Chiariello A.G., Maffucci A. Accurate models for evaluating the direct conducted and radiated emissions from integrated circuits. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 477.
15. Parker W.H., Tustin W., Masone T. The case for combining EMC and environmental testing. *ITEM*, 2002, pp. 54–60.
16. Dhia S.B., Sicard E., Mequignon Y. et al. Thermal influence on 16-bits microcontroller emission. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 1–4.
17. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. On joint climatic and electromagnetic testing of radioelectronic equipment. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, vol. 34, no. 4, pp. 39–45 (in Russ.).
18. Dienot J.M., Batista E., Bernard M. Dual experimental approach for thermal impacts on electromagnetic behavior of electronic circuit board configurations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 57, no. 11, pp. 2405–2413.
19. Wilson P.F. On correlating TEM cell and OATS emission measurements. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 1995, vol. 37, no. 1, pp. 1–16.
20. Wilson P.F., Holloway C.L., Koepke G. A review of dipole models for correlating emission measurements made at various EMC test facilities. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2004, pp. 898–901.
21. Osintsev A.V., Komnatnov M.E. A method for detecting and correcting errors in memory circuits based on the calculation of the hash sum. *Proceedings of TUSUR University*, 2022, V. 25, no. 1, pp. 70–78 (in Russ.).
22. Demakov A.V., Komnatnov M.E., Gazizov T.R. *TEM-kamera dlya ocenki pomekhoemissii i pomek-houstojchivosti integral'nyh skhem* [TEM-cell for evaluation of radiated emission and noise immunity of integrated circuits]. Patent RF, no. 2727075, 2020.

Maxim E. Komnatnov

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-15, ext. 2561
Email: maxmek@mail.ru

УДК 621.396.624

А.П. Плёткин

Экспериментальная синхронизация системы квантовой связи

Рассматривается алгоритм обнаружения оптического сигнального импульса в процессе тактовой синхронизации системы квантового распределения ключей. Проведен обзор нескольких методов синхронизации аппаратуры квантовой связи и показано, что отличительные характеристики сводятся к значениям вероятности правильного обнаружения сигнального временного интервала, содержащего оптический импульс и среднему времени вхождения в синхронизм. Описана схема экспериментального стенда и приведены результаты натурных исследований автокомпенсационной системы квантового распределения ключей, которые показывают параметры энергетической модели процесса тактовой синхронизации при наличии дестабилизирующих факторов в квантовом канале. Поставлен эксперимент по внедрению в квантовый канал оптических ответвителей с атмосферным трактом. продемонстрирована возможность отвода части оптического излучения из канала связи в процессе тактовой синхронизации, что может быть использовано злоумышленником для внесения помех в работу системы квантового распределения ключей. Описаны возможные каналы утечки данных в общей структуре квантово-криптографических сетей.

Ключевые слова: квантовые коммуникации, квантовый ключ, фотонный импульс, вероятность обнаружения, доверенные узлы.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-37-41

Обзор литературных и патентных источников показывает, что подавляющее большинство научных исследований сосредоточено на работе квантовых протоколов в системах квантового распределения ключей (КРК), их разработке, анализе, стойкости [1–9]. Для функционирования любой системы квантовой связи, в том числе при построении сетей квантовых коммуникаций необходимо синхронизировать аппаратуру и иметь аутентифицированные каналы [10–13]. Так, при работе большинства протоколов квантового распределения ключей необходимо, чтобы отправитель и получатель однозначно идентифицировали друг друга. Аутентификация и идентификация происходят по общедоступному каналу связи. Синхронизация оптической части систем КРК требуется, например, для того, чтобы аппаратура получателя определяла, в какой момент времени прикладывать напряжение к фазовому модулятору. Рассмотрим процесс тактовой синхронизации, реализованный в системах КРК с фазовым и поляризационным кодированием. Отметим, что какое-либо воздействие на процесс синхронизации не влияет на стойкость квантового протокола или полученных ключей, но может рассматриваться как уязвимость в работе системы квантовой связи в целом.

В процессе тактовой синхронизации происходит обнаружение сигнального оптического импульса в конкретный момент времени T_0 . Например, для реализации протокола BB84 в системах КРК с фазовым кодированием длительность T_0 составляет 10 пс. Процесс поиска T_0 заключается в вычислении длины оптического пути – расстояние, которое проходит оптический импульс от отправителя к получателю, а точнее – от источника оптического излучения к фотоприемнику. Если рассматривать реализацию системы КРК с автоматической компенсацией фазы, то источник излучения и фотодетекторы конструктивно расположены в одном корпусе. Программное обеспече-

ние системы КРК дробит период следования оптических импульсов на временные интервалы T_w таким образом, чтобы длительность T_w была не больше длительности зондирующего оптического импульса T_i . Далее происходит поэтапный анализ всех интервалов T_w . Технически это реализовано пошаговым переключением счетчика фотоэлектронов по временной оси. Описывая процесс тактовой синхронизации, можно выделить два этапа:

– с заданной частотой следования и длительностью T_i осуществляется посылка импульсов. Система пошагово анализирует временные интервалы $T_w/3$ и фиксирует количество срабатываний фотодетектора в каждом из них. В процессе синхронизации фотодетекторы функционируют в линейном режиме, что позволяет исключить задержку в детектировании из-за «мертвого времени» и фиксировать все зарегистрированные фотоны. По завершении сканирования система знает количество срабатываний фотодетектора в каждом интервале T_w . На практике это выражается в числовом значении, причем разница между сигнальным интервалом и шумовым однозначно интерпретируется;

– интервал T_w с максимальными значениями и два соседних T_w разбиваются на более короткие интервалы $T_w/17$. Алгоритм анализирует не весь период T , а только временной отрезок $3T_w$. В результате второго этапа определяется интервал $T_w/17$ с максимальным числом срабатываний фотодетектора. Далее осуществляется многократный анализ найденного $T_w/17$ и уточнение длительности до значения в 10 пс.

Таким образом, в процессе тактовой синхронизации осуществляется поиск интервала, равного 10 пс, что в выражении расстояния является длиной квантового канала в метрах.

В работах [14–18] исследуются схожие алгоритмы синхронизации, отличающиеся методикой дробления и анализа периода следования. Ориги-

нальный алгоритм тактовой синхронизации использует пошаговый анализ временных интервалов. Приведенные в исследованиях алгоритмы предлагают, например, на первом этапе разделить весь период следования на два интервала. После анализа каждого из этих интервалов и выделения сигнального, разделить его еще на два и т.д. до получения искомого интервала в 10 пс.

Известно, что особенность работы ОЛФД заключается в его срабатывании при попадании первого фотона. Последующие регистрации в течение определенного времени (мертвое время) не учитываются детектором. ОЛФД необходимо время для восстановления рабочего режима. Последнее говорит о том, что мощность импульса (или количество фотонов) не влияет на факт регистрации. Как это влияет на процесс обнаружения оптического импульса в процессе синхронизации? Если ОЛФД будет активен в течение 1 с, то мы не сможем уточнить время регистрации фотона, т.е. на выходе фотодетектора будет только электрический сигнал о том, что за одну секунду было срабатывание.

Анализ работ [14–17] показывает, что сравнение исследуемых алгоритмов можно провести по двум параметрам – вероятность правильного обнаружения сигнального временного интервала и суммарное время поиска. Отметим, что приведенные в статьях данные вероятности правильного обнаружения справедливы только при определенных заданных условиях (например, при частоте темного тока фотодетектора не более 100 Гц, при строгом расположении оптического импульса в одном временном интервале и т.д.). Время вхождения в синхронизм также не может являться критерием эффективности или сравнения алгоритмов в данном случае, так как в работах приводятся весьма усредненные значения.

В исследованиях [18] рассматривается практическая система распределения квантовых ключей с непрерывной переменной (CVQKD) и процесс её синхронизации. Авторы предлагают высокопроизводительный метод синхронизации кадров для систем CVQKD, который способен работать при низких отношениях сигнал/шум (SNR) и совместим со случайным сдвигом фаз, вызванным квантовым каналом. В работе описана практическая реализация метода и проанализирована его эффективность. Суть метода заключается в регулировании длины кадра синхронизации, что позволяет работать с большим диапазоном значений SNR и увеличить рабочее расстояние квантового канала.

В наших исследованиях [19] приводится детальное описание процесса тактовой синхронизации для систем КРК с фазовым кодированием состояний фотонов и описывается эксперимент по осуществлению неклассической атаки на системы КРК. Результаты эксперимента показывают, что в процессе тактовой синхронизации возможно несанкционированное внедрение в квантовый канал с целью дальнейшего внесения помехи в работу системы на этапе формирования ключей.

Задачей исследования является демонстрация работы системы КРК при наличии несанкционированных устройств в квантовом канале.

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные стенды схем расширенного эксперимента, целью которого является демонстрация работы автокомпенсационной системы КРК с интегрированным атмосферным оптическим каналом связи (АОЛС). Суть эксперимента заключается в попытке отведения части оптической мощности из квантового канала в процессе синхронизации и распределения квантовых ключей. Особенностью натурных испытаний является то, что в качестве побочного канала используется атмосферный тракт (АОЛС, рис. 2).

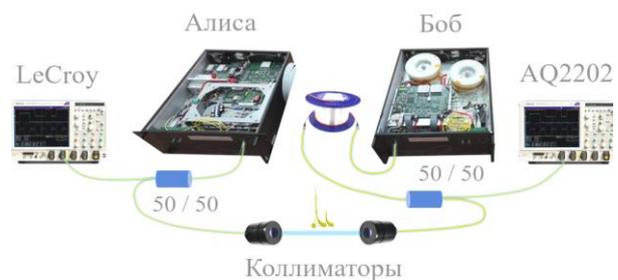


Рис. 1. Схема 1: система квантового распределения ключей Clavis²; осциллограф LeCroy 104Xs; модульная система Yokogawa AQ2202; коллиматоры с эффективным фокусным расстоянием 100 см, ВОЛС

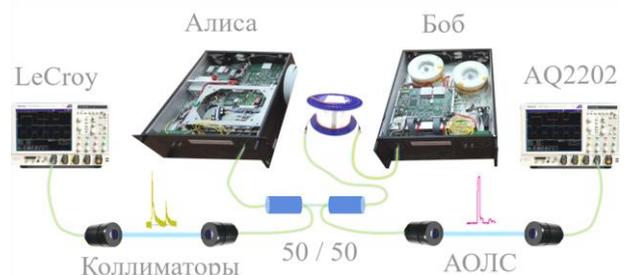


Рис. 2. Схема 2

Станции системы КРК соединены по топологии «точка-точка» и находятся на расстоянии друг от друга в 980 м. Квантовый канал выполнен из стандартного одномодового оптического волокна с типовым затуханием 0,2 дБ/км. Волоконно-оптические ответвители с коэффициентами деления 50/50 подключаются в разрыв ВОЛС так, чтобы на их входы подавались сигналы от отправителя и получателя. К выходам ответвителей подключены коллиматоры, которые установлены на расстоянии в 1 м.

В схеме 1 часть волоконно-оптического квантового канала заменяется на атмосферный. Наблюдения в течение 30 циклов работы (от задания параметров синхронизации до формирования квантового ключа) системы КРК показывают, что процесс тактовой синхронизации и работа квантового протокола протекают в стандартном режиме. Уровень квантовых ошибок не превышает критический. Другими словами, наличие ответвителей и атмосферного канала не влияют на нормальное функционирование систем КРК.

В схеме 2 коллиматоры подключены таким образом, чтобы отводить 50% оптической мощности на аппаратуру анализа. Отвод оптической мощности производится как при прямом прохождении сигнала, так и при обратном (отраженного от зеркала Фарадея). В такой схеме наблюдения также показывают стабильную работу системы КРК во всех режимах. Схема 2 дает возможность зафиксировать моменты регистрации оптических сигналов при прямом и обратном распространении, что может быть полезным злоумышленнику, например, для вычисления удаленности станции получателя. Использование рефлектометра (при подключении на входы ответвителей) позволит провести детальный энергетический анализ всего квантового канала.

Отметим, что калибровка коллиматоров производилась ручным способом без каких-либо специальных приспособлений, а сами коллиматоры доступны в открытой продаже и также не являются специализированным или дорогостоящим оборудованием.

Выводы и дискуссия

В данной статье мы рассмотрели алгоритм обнаружения оптического сигнального импульса в процессе тактовой синхронизации системы квантового распределения ключей. Провели обзор нескольких методов синхронизации аппаратуры квантовой связи и показали отличия. Проанализировали алгоритмы тактовой синхронизации, которые используются или предлагаются к использованию в системах квантовой связи. Известно, что эффективность алгоритмов синхронизации можно оценить по нескольким параметрам, таким как вероятность правильного обнаружения сигнального временного интервала и общее время вхождения в синхронизм. В статье мы не рассматриваем количественные значения данных параметров, но приводим ссылки на материалы, где они описаны.

Показали этапы работы алгоритма обнаружения оптического импульса на примере автокомпенсационной системы квантового распределения ключей. Описали эксперимент по внедрению в квантовый канал оптических ответвителей с атмосферным трактом. Продемонстрировали возможность отвода части оптического излучения из канала связи в процессе тактовой синхронизации. Внедрение в канал связи может быть использовано злоумышленником для внесения помех в работу системы квантового распределения ключей.

Поясним, что используемые в описываемых системах КРК ОЛФД функционируют как в линейном режиме, так и в режиме Гейгера. Так, в процессе синхронизации ОЛФД функционируют в линейном режиме, а в процессе работы квантового протокола они переводятся в режим Гейгера (одиночного счета фотонов).

Описывая возможные каналы утечки данных в общей структуре квантово-криптографических сетей, можно выделить несколько «слабых», на наш взгляд, мест:

– Каналы взаимодействия между станцией системы КРК и сервером, сервером и СКЗИ и т.д. Часто

это патч-корды USB или RJ45. Эти отрезки кабеля не защищены от НСД, и если предположить, что к ним есть доступ, то возможен несанкционированный съем данных. Эти же каналы утечки можно рассмотреть в отношении сервера, обеспечивающего работу системы КРК. Если рассматривать надежность и защищенность вспомогательного оборудования, то необходимо предусмотреть периодический анализ помещения на предмет утечек по побочным каналам (в том числе ПЭМИН). В магистральных сетях с использованием ДПУ необходимо, в зависимости от метода распределения квантовых ключей и шифрования информации, разрабатывать специальные мероприятия по обнаружению возможных каналов утечки данных в помещениях ДПУ.

– ВОЛС или канал синхронизации. Когда мы говорим об уязвимостях в сетях КРК, то чаще всего подразумевается взлом квантовых ключей (квантовых протоколов). Исследования и практическое использование систем КРК показывают, что не менее важным является обеспечение защищенности каналов синхронизации и аутентификации. Такие каналы в зависимости от схемы КРК могут быть реализованы, например, в волокне, по которому происходит формирование квантовых ключей. Проведенный эксперимент показывает, что для внедрения в квантовый канал не требуется специальной дорогостоящей аппаратуры или специализированных знаний. Достаточно навыков сварки оптического волокна и умения обращаться с осциллографом. Модель злоумышленника в данном случае трансформируется из высококлассного специалиста в рядового исполнителя. Отметим, что целью атаки на систему или сеть КРК может являться контролируемая помеха, которую атакующий применяет в определенные моменты времени (например, при передаче секретной информации).

Для начала взаимодействия между отправителем и получателем должен быть реализован аутентифицированный канал связи. Это крайне важное условие, влияющее на защищенную реализацию сети в целом. В частности, актуальным вопросом является осуществление надежной и защищенной аутентификации в отсутствие квантовых ключей.

В книге [20] детально рассматриваются вопросы идентификации и аутентификации в цифровом пространстве. Интересными представляются работы [21–23], которые предлагают протокол квантового распределения ключей через открытое пространство. Протокол, кроме ограничений квантовой механики на различимость неортогональных квантовых состояний, использует дополнительные ограничения, диктуемые специальной теорией относительности. В отличие от всех существующих протоколов квантового распределения ключей, данный протокол обеспечивает секретность ключей при не строго однофотонном источнике квантовых состояний и произвольной длине квантового канала связи.

В заключение можно сделать акцент на том, что реализация квантово-криптографических сетей в идеальном варианте исполнения возможна, но требует тщательной подготовки и постоянного монито-

ринга всех компонентов сети. Системы квантового распределения ключей активно используются, но их техническая реализация ещё нуждается в совершенствовании. Квантовые сети большой длины и смешанной топологии уже эксплуатируются, но детальное описание алгоритмов, используемых узлов, методов и компонентов в литературе отсутствует. Вектор развития технологии КРК направлен на преодоление барьера ограниченной длины квантового канала, развитие интегральной фотоники, атмосферных (космических) и подводных систем квантовой связи.

Литература

1. Quantum cryptography / N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden // *Reviews of Modern Physics*. – 2002. – Vol. 74, No. 1. – P. 145–195.
2. Bennett C.H. Quantum Cryptography / C.H. Bennett, G. Brassard, A.K. Ekert // *Scientific American*. – No. 267 (4). – P. 50–57.
3. Кулик С.П. Квантовая криптография // *Фотоника*. – 2010. – № 2. – С. 36–41.
4. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems // *The Bell System Technical Journal*. – 1949. – Vol. 28, No. 4. – P. 656–715.
5. Vernam G.S. Cipher printing telegraph systems: For secret wire and radio telegraphic communications // *Journal of the AIEE*. – 1926. – Vol. 45 (2). – P. 109–115.
6. Deng F.G. Secure direct communication with a quantum one-time pad / F.G. Deng, G.L. Long // *Physical Review*. – 2004. – Vol. A. 69 (5). – P. 052319.
7. Деев А.Д. Квантовые коммуникации через атмосферные (космические) каналы связи / А.Д. Деев, А.А. Калинин, С.П. Кулик // *Интернет изнутри*. – 2024. – № 20. – С. 43–47.
8. Зякин Е.В. Перспективные протоколы КРК для оптической связи в свободном пространстве / Е.В. Зякин, А.В. Молоканов, К.М. Чуриков // *Новые технологии. Наука, техника, педагогика*. – 2024. – С. 141–148.
9. Zhao Y. Quantum hacking: Experimental demonstration of time-shift attack against practical quantum-key-distribution systems / Y. Zhao, C.H.F. Fung, B. Qi, C. Chen, H.K. Lo // *Phys. Rev.* – 2008. – Vol. A 78 (4). – P. 042333.
10. Chen Y.A. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres // *Nature*. – 2021. – Vol. 589, No. 7841. – P. 214–219.
11. Beals T.R. Distributed relay protocol for probabilistic information-theoretic security in a randomly-compromised network / T.R. Beals, B.C. Sanders // *Information Theoretic Security: Third International Conference ICITS 2008*. – Canada, Calgary, 2008. – P. 29–39.
12. Dianati M. Architecture of the Secoqc quantum key distribution network / M. Dianati, R. Alleaume // *First International Conference on Quantum, Nano, and Micro Technologies (ICQNM'07)*. – IEEE. – 2007. – P. 13.
13. Barnett S.M. Securing a quantum key distribution relay network using secret sharing / S.M. Barnett, S.J.D. Phoenix // *Conference and Exhibition (GCC)*. – IEEE. – 2011. – P. 143–145.
14. Румянцев К.Е. Вероятностные характеристики алгоритма обнаружения синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом / К.Е. Румянцев, П.Д. Миронова // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2023. – № 3 (233). – С. 96–107.
15. Миронова П.Д. Алгоритм обнаружения синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей Всерос. науч.-техн. конф.* – Таганрог: ЮФУ, 2023. – P. 52–53.
16. Pljonkin A. Synchronization in quantum key distribution systems / A. Pljonkin, K. Romyantsev, P.K. Singh // *Cryptography*. – 2017. – No. 1. – P. 18.
17. Румянцев К.Е. Синхронизация системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости / К.Е. Румянцев, А.П. Плёнкин // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 8. – С. 81–96.
18. Lin D. High performance frame synchronization for continuous variable quantum key distribution systems // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, No. 17. – P. 22190–22198.
19. Nonclassical attack on a quantum keydistribution system / A. Pljonkin, D. Petrov, L. Sabantina, K. Dakhkilgova // *Entropy*. – 2021. – Vol. 23, No. 5.
20. Сабанов А. Г. Идентификация и аутентификация в цифровом мире / А.Г. Сабанов, А.А. Шелупанов. – М.: Горячая Линия – Телеком. – 2022.
21. Пат. 2667755 РФ, МПК H04L9/08. Система релятивистской квантовой криптографии / Кравцов К.С. и др. (РФ). – № 2017117184; заявл. 05.17.2017; опубл. 24.09.2024.
22. Кулик С.П. Комбинированный фазово-временной метод кодирования в квантовой криптографии / С.П. Кулик, С.Н. Молотков, А.П. Маккаев // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2007. – Т. 85, № 5-6. – С. 354–359.
23. Шурупов А.П. Квантовое распределение ключа на бифотонах-куквартах с проверочными состояниями / А.П. Шурупов, С.П. Кулик // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2008. – Т. 88, № 9-10. – С. 729–733.

Плёнкин Антон Павлович

Канд. техн. наук, доцент каф. информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета Чехова ул., 2, г. Таганрог, Россия, 347900
Scopus: 57190492977
ORCID: 0000-0001-6713-9347
Тел.: +7-905-459-21-58
Эл. почта: pljonkin@sfedu.ru

Pljonkin A.P. Experimental Synchronization of a Quantum Communication System

The article considers an algorithm for detecting an optical signal pulse during the clock synchronization of a quantum key distribution system. Several methods for synchronizing quantum communication equipment are reviewed and it is shown that the distinctive characteristics are reduced to the values of the probability of correctly detecting a signal time interval containing an optical pulse and the average time of entering synchronization. The scheme of the experimental setup is described and the results of full-scale studies of the autocompensation quantum key distribution system are presented. The results show the parameters of the energy model of the clock synchronization process in the presence of destabilizing factors in the quantum channel. An experiment was conducted to introduce optical couplers with an atmospheric path into the quantum

channel. The possibility of diverting part of the optical radiation from the communication channel during clock synchronization is demonstrated, which can be used by an intruder to interfere with the operation of the quantum key distribution system. The possible data leakage channels in the general structure of quantum cryptographic networks are described.

Keywords: quantum communications, quantum key, photon pulse, detection probability, trusted nodes.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-37-41

References

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography. *Reviews of Modern Physics*. 2002. vol. 74, no. 1, pp. 145–195.
2. Bennett C.H., Brassard G., Ekert A.K. Quantum Cryptography. *Scientific American*, 1992, no. 267 (4), pp. 50–57, <http://www.jstor.org/stable/24939253>
3. Kulik S. Quantum cryptography. *Photonica*. 2010, no. 2, pp. 36–41.
4. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems. *The Bell System Technical Journal*, Oct. 1949, vol. 28, no. 4, pp. 656–715, doi: 10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x.
5. Vernam G.S. Cipher printing telegraph systems: For secret wire and radio telegraphic communications. *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, 1926, vol. 45 (2), pp. 109–115.
6. Deng F.G., Long G.L. Secure direct communication with a quantum one-time pad. *Physical Review*, 2004, Vol. A 69 (5), p. 052319.
7. Quantum communications through atmospheric (space) communication channels / A.D. Deev, A.A. Kalinkin, S.P. Kulik // *Internet Inside*, 2024, pp. 20, pp. 43–47.
8. Zyakin E.V. Promising QKD protocols for optical communications in free space / E.V. Zyakin, A.V. Molokanov, K.M. Churikov // *New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics: Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference*, Moscow, 2024, pp. 141–148.
9. Zhao Y., Fung C.H.F., Qi B., Chen C., Lo H.K. Quantum hacking: Experimental demonstration of time-shift attack against practical quantum-key-distribution systems. *Physical Review*, 2008, vol. A 78 (4), p. 042333.
10. Chen Y.A. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres // *Nature*, 2021, no. 7841, pp. 214–219.
11. Beals T.R., Sanders B.C. Distributed relay protocol for probabilistic information-theoretic security in a randomly-compromised network // *Information Theoretic Security: Third International Conference, ICITS 2008, Calgary, Canada, August 10-13, 2008. Proceedings 3*. Berlin Heidelberg, Springer, 2008, pp. 29–39.
12. Dianati M., Alléaume R. Architecture of the Secoqc quantum key distribution network // *2007 First International Conference on Quantum, Nano, and Micro Technologies (IC-QNM'07)*. IEEE, 2007, pp. 13.
13. Barnett S.M., Phoenix S.J.D. Securing a quantum key distribution relay network using secret sharing // *2011 IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC)*. IEEE, 2011, pp. 143–145.
14. Rumyantsev K.E., Mironova P.D. Probabilistic characteristics of the algorithm for detecting synchronization signals based on the selection of an adjacent pair of segments with the maximum total count // *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2023, no. 3 (233), pp. 96–107. doi: 10.18522/2311-3103-2023-3-96-107.
15. Mironova, P.D. Algorithm for detecting synchronization signals based on selecting an adjacent pair of segments with the maximum total count // *Fundamental and Applied Aspects of Computer Technology and Information Security: Collection of Articles of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Taganrog, April 10–15, 2023*. Taganrog, Southern Federal University, 2023, pp. 52–53.
16. Pljonkin A., Rumyantsev K., Singh P.K. Synchronization in quantum key distribution systems. *Cryptography*. 2017, pp. 18. doi:10.3390/cryptography1030018.
17. Rumyantsev K.E., Plenkin A.P. Synchronization of the quantum key distribution system using photon pulses to increase security. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2014, No. 8, pp. 81–96.
18. Lin D. et al. High performance frame synchronization for continuous variable quantum key distribution systems // *Optics Express*, 2015, vol. 23, no.17, pp. 22190–22198.
19. Nonclassical attack on a quantum keydistribution system / A. Pljonkin D. Petrov L. Sabantina K. Dakhkilgova // *Entropy*, 2021, vol. 23, no. 5, doi: 10.3390/e23050509.
20. Sabanov A.G., Shelupanov A.A. *Identification and authentication in the digital world*. Moscow, Hot Line-Telecom, 2022.
21. Kravtsov K.S. et al. [Relativistic quantum cryptography system]. Patent RF, no. 2667755, 2024/
22. Kulik S.P., Molotkov S. N., Makkaveev A.P. Combined phase-time coding method in quantum cryptography. *Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2007, vol. 85, pp. 354–359.
23. Shurupov A.P., Kulik S.P. Quantum key distribution on biphotons-quarks with test states. *Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2008, vol. 88, no. 9-10, pp. 729–733.

Anton P. Pljonkin

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor, Department of Information Security of Telecommunication Systems, Institute of Computer Technologies and Information Security, Southern Federal University
2, Chekhova st., Taganrog, Russia, 347900
Scopus: 57190492977
ORCID: 0000-0001-6713-9347
Phone: +7-905-459-21-58
Email: pljonkin@sfned.ru

УДК 53.088

С.А. Подлиннов, А.В. Фатеев, Д.С. Растрьгин

Экстракция результатов измерения комплексного коэффициента отражения радиопоглощающего материала фильтром с переменной полосой пропускания

Приводится модифицированный метод экстракции результатов измерения комплексного коэффициента отражения радиопоглощающих материалов в квадратной коаксиальной измерительной линии передачи фильтром с переменной полосой пропускания.

Ключевые слова: фильтр с переменной полосой пропускания, квадратная коаксиальная измерительная линия передачи, комплексный коэффициент отражения.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-42-47

Коэффициент отражения является основным параметром, характеризующим электрические свойства радиопоглощающих материалов (РПМ). Измерения коэффициента отражения радиопоглощающих материалов проводятся в широкой полосе частот как в открытом пространстве, так и в закрытых линиях передачи.

Проведение процедуры исключения характеристик коаксиальной измерительной линии передачи является непростой задачей, по причине отсутствия эталонных мер для проведения стандартной процедуры однопортовой векторной коррекции измеренных данных. При исключении параметров измерительного приспособления в нестандартных сечениях обычно применяют фильтр с фиксированной полосой пропускания [1].

В [2, 3] представлены измерительная установка в виде квадратной коаксиальной линии передачи (КИЛ) и способ получения коэффициента отражения РПМ при помощи фильтра с последующей нормировкой на меру полного отражения. На рис. 1 приведена фотография прототипа КИЛ для проведения измерений комплексного коэффициента отражения и испытания на высокую мощность одиночных образцов РПМ с размерами основания 500×500 мм.



Рис. 1. Фотография прототипа КИЛ для измерения одиночных образцов РПМ

При проведении экстракции измеренных данных применяют фильтр с фиксированной полосой пропускания, что неизбежно влечет наличие в полосе пропускания паразитных отражений от неоднородностей, проявляющихся с ростом частоты.

В статье представлен модифицированный способ эффективного исключения параметра измерительного приспособления фильтром с переменной полосой пропускания.

Квадратная коаксиальная измерительная линия передачи

Установка для измерений коэффициента отражения РПМ в диапазоне частот от десятка до нескольких сотен мегагерц представляет собой квадратную коаксиальную линию передачи. КИЛ состоит из: разъема стандартного сечения для подключения векторного анализатора цепей (ВАЦ); участка плавного перехода от волнового сопротивления ВАЦ к волновому сопротивлению линейного участка линии передачи; участка квазиоднородной линии передачи с волновым сопротивлением 60 Ом и оконечной нагрузки в виде пластины короткого замыкания. Участок квазиоднородной линии передачи содержит диэлектрические опоры, обеспечивающие положение центрального проводника относительно внешнего проводника квадратной коаксиальной линии передачи. Диэлектрические опоры состоят из радиопрозрачного материала с полным заполнением между внешним и центральным проводниками.

На рис. 2 приведено продольное сечение квадратной коаксиальной измерительной линии передачи с расположением диэлектрических опор вдоль линейного участка КИЛ.

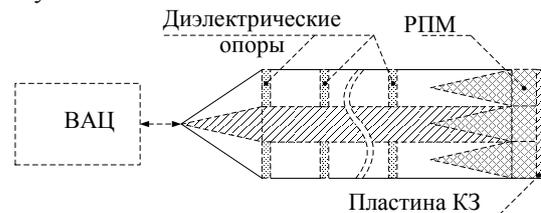


Рис. 2. Продольное сечение КИЛ с диэлектрическими опорами

Длина линейного участка равна длине волны на частоте достоверных данных измерения коэффициента

ента отражения РПМ. Исследуемый образец радиопоглощающего материала устанавливается непосредственно на пластину короткого замыкания. На рис. 3 приведена фотография нагрузки КИЛ в виде РПМ, установленного на пластину короткого замыкания.



Рис. 3. Фотография нагрузки в виде РПМ, размещенного в полноразмерную КИЛ

Математическая модель квадратной коаксиальной измерительной линии передачи

КИЛ состоит из основных блоков, которые можно представить как каскадное подключение четырехполюсников. Полную математическую модель можно получить посредством матриц передачи. На рис. 4 приведена функциональная схема КИЛ без нагрузки.



Рис. 4. Функциональная схема КИЛ без нагрузки:

1 – входная цепь с волновым сопротивлением генератора; 2 – трансформатор поперечного сечения и волнового сопротивления; 3 – линейный участок измерительной линии передачи

Воспользуемся аппаратом матриц передачи [4] при каскадном подключении четырехполюсников для описания функциональной схемы измерительной линии передачи, как показано в формуле (1):

$$\mathbf{T}_{\text{КИЛ}} = \prod_i \mathbf{T}_i, \quad (1)$$

где \mathbf{T}_i – матрица передачи отдельной i -й секции измерительной линии передачи; $\mathbf{T}_{\text{КИЛ}}$ – матрица передачи квадратной коаксиальной измерительной линии передачи.

Тогда отдельно взятый участок линии передачи можно записать в виде выражения (2):

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cosh(\dot{\gamma}L) + A \times \frac{\sinh(\dot{\gamma}L)}{2} & -B \times \frac{\sinh(\dot{\gamma}L)}{2} \\ B \times \frac{\sinh(\dot{\gamma}L)}{2} & \cosh(\dot{\gamma}L) - A \times \frac{\sinh(\dot{\gamma}L)}{2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $A = \left(\frac{Z_l}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_l} \right)$; $B = \left(\frac{Z_l}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_l} \right)$; Z_0 – волновое сопротивление генератора, Ом; Z_l – волновое сопротивление участка линии передачи, Ом; L – длина участка линии передачи, м; $\dot{\gamma} = \alpha_{\text{диэл.}} + j\beta$ – постоянная распространения линии передачи.

Постоянную распространения, с учетом потерь в диэлектрике можно записать в виде выражения (3):

$$\dot{\gamma} = 2\pi f \sqrt{\frac{\dot{\epsilon} \cdot \dot{\epsilon}_0 \cdot \dot{\mu} \cdot \dot{\mu}_0}{2}} \times \sqrt{1 - \text{tg} \left[\frac{\text{Im}(\dot{\epsilon})}{\text{Re}(\dot{\epsilon})} \right]} \times \text{tg} \left[\frac{\text{Im}(\dot{\mu})}{\text{Re}(\dot{\mu})} \right] - 1 + j \times \frac{2\pi f}{c} \times \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \dot{\mu}}, \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}$ – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость; $\dot{\mu}$ – комплексная относительная магнитная проницаемость; f – частота, Гц; c – скорость света в вакууме, м/с.

Выражение (4) описывает потери в металле:

$$\alpha_{\text{мет.}} = \frac{1,987 \cdot \sqrt{f} \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\sigma} \cdot 120\pi d} \times \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \dot{\mu}}, \quad (4)$$

где σ – удельная поверхностная проводимость проводника, См; d – размер центрального проводника квадратной коаксиальной линии передачи, м.

Резльтирующее выражение для описания частотных характеристик квадратной коаксиальной линии передачи можно представить в виде выражения (5):

$$\mathbf{T}_{\text{КИЛ}} = \mathbf{T}_{Z=50 \text{ Ом}} \times \prod_{i=0}^{i=N} \left(\mathbf{T}_{Z_i=50+i\frac{10}{N}} \right) \times \prod_i \left(\mathbf{T}_{\text{д.опора}} \cdot \mathbf{T}_{Z=60 \text{ Ом}} \right), \quad (5)$$

где $\mathbf{T}_{Z=50 \text{ Ом}}$ – матрица передачи коаксиального перехода с волновым сопротивлением 50 Ом; $Z_i = 50 + i \frac{10}{N}$ – изменение волнового сопротивления ступенчатого трансформатора; $\mathbf{T}_{\text{д.опора}}$ – матрица передачи диэлектрической опоры; $\mathbf{T}_{Z=60 \text{ Ом}}$ – матрица передачи линейного участка линии передачи с волновым сопротивлением 60 Ом.

Аналогичным выражению (5) можно математически описать частотные характеристики РПМ в виде формулы (6) через ступенчатое изменение комплексной диэлектрической проницаемости от воздуха до диэлектрической проницаемости диэлектрика с электрическими потерями.

$$\mathbf{T}_{\text{РПМ}} = \prod_{i=0}^{i=N} \mathbf{T}(\dot{\epsilon}_i). \quad (6)$$

Комплексный коэффициент отражения РПМ можно получить из формулы (7):

$$\dot{\Gamma}_{\text{РПМ}} = \frac{(\mathbf{T}_{\text{РПМ}})_{2,1} + (\mathbf{T}_{\text{РПМ}})_{2,2} \times \dot{\Gamma}_{\text{КЗ}}}{(\mathbf{T}_{\text{РПМ}})_{1,1} + (\mathbf{T}_{\text{РПМ}})_{1,2} \times \dot{\Gamma}_{\text{КЗ}}}, \quad (7)$$

где $\dot{\Gamma}_{\text{КЗ}}$ – комплексный коэффициент отражения пластины короткого замыкания, $\dot{\Gamma}_{\text{КЗ}} = -1$; $\mathbf{T}_{\text{РПМ}}$ – матрица передачи РПМ при каскадном соединении диэлектриков с потерями.

Структура рассчитываемого РПМ представлена на рис. 5.

Волновое сопротивление сечения квадратной коаксиальной линии передачи можно найти с помощью выражения

$$Z_l = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon}} \times \frac{1}{4 \left(\frac{2d}{D-d} + 0,558 \right)}, \quad (8)$$

где D – размер стороны квадрата внешнего проводника квадратной коаксиальной линии передачи, м.

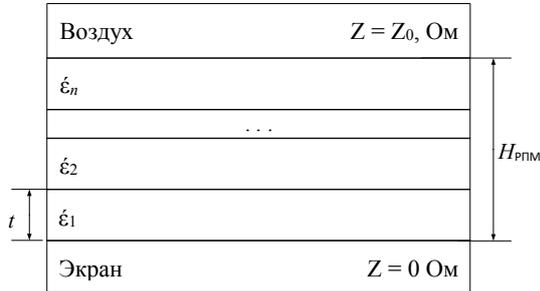


Рис. 5. Представление РППМ в виде ступенчатого изменения комплексной относительной диэлектрической проницаемости; t – толщина одного слоя; n – количество слоев; $H_{РППМ}$ – высота исследуемого образца РППМ

На рис. 6 представлена схема измерительной установки в виде потокового графа измерительной системы. В данном случае ВАЦ с учтенными систематическими ошибками.

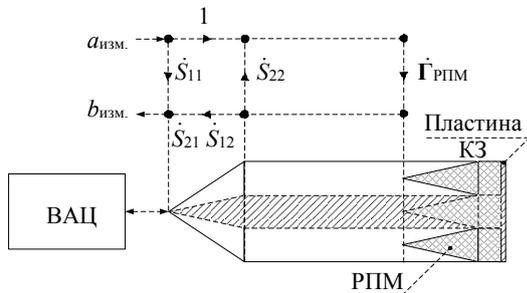


Рис. 6. Функциональная схема КИЛ.

Приемники волн: $a_{изм}$ – падающей; $b_{изм}$ – отраженной; $S_{л,м}$ – параметры рассеяния КИЛ

Согласно рис. 6, параметрами измерительного приспособления являются параметры рассеяния КИЛ, которые можно исключить при помощи фильтрации с последующей нормировкой на меру полного отражения. На рис. 7 представлен потоковый граф измерительной системы после фильтрации измеренного коэффициента отражения КИЛ.



Рис. 7. Потоковый граф измерительной системы: g – комплексная импульсная характеристика фильтра; (*) – символ свертки

Выражение, описывающее получение коэффициента отражения РППМ при помощи фильтрации измеренных данных фильтром с фиксированной полосой пропускания [5] с последующей нормировкой и переносом опорной плоскости, можно записать в следующем виде:

$$\dot{\Gamma}(f)_{РППМ} = \frac{\dot{g} * \dot{\Gamma}_{изм}(f)_{РППМ}}{\dot{g} * \dot{\Gamma}_{изм}(f)_{КЗ}} \cdot e^{-j \times \left[\frac{4\pi H_{РППМ} f}{c} - \pi \right]}, \quad (9)$$

где $\dot{\Gamma}_{изм}(f)_{РППМ}$ – измеренный комплексный коэффициент отражения КИЛ с радиочастотным поглотителем, раз; $\dot{\Gamma}_{изм}(f)_{КЗ}$ – измеренный комплексный коэффициент отражения КИЛ с пластиной короткого замыкания как эталон отражательной способности, раз; $\dot{\Gamma}(f)_{РППМ}$ – комплексный коэффициент отражения от РППМ, раз; \dot{g} – комплексная импульсная характеристика фильтра с фиксированной полосой пропускания.

При проведении фильтрации полоса фильтра выбирается согласно правилу: длина линейного участка не меньше длины волны для каждой частотной точки [6], как показано на рис. 8.

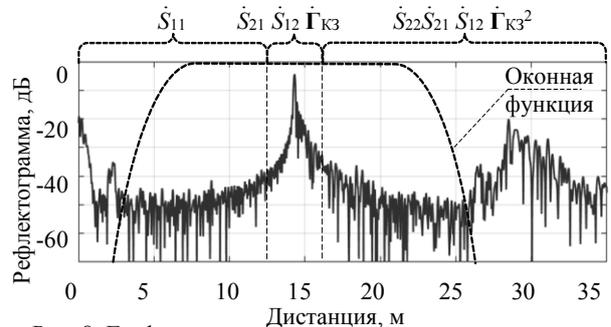


Рис. 8. Графическое представление полосы пропускания фильтра на рефлектограмме [5]

Из преимуществ применения фильтрации измеренных данных с последующей нормировкой на меру полного отражения можно отметить следующие: для реализации алгоритма необходимо минимальное количество мер, возможность применения алгоритма в трактах нестандартного сечения для получение достоверных результатов измерения коэффициента отражения РППМ.

Недостатком алгоритма является применение фильтра с фиксированной полосой пропускания, что в задаче фильтрации широкополосных устройств влечет ошибки обработки измеренных данных. Под широкополосностью понимается коэффициент перекрытия по частоте больше 1,25 [7]. При выборе полосы пропускания фильтра нужно учитывать тот факт, что минимальная полоса пропускания соответствует длине волны на нижней частоте измерений, а минимальная полоса пропускания ограничена удвоенной высотой образца РППМ, положение центра окна соответствует положению пластины короткого замыкания.

Описанный метод обработки измеренных данных не позволяет эффективно подавлять отражения,

возникающие с ростом частоты и попадающие в полосу пропускания фильтра, что является основанием к разработке модифицированного метода обработки измеренных данных КИЛ, нагруженную на РПМ.

Экстракция результатов измерений фильтром с переменной полосой пропускания

Существует класс фильтров с переменными параметрами, или адаптивные фильтры [8, 9]. Особенностью адаптивных фильтров является наличие в качестве обратной связи сигнала ошибки и известный желаемый результат. В данном случае характеристики радиопоглощающего материала заранее не известны. Перед разработкой нового метода обработки измеренных данных необходимо сформировать требования к разрабатываемому фильтру с переменной полосой пропускания. Фильтр должен обладать следующими свойствами: параметры фильтра должны меняться в зависимости от входных данных на каждой частоте измерения; в качестве переменных параметров могут выступать ширина окна и коэффициент прямоугольности; центр полосы пропускания фильтра остается фиксированным и равным положению пластины короткого замыкания.

Функциональную схему предложенного фильтра можно представить в виде свертки измеренных данных с переменной импульсной характеристикой, как показано на рис. 9.

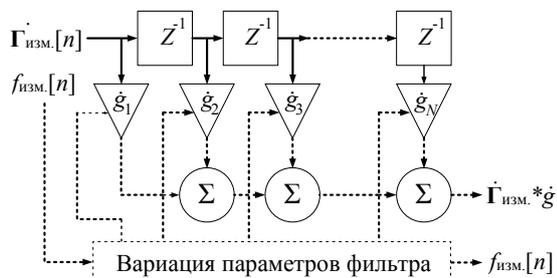


Рис. 9. Функциональная схема фильтра с переменной полосой пропускания: \hat{g}_i – варьируемые члены импульсной характеристики фильтра

Верификацию предложенного алгоритма экстракции измеренных данных можно провести на основе математического моделирования КИЛ, нагруженную на рассогласованную нагрузку.

Моделирование измерительной системы и анализ полученных результатов

На основе формул (1)–(9) построена математическая модель измерительной системы, состоящей из следующих модулей: КИЛ с длиной линейного участка, равной 10 м, и диэлектрическими опорами каждые 1 м; в качестве нагрузки выступает математическая модель рассогласованной нагрузки. Пространство на расстоянии 2,8 м от пластины короткого замыкания не имеет диэлектрических опор. Диэлектрическая проницаемость диэлектрических опор была выбрана равной 1,04, что соответствует пенополистиролу [10].

Ниже представлены результаты обработки двумя алгоритмами экстракции результатов моделирования КИЛ, нагруженной на рассогласованные нагрузки с

переменным коэффициентом отражения, меняющимся от -50 до 0 дБ.

Оценку эффективности работы предложенного алгоритма экстракции результатов измерения можно провести посредством определения невязки математической обработки результатов моделирования или измерения и известной характеристики нагрузки. Невязку можно определить по следующей формуле:

$$e(\hat{\Gamma}) = z(\hat{\Gamma}) - \hat{z}(\hat{\Gamma}), \quad (10)$$

где $z(\hat{\Gamma})$ – коэффициент отражения РПМ, полученный посредством предложенного алгоритма, раз; $\hat{z}(\hat{\Gamma})$ – известная характеристика РПМ, раз.

Зависимость невязки модуля (МКО) и фазы (ФКО) коэффициента отражения рассогласованной нагрузки приведены на рис. 10–11. В качестве значения невязки выбиралось худшее значение в полосе моделирования от 30 до 1000 МГц.

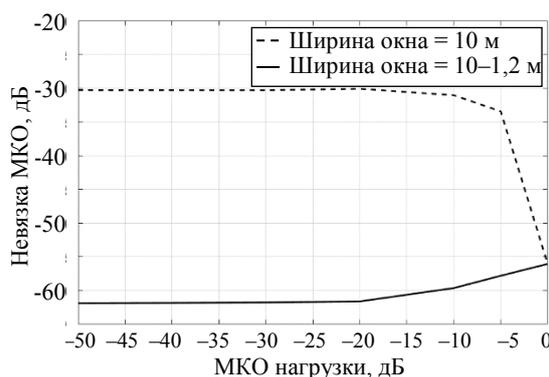


Рис. 10. Сравнительные графики невязки модуля коэффициента отражения РПМ

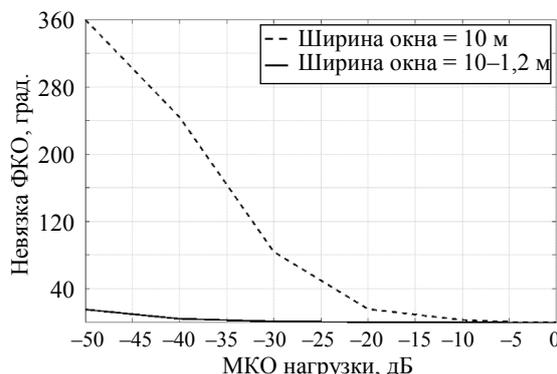


Рис. 11. Сравнительные графики невязки фазы коэффициента отражения РПМ

Исходя из рис. 10, можно заключить, что разработанный метод экстракции результатов измерения коэффициента отражения РПМ минимизирует погрешность обработки измеренных данных не хуже чем на 25 дБ по модулю коэффициента отражения.

Согласно рис. 11, предложенный метод позволяет обеспечить доверительный интервал обработки измеренных данных по фазе коэффициента отражения ± 8 град в диапазоне коэффициента отражения нагрузки от -50 до 0 дБ. С ростом частоты растут невязка модуля и фазы коэффициента отражения.

На рис. 12, 13 представлены сравнительные графики модуля и фазы коэффициента отражения измеренного РПМ в квадратной коаксиальной линии передачи, обработанного при помощи двух алгоритмов экстракции результатов измерения: фильтром с фиксированной полосой пропускания и фильтром с переменной полосой пропускания. Характеристики РПМ, представленные на рис. 12, 13, были получены в результате математического моделирования по формулам (6), (7), а обработка проводилась на основе измеренных данных.

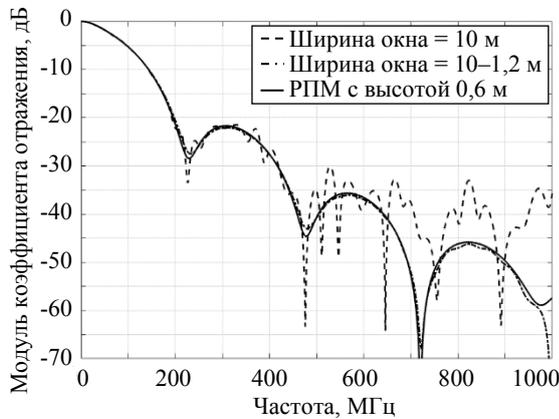


Рис. 12. Сравнительные графики модуля коэффициента отражения различных алгоритмов экстракции коэффициента отражения РПМ

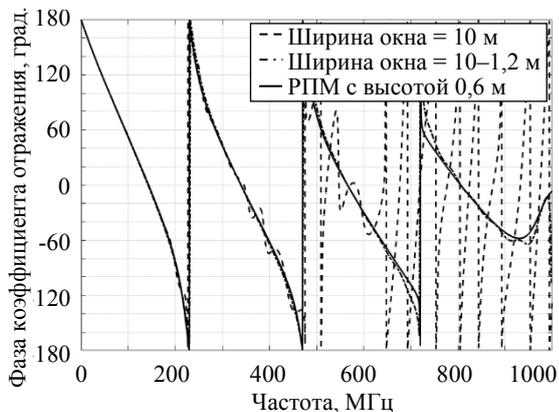


Рис. 13. Сравнительные графики фазы коэффициента отражения различных алгоритмов экстракции коэффициента отражения РПМ

Как видно из рис. 12, 13, с ростом частоты наблюдается влияние неоднородностей, попавших в полосу фильтра, на результат экстракции измеренных данных модуля и фазы коэффициента отражения РПМ.

Заключение

В данной работе представлена экстракция результатов измерения в КИЛ фильтром с переменной полосой пропускания. Применение фильтра с переменной полосой пропускания исключает отражения, которые попадают в область полосы пропускания при классическом методе фильтрации, вследствие чего минимизируется ошибка измерений в широкой полосе частот.

Предложенный метод актуален для установок по измерению электрических параметров материалов,

когда отклики на верхней и нижней частотах отличаются в несколько раз.

Литература

1. IEEE. IEEE recommended practice for radio-frequency (RF) absorber evaluation in the range of 30 MHz to 5 GHz // Technical report, IEEE Std 1128-1998. – 1998. – Vol. 1. – 68 p.
2. Измерение объемных радиопоглощающих материалов в квадратной коаксиальной линии передачи / С.А. Подлиннов, А.В. Фатеев, И.А. Резаев, Д.В. Шерстюк, С.И. Разгуляев // Матер. конф. «Метрология в радиоэлектронике», Менделеево, 21–23 сентября 2021 г. – Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2021. – С. 97–101.
3. Квадратная коаксиальная измерительная линия передачи / С.А. Подлиннов, А.В. Фатеев, И.А. Резаев, В.Д. Турнаев, А.Ю. Любимов // Метрология в радиоэлектронике. – 2023. – С. 118–124.
4. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М.: Сов. радио, 1970. – 248 с.
5. Dunsmore J.P. Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA techniques. – John Wiley & Sons, 2020. – 637 p.
6. Rectangular Coaxial Line for RF Absorber Measurements / S.A. Podlinnov, A.V. Fateev, S.I. Razgulyaev, I.A. Rezaev, D.V. Sherstyuk and A.O. Semkin, // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – Divnomorskoe: IEEE Xplore, 2023. – P. 112–115.
7. Зарубежные радиоэлектронные средства: в 4 кн. // под ред. Ю.М. Перунова. – Кн. 3: Антенны. – М.: Радиотехника, 2010. – 400 с.
8. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: Техносфера, 2022. – 529 с.
9. Джиган В.И. История, теория и практика адаптивной обработки сигналов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2012. – № 1. – С. 30–37.
10. Light Weight Concrete by Using Eps Beads / A.S. Moon, L.S. Selokar, A.I. Patle, D.S. Bhojar, S.D. Kowale, S.S. Quaz // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2020. – Vol. 7. – P. 2345–2351.

Подлиннов Сергей Александрович

Ст. преп. каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-5099-1752
Тел.: +7-952-808-17-35
Эл. почта: spodlinnov@gmail.com

Фатеев Алексей Викторович

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. РСС ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-4068-3590
Тел.: +7 (382-2) 41-33-65
Эл. почта: fateev@tusur.ru

Растрьгин Даниил Сергеевич

Ассистент каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0009-0004-0144-8349
Тел.: +7-913-879-87-88
Эл. почта: daniil.rastrygin@tusur.ru

Podlinnov S.A., Fateev A.V., Rastrygin D.S.

Extraction of measurement results for the complex reflectivity of a radio-absorbing material using a filter with a variable bandpass

The article presents a modified method for extracting the results of measuring the complex reflection coefficient of radio-absorbing materials in a square coaxial measuring transmission line using a filter with a variable bandpass.

Keywords: variable bandpass filter, square coaxial transmission line, complex reflection coefficient.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-42-47

References

1. IEEE. IEEE recommended practice for radio-frequency (RF) absorber evaluation in the range of 30 MHz to 5 GHz. *Technical Reports, IEEE Standards*, 1128-1998, 1998, vol. 1, 68 p.
2. Podlinnov S.A., Fateev A.V., Rezaev I.A., Sherstyuk D.V., Razgulyaev S.I. [Measurement of volumetric radio-absorbing materials in a square coaxial transmission line]. *Proceedings of the Conference "Metrology in Radio Electronics. Mendeleev, September*, 21–23, 2021, – Mendeleev: FSUE VNIIFTRI, pp. 97–101 (in Russ.).
3. Podlinnov S.A., Rezaev I.A., Fateev A.V., Turnaev V.D., Lyubimov A.Yu. [Square coaxial measuring transmission line]. *Metrology in Radio Electronics*, 2023, pp. 118–124 (in Russ.).
4. Silaev M.A., Bryantsev S.F. [Application of Matrices and Graphs to the Analysis Microwave Devices]. Moscow, Sov. Radio, 1970. 248 p. (in Russ.).
5. Dunsmore J. P. [Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA techniques]. John Wiley & Sons, 2020, 637 p.
6. Podlinnov S.A., Fateev A.V., Razgulyaev S.I., Rezaev I.A., Sherstyuk D.V., Semkin A.O. [Rectangular Coaxial Line for RF Absorber Measurements]. 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, IEEE Xplore, 2023, pp. 112–115.
7. Perunov Yu.M. [Foreign Electronic Equipment]. Book 3: Antennas. Moscow, Radio Engineering, 2010, 400 p. (in Russ.).

8. Dzhigan V.I. [Adaptive Signal Filtering: Theory and Algorithms]. Moscow, Tekhnosfera, 2013. 529 p. (in Russ.).

9. Dzhigan V.I. [History, Theory and Practice of Adaptive Signal Processing]. *Problems of Development of Promising Micro- and Nanoelectronic systems*, 2012, no. 1, pp. 30–37.

10. Moon A.S., Selokar L.S., Patle A.I., Bhoyar D.S., Kowale S.D., Quaz S.S. [Light Weight Concrete by Using Eps Beads]. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2020, vol. 7, pp. 2345–2351.

Sergey A. Podlinnov

Senior Lecturer, Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-5099-1752
Phone: +7-952-808-17-35
Email: spodlinnov@gmail.com

Alexey V. Fateev

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Radioelectronics and Communication Systems, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-4068-3590
Phone: +7 3822 41 33 65
Email: fateev@tusur.ru

Daniil S. Rastrygin

Assistant, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0009-0004-0144-8349
Phone: +7-913-879-87-88
Email: daniil.rastrygin@tusur.ru

УДК 621.372

В.О. Гордеева, А.О. Белоусов

Оптимизация конструкции модального фильтра при распространении сверхкоротких импульсов с двух направлений

Впервые рассматривается оптимизация полоскового модального фильтра (МФ) по критерию минимизации максимальной амплитуды сверхкоротких импульсов (СКИ) при их распространении с двух направлений. Это реализовано за счет использования субмодуля анимированной динамической визуализации «DynaVis», позволяющего оценить изменение формы напряжения вдоль конкретного проводника МФ. Оптимизация выполнялась с использованием генетического алгоритма с турнирным отбором на этапе селекции. Впервые ряд оптимизируемых параметров МФ задавался не диапазонами, а дискретным набором значений на этапе генерации нового поколения. При оптимизации имеют место высокие временные затраты, поскольку алгоритм просчитывает значения напряжений не в одном узле, а в нескольких, по числу подсекций (в данном случае 50), на которые делится МФ при оптимизации. В результате оптимизации удалось обеспечить наименьший уровень максимального напряжения 159,8 мВ в центральной секции МФ (узел 25 из 50) при воздействии трапециевидными СКИ с ЭДС 1000 и 717 мВ в узле 22 при воздействии СКИ, соответствующих генераторам IRA II с ЭДС 5647 мВ и SINUS-160 с ЭДС 2575 мВ. Выполнена оценка полученных результатов по ряду признаков.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, оптимизация, сверхкороткий импульс, модальный фильтр, генетический алгоритм.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-48-54

Современные радиоэлектронные системы (РЭС) играют важную роль в различных областях человеческой деятельности – от бытовых приборов до военной техники. Однако с увеличением функционала и разнообразия РЭС возникают проблемы, связанные с обеспечением их электромагнитной совместимости (ЭМС). Усложнение конструкций, рост верхних частот используемых сигналов, увеличение плотности монтажа и уязвимость к возникающим электромагнитным воздействиям представляют новые вызовы для обеспечения надежной работы РЭС в подобных условиях. Одной из основных проблем ЭМС является восприимчивость критичных цепей РЭС к кондуктивным помехам [1]. Их воздействие способно нарушать работу РЭС, что может привести к различным негативным последствиям [2, 3]. Это, в свою очередь, ведет к увеличению числа исследований, направленных на улучшение помехозащитных свойств различных РЭС [4–6]. Наибольший интерес, ввиду своих особенностей, представляют сверхкороткие импульсы (СКИ) [7, 8]. Они представляют собой импульсные сигналы большой амплитуды и малой длительности, способные проникать в РЭС различными способами, например, по сигнальным или питающим цепям [9, 10].

Для защиты РЭС от СКИ предложена технология модальной фильтрации. Принцип её действия заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Устройства, работающие по этому принципу, называют модальными фильтрами (МФ) [11]. Традиционно МФ реализуют в виде полосковых структур, однако явление модального разложения также возможно и в кабельных (защитных кабелях). В процессе проектирования МФ всегда важен выбор оптимального набора геометрических и электрофизических параметров разрабатываемой структуры. Для его поиска применяются раз-

личные методы и критерии оптимизации в зависимости от специфики требований к МФ [12].

Зачастую задача оптимизации МФ сводится к поиску глобального экстремума многоэкстремальной целевой функции, ввиду чего результативно применяются методы глобальной оптимизации. Преимущественно используются эволюционные и стохастические алгоритмы, такие как генетический алгоритм (ГА), эволюционные стратегии и случайный поиск (метод Монте–Карло). При настройке алгоритмов реализована возможность задания диапазонов оптимизируемых параметров в требуемых границах. Однако зачастую технологии производства печатных плат или кабельной продукции ограничены строгим набором допустимых значений геометрических параметров. Как следствие, важно обеспечить возможность оптимизации ряда параметров не в заданных диапазонах с мелким шагом (например, 500–1000 мкм с шагом 10 мкм), а заданными конкретными значениями (например, 500, 750 и 1000 мкм). Поэтому реализация задания оптимизируемых параметров МФ дискретным набором значений представляется актуальной. Наиболее значимыми критериями оптимизации МФ обычно выступают амплитудный (минимизация максимального значения напряжения на выходе МФ) и критерий согласования (согласование с электрическим трактом). Однако помимо них также существуют частотные, временные, стоимостный и массогабаритный критерии [12, 13]. Каждый из них используется в зависимости от предъявляемых требований к разрабатываемому устройству.

В то же время на практике возможно возникновение ситуаций, когда помеховые сигналы распространяются не только со стороны источника, но и в противоположном направлении. Суперпозиция прямых и отраженных сигналов может приводить к существенному увеличению амплитуды помехи в опре-

делённых участках цепи [14, 15]. Этот факт повышает риски выхода из строя компонентов и снижения общей надежности системы [16]. Поэтому целью работы является оптимизация МФ с учетом распространения помех с двух направлений для обеспечения эффективной защиты РЭС от СКИ в условиях сложной электромагнитной обстановки.

Материалы и методы

Моделирование и оптимизация выполнялись в системе TUSUR.EMC [17]. Допускалось, что в рассматриваемых МФ распространяются *T*-волны. Вначале строилась геометрическая модель поперечного сечения исследуемой структуры. Затем вычислялись матрицы погонных коэффициентов электростатической *C* и электромагнитной *L* индукций. На основе данных матриц вычислялись вторичные характеристики: матрица характеристических импедансов *Z_C* и погонные задержки мод *τ_i*. При этом матрицы погонных сопротивлений *R* (для учета потерь в проводниках) и проводимостей *G* (для учета потерь в диэлектриках) приняты равными нулю для исключения их влияния.

В качестве исследуемого выбран МФ на основе 3-проводной микрополосковой линии (МПЛ). Поперечное сечение МФ представлено на рис. 1, а, где *w* – ширина проводников, *s_i* – зазор между проводниками, *t* – толщина проводников, *h* – толщина подложки, *d* – расстояние от края МФ до ближайших проводников, а *ε_r* – относительная диэлектрическая проницаемость подложки. В качестве оптимизируемых параметров выбраны *h*, *t*, *s₁* и *s₂* как основные, оказывающие непосредственное влияние на форму выходного напряжения. Оптимизация *s₁* и *s₂* выполнялась в диапазоне 75–500 мкм, а для *t* и *h* взяты значения изготовителей печатных плат: 18, 35, 50, 70, 105 и 200 мкм для *t* и 100, 150, 200, 250, 360, 510, 710, 1000, 1500 мкм для *h*. Остальные параметры МФ приняты: *w* = 1000 мкм, *d* = 3*w*, *ε_r* = 4,5 и tgδ = 0,025.

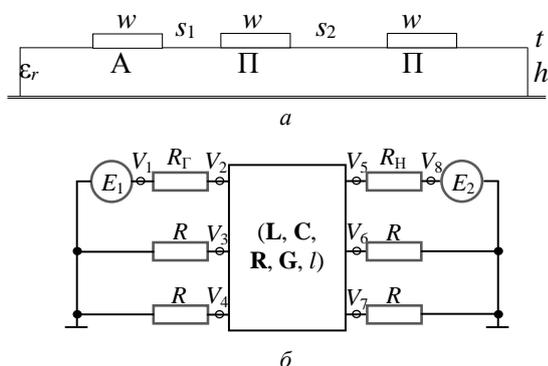


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) 3-проводного МФ на основе МПЛ

Эквивалентная схема данного МФ представлена на рис. 1, б. Длина МФ принята *l* = 0,6 м. При моделировании и оптимизации рассматривалось два случая воздействий одновременно с двух направлений: два одинаковых СКИ и два СКИ, различных по длительности, форме и амплитуде. При одинаковых использовалось воздействие трапециевидного СКИ с

ЭДС 1000 мВ и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 50 пс, так что общая длительность составила 150 пс для обоих источников *E₁* и *E₂*. При таком воздействии сопротивления *R_Γ*, *R_Н* и *R* взяты по 50 Ом. При разных СКИ их параметры соответствуют сигналам с генераторов IRA II (*E₁*) и SINUS-160 (*E₂*) из [7]. Амплитуда ЭДС для обоих СКИ понижена в 10⁴ раз (для упрощения анализа) и составила 5647 мВ для IRA II и 2575 мВ для SINUS-160. Формы напряжений показаны на рис. 2. Очевидно, что для источника *E₁* узел *V₂* является входным, а *V₅* – выходным, тогда как для *E₂* наоборот (*V₅* – вход, *V₂* – выход). *R_Γ* и *R* между узлами *V₃/V₄* и землей взяты по 50 Ом, а *R_Н* и *R* между узлами *V₆/V₇* и землей – по 30 Ом (для случая использования МФ в рассогласованном электрическом тракте).

В случае оптимизации по амплитудному критерию при распространении помехи с двух направлений необходимо учитывать уровень напряжения в линии не только в контрольном узле (*V₅* на выходе структуры), но и вдоль структуры. Система TUSUR.EMC имеет в своем функционале submodule анимированной динамической визуализации «DynaVis», основанный на алгоритме поиска в глубину GoThrough [18]. С помощью данного алгоритма программный submodule определяет путь распространения сигнала по цепи с дальнейшим отображением на экране. На вход алгоритма поступают координаты узлов *A* и *B* и число подсекций, на выходе получается список координат распространения импульса вдоль конкретного проводника МФ [19]. Submodule позволяет визуализировать изменение формы напряжения, а также выявлять его экстремумы, при прохождении через отрезки линий передачи произвольной сложности. С его помощью можно разделить линию на необходимое количество подсекций для наблюдения прохождения сигнала по линии с течением времени. Рисунок 3 визуализирует разделение МФ между узлами *V₂* и *V₅* на 50 подсекций. Рисунок 4 демонстрирует формы напряжений *U₁* и *U₂* во времени *t₁* и *t₂* с двух генераторов в выборочных подсекциях МФ (оптимизированного ранее по критерию минимизации максимальной амплитуды на его выходе [12]).

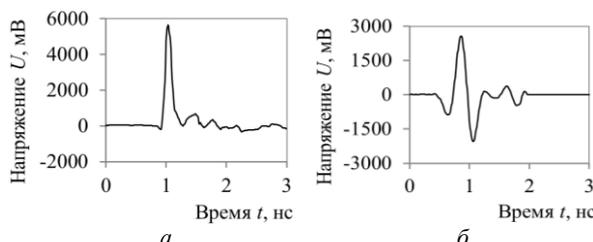


Рис. 2. Формы сигналов с IRA II (а) и SINUS-160 (б) [7]

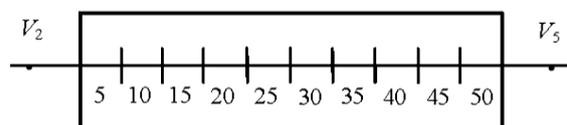


Рис. 3. Разделение линии между узлами *V₂* и *V₅* на 50 подсекций с помощью «DynaVis»

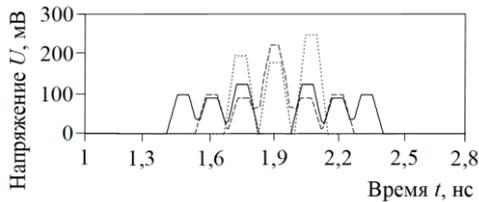


Рис. 4. Формы напряжения в подсециях 21 и 29 (—); 23 и 27 (- -); 25 (· · ·)

Из рис. 4 видно, что подсеции 21 и 29 включают в себя по 3 импульса (результат модального разложения), распространяющихся с двух сторон МФ. Поскольку воздействующие с двух сторон импульсы и сопротивления на концах линии одинаковы, то и формы сигналов, проходящих по линии, также одинаковы. В данном случае сигналы начинают частично накладываться друг на друга, начиная с подсеций 22–28, и сливаются в середине линии (подсекция 25), приводя к более высоким уровням напряжения импульсов мод. Однако при различных видах воздействий с двух направлений возможно смещение максимального значения напряжения (при суперпозиции сигналов) в соседние подсекции. С учетом этого при оптимизации важно учитывать все подсекции МФ, в которых распространяются помехи.

Критерий минимизации амплитуды с учетом распространения СКИ с двух направлений формируется на основе амплитудного при условии, что максимальная амплитуда $U(t)$ минимизируется вдоль линии передачи, разделенной на n подсеций.

$$\max(U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где n – число подсеций.

Оптимизация выполнялась с использованием ГА с турнирным отбором на этапе селекции на языке Python. Как отмечалось ранее, оптимизируемые параметры h и t задавались списком конкретных значений, а s_1 и s_2 – диапазоном значений. Задание оптимизируемых параметров дискретным набором значений реализовано за счет введения дополнительного условия на этапе создания популяции. Если диапазон оптимизируемых параметров задан списком, то выбор выполняется из значений, входящих в список. Если диапазон указан как «кортеж» из двух значений (верхняя и нижняя границы поиска), то выполняется выбор из значений в данном диапазоне. Коэффициент мутации ГА брался 0,1 (или 10%), а коэффициент кроссовера определялся случайным выбором точки разрыва внутри длины генома родителей (одноточечный кроссовер). Количество особей для турнира – 3. При этом оптимизация выполнялась с последовательным увеличением числа вычислений N_{it} : 50 (5 особей и 10 поколений), 100 (10 особей и 10 поколений) и 1 000 (10 особей и 100 поколений). Для каждого значения N_{it} выполнялось по 5 запусков.

Результаты оптимизации по сформулированному критерию сравнивались между собой по итоговым значениям оптимизированных параметров и ряду характеристик. Отклонение (Δ) рассчитывалось как

$$\Delta = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_1 + X_2} \right| \cdot 100\%, \quad (2)$$

где X_1 – максимальное и X_2 – минимальное значения.

Результаты оптимизации

Результаты оптимизации сведены в табл. 1, где N – номер запуска, N_{it} – число итераций (особей/поколений) на запуск, T – затрачиваемое на запуск время, U_{max} – максимальное напряжение в МФ с учетом его разделения на 50 подсеций (полужирным выделен оптимальный набор параметров).

Таблица 1

Результаты оптимизации конструкции МФ при одинаковых воздействиях с двух направлений						
N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	T , с
$N_{it} = 5/10$						
1	200	70	286,8	436,3	320,3	545
2	100	35	148,1	230	262,6	553
3	100	18	216,8	311,5	303,8	484
4	200	200	235,1	236,6	312,2	502
5	150	35	285	444,6	353	502
Δ , %	33,3	84,5	31,9	31,8	14,7	5,65
$N_{it} = 10/10$						
1	100	18	123,1	481,3	242,9	689
2	200	70	149,9	237,8	255	636
3	100	35	80,5	106,5	213,8	828
4	150	70	126,7	335,4	212,8	842
5	100	105	231,8	197,1	277,1	728
Δ , %	33,3	70,7	48,4	63,8	13,1	13,9
$N_{it} = 10/100$						
1	100	200	119	307	167	7866
2	100	200	108	261,6	162,4	7880
3	100	200	78,3	191,4	159,8	7521
4	100	200	75,8	208	162,6	7277
5	100	200	154	176,9	193	6974
Δ , %	0	0	34	26,9	9,4	6,1

На рис. 5 приведены формы напряжений в подсеции 25 до (при распространении СКИ только со стороны источника E_1 и минимизации максимального напряжения в узле V_3) и после (с учетом распространения СКИ со стороны источников E_1 и E_2) оптимизации МФ по амплитудному критерию. Для случая, когда СКИ распространялся только со стороны E_1 , взят результат, ранее полученный посредством оптимизации ГА при 5 000 вычислениях по амплитудному критерию с параметрами: $h = 990,6$ мкм, $t = 191,4$ мкм, $s_1 = 10$ мкм, $s_2 = 55,5$ мкм [12]. Рисунок 6 показывает формы напряжений на выходе МФ до (в узле V_3 для генератора E_1) и после (в узлах V_2 для E_2 и в V_3 для E_1) оптимизации. На рис. 7 представлено поперечное сечение с оптимальным набором параметров, полученное при одинаковых воздействиях с двух направлений.

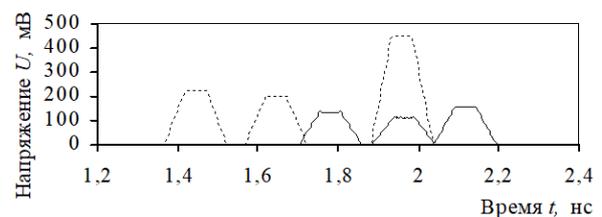


Рис. 5. Формы напряжений в подсеции 25 до (· · ·) и после (—) оптимизации

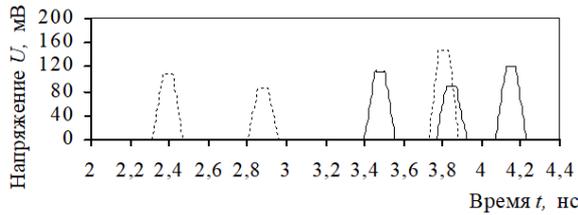


Рис. 6. Формы напряжений в узле V_5 до (...) и в узлах V_2 и V_5 после (—) оптимизации



Рис. 7. Поперечное сечение МФ с оптимальным набором параметров при одинаковых воздействиях с двух направлений

Из табл. 1 и рис. 5 видно, что наименьший уровень напряжения в линии (в подсекции 25, где происходит суперпозиция трех импульсов разложения, распространяющихся с двух направлений) после оптимизации составил $U_{max} = 159,8$ мВ, тогда как до оптимизации $U_{max} = 451,7$ мВ (в 2,8 раза больше). Также табл. 1 демонстрирует закономерное уменьшение максимального напряжения и его среднего отклонения с ростом числа вычислений. Так, среднее значение полученного максимального напряжения в линии составило 308,6 мВ при $N_{it} = 5/10$ ($\Delta = 14,7\%$), 240,3 мВ при $N_{it} = 10/10$ ($\Delta = 13,1\%$) и 169 мВ при $N_{it} = 10/100$ ($\Delta = 9,4\%$). Уменьшение Δ с 14,7 до 9,4% показывает улучшение сходимости. Среднее время вычислений при $N_{it}=10/100$ составило 7 503 с, а при $N_{it} = 5/10$ – 517 с.

Из рис. 6 видно, что ослабление воздействующих помех также достижимо в крайних узлах МФ (V_2 и V_5). При этом различимы три импульса разложения: для случая до оптимизации это импульсы, пришедшие на выход МФ (узел V_5), а после – в узлы V_2 и V_5 (ввиду идентичного воздействия с двух направлений). Примечательно, что до оптимизации МФ максимальное напряжение на выходе МФ (узел V_5) составило 146 мВ, а после – 122 мВ (в узлах V_2 и V_5).

Кроме того, из табл. 1 видно, что параметры h и t , задаваемые дискретным набором значений, не выходят за рамки заданных значений в процессе оптимизации. Так, параметр h уже при $N_{it} = 10/100$ стремится к 100 мкм, тогда как t – к 200 мкм. В то же время при меньшем числе вычислений параметры принимают оптимальные значения в диапазоне 100–200 мкм для h и 18–200 мкм для t . Увеличение сходимости также подтверждается нулевым значением Δ параметров h и t для максимального количества вычислений, в то время как при $N_{it} = 5/10$ $\Delta = 33,3\%$ для h и 84,5% для t . Наибольший разброс оптимизированных значений соответствует параметрам s_1 и s_2 (34 и 26,9% соответственно) при $N_{it} = 10/100$. Для s_1 оптимум получен в диапазоне 75,8–154 мкм, а для s_1 – в диапазоне 176,9–307 мкм.

В табл. 2 представлены результаты оптимизации МФ при воздействии двух разных СКИ (полужирным выделен оптимальный набор параметров). На рис. 8 приведены формы максимальных напряжений до

(соответствует подсекции 24) и после (соответствует подсекции 22) оптимизации МФ. Рисунок 9 демонстрирует формы напряжений на выходе МФ до (в узле V_5 для генератора E_1) и после (в узлах V_2 для E_2 и в V_5 для E_1) оптимизации. На рис. 10 представлено поперечное сечение с оптимальным набором параметров, полученное при разных воздействиях с двух направлений.

Таблица 2

Результаты оптимизации конструкции МФ при разных воздействиях с двух направлений

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	T , с
$N_{it} = 5/10$						
1	200	105	117,2	316,3	999	266
2	100	105	204,2	432,8	1164	282
3	100	200	204,2	370,5	809	291
4	200	105	364	345,2	1764	285
5	100	200	257,9	332	1101	289
Δ , %	33,3	31,1	51,3	15,6	37,1	4,5
$N_{it} = 10/10$						
1	150	200	168,2	277	818	382
2	150	105	139,5	294,1	906	400
3	150	200	107,6	326,6	914	426
4	150	200	115,2	332,2	917	384
5	150	105	177,7	271,9	886	431
Δ , %	0	31,1	24,6	10	5,7	6
$N_{it} = 10/100$						
1	100	200	107,8	209,9	729	5425
2	100	200	150,1	221,3	740	5436
3	100	200	109,8	210,7	717	5454
4	100	200	97,1	209,8	733	5483
5	150	200	103,9	165,7	727	5330
Δ , %	20	0	21,4	14,4	1,6	1,4

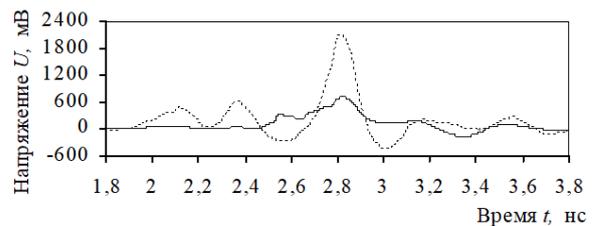


Рис. 8. Формы напряжений в подсекции 24 до (...) и в подсекции 22 после (—) оптимизации

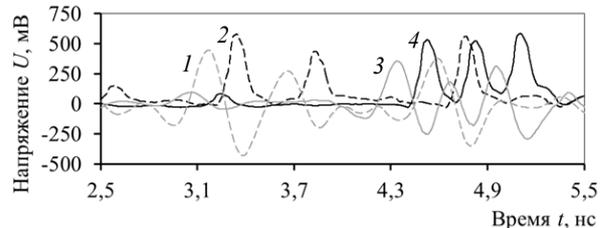


Рис. 9. Формы напряжений в узлах V_2 и V_5 до (1 и 3) и после (2 и 4) оптимизации

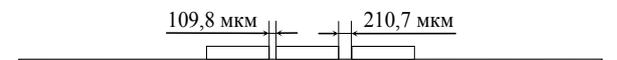


Рис. 10. Поперечное сечение МФ с оптимальным набором параметров при разных воздействиях с двух направлений

Из табл. 2 и рис. 8 видно, что из-за различия R на концах МФ (50 и 30 Ом), а также двух различных

воздействующих СКИ суперпозиция импульсов с наибольшей амплитудой смещается из подсекции 25 в 24 (до оптимизации) и 22 (после оптимизации). Так, наименьший уровень напряжения в МФ составил 2 102 мВ до оптимизации по критерию (1) и 717 мВ после (в 2,9 раза меньше). Результат получен при $N_{it} = 10/100$. Минимизация напряжения в МФ достигается в том числе за счет суперпозиции напряжений разной полярности, как видно из рис. 8.

Таблица 2 по аналогии с табл. 1 демонстрирует уменьшение максимального напряжения и его среднего отклонения с ростом числа вычислений. Среднее значение U_{max} в линии составило 1 167,4 мВ при $N_{it} = 5/10$ ($\Delta = 37,1\%$), 888,2 мВ при $N_{it} = 10/10$ ($\Delta = 5,7\%$) и 729,2 мВ при $N_{it} = 10/100$ ($\Delta = 1,6\%$). Уменьшение Δ с 37,1 до 1,6% показывает улучшение сходимости. Среднее время вычислений при $N_{it} = 10/100$ составило 5 425 с, а при $N_{it} = 5/10$ – 282,6 с. Кроме того, заметно сохранение тенденции сходимости значений параметров h и t , аналогично с табл. 1. Также улучшается сходимость s_1 (от 51,3% при $N_{it} = 5/10$ до 21,4% при $N_{it} = 10/100$). Для параметра s_2 отмечается изменение диапазонов полученных результатов с увеличением N_{it} (316–433 мкм при $N_{it} = 5/10$, 271–333 мкм при $N_{it} = 10/10$, 165–222 мкм при $N_{it} = 10/100$).

Из рис. 9 заметно, что минимальные значения выходных напряжений получены благодаря выравниванию импульсов мод. Так, для узла V_2 (источник E_2) $U_{max} = 446$ мВ при $U_{bx} = 1 147$ мВ до оптимизации и $U_{max} = 354$ мВ при $U_{bx} = 807$ мВ после. Так, ослабление МФ составило 2,57 до и 2,28 после оптимизации (отклонение меньше 6%). Для узла V_5 (источник E_1) $U_{max} = 579$ мВ при $U_{bx} = 2 008$ мВ до оптимизации и $U_{max} = 585$ мВ при $U_{bx} = 1 507$ мВ после. Ослабление составило 3,47 до и 2,57 после оптимизации (отклонение меньше 15%). Примечательно, что оптимизация по критерию минимизации максимального напряжения в МФ (с учетом 50 подсекций) также позволила получить близкие (с оптимизацией при распространении СКИ только со стороны источника E_1 и минимизации максимального напряжения в узле V_5) значения напряжений на выходе МФ.

Заключение

Таким образом, впервые выполнена оптимизация полоскового МФ по критерию минимизации максимальной амплитуды СКИ при их распространении с двух направлений. Учет данного критерия целесообразен при распространении: помеховых сигналов, напрямую с источников или наведенных, с двух направлений, прямых и отраженных (от неоднородностей, несогласованного окончания или элементов линии передачи) помеховых сигналов и др. Оптимизируемые параметры впервые задавались не диапазонами, а дискретным набором значений за счет введения дополнительного условия на этапе создания популяции.

Показано, что воздействие одинаковых (по форме, амплитуде и длительностям) импульсов одновременно с двух направлений наиболее опасно,

поскольку создает устойчивую стоячую волну, способную значительно увеличить амплитуду сигнала (ввиду суперпозиции мод) в определенных подсекциях цепи. Однако в этом случае проще оценить место локализации суперпозиции подобных воздействий. В то же время воздействие разных (по форме, амплитуде и длительностям) импульсов может привести к смещению пиков амплитуды по длине линии передачи, что затрудняет определение мест локализации суперпозиции мод и требует при первых оценках выполнения вычислительного эксперимента для точной оценки.

Между тем возможно частичное или полное компенсирование мод в линии передачи при одновременных разных воздействиях с двух направлений. Так, при разделении МФ на 50 подсекций и одинаковых СКИ, воздействующих с двух направлений, получено минимальное значение напряжения в подсекции 25 (где происходит суперпозиция импульсов, распространяющихся с двух направлений) в 2,8 раза меньше по сравнению с результатами оптимизации по амплитудному критерию при распространении СКИ с одного направления.

При воздействии двух разных СКИ с двух направлений суперпозиция импульсов смещается из подсекции 25 в 24 (до оптимизации) и 22 (после оптимизации). В этом случае минимальное значение напряжения после оптимизации по результатам данной работы в 2,9 раза меньше, чем при учете распространения СКИ только со стороны источника E_1 . Кроме того, из форм выходных напряжений видно, что результаты оптимизации при распространении СКИ с двух направлений также близки к результатам оптимизации при распространении СКИ только со стороны источника E_1 (отклонение ослаблений СКИ в худшем случае не превышает 15%).

Таблицы 1, 2 демонстрируют уменьшение среднего значения U_{max} с увеличением N_{it} (от 5/10 к 10/100) в 1,84 и 1,6 раза при одинаковых и разных СКИ с двух направлений соответственно. Кроме этого, увеличивается сходимость ЦФ, что подтверждает уменьшение результатов (полученных для $N_{it} = 5/10$ по отношению к $N_{it} = 10/100$) Δ в 1,53 и 23,18 раза для исследуемых случаев, соответственно. В обоих случаях алгоритм нашел оптимальное решение при $h = 100$ мкм и $t = 200$ мкм, разница между оптимальными значениями s_1 составила 16,75%, а между значениями s_2 – 4,8%.

Между тем оптимизация, учитывающая разделение МФ на ряд подсекций, затратна по времени. Так, при анализе напряжений в одном узле за 1 000 вычислений (10 особей и 100 поколений) ГА тратит в среднем 3 232 с [12], а при данном подходе (в худшем случае) – 7 880 с (в 2,4 раза дольше) при том же числе вычислений. По этой причине необходимо подходить ответственно к выбору числа подсекций, поскольку большое число замедлит процесс расчетов, а малое – даст низкую точность. Тем не менее в результате подобного подхода удалось не только минимизировать амплитуду СКИ, распространяющихся с двух направ-

лений, в центральных подсекциях МФ, но также обеспечить эффективное ослабление помех, пришедших в конец (узлы V_2 для E_2 и V_5 для E_1) МФ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00578, <https://rscf.ru/project/24-29-00578/>.

Литература

1. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях. – Казань: Издательство Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – 254 с.
2. Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference / F. Hamamah, W.W. Ahmad, C. Gomes, M.M. Isa M. Homam // IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE). – 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/APACE47377.2019.9021096.
3. Alnamir H. Study of Low Frequency Electromagnetic Interference Problems in Hospital Environment // 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). – 2019. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ATEE.2019.8724736.
4. New electromagnetic protection devices based on filtering / Y. Fei, H. Haoquan, L. Ruiming, L. Lutong, L. Zhipeng // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). – 2017. – P. 1–3. DOI: 10.1109/EMC-B.2017.8260382.
5. Transparent and hard TiO₂/Au electromagnetic shielding antireflection coatings on aircraft canopy PMMA organic glass / G. Gao, Y. Huang, S. Zeng, K. Li, Y. Zhang, J. Zhu // Applied Surface Science. – 2024. – Vol. 658. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.159830.
6. M'ziou N. Electromagnetic compatibility problems of indirect lightning stroke on Overhead Power Lines // Mathematics and Computers in Simulation. – 2020. – Vol. 167. – P. 429–442. DOI: 10.1016/j.matcom.2018.04.007.
7. Mora N. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – 8 July 2014. – No. 41. – 92 p.
8. Ultra-Short Pulse Generation From Optical Parametric Oscillators With a Cavity-Length Detuning / J. Zhang, C. Ning, J. Heng, S. Yu, Z. Zhang // IEEE Photonics Technology Letters. – 2022. – Vol. 34, No 5. – P. 263–266. DOI: 10.1109/LPT.2022.3149528.
9. Gaynutdinov R. Studies of Electromagnetic Disturbances in Coupling Path by Application of Intentional Ultrashort Electromagnetic Pulses / R. Gaynutdinov, S. Chermoshentsev // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2019. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949973.
10. Wu Y. Research on Matrix Description of Electromagnetic Interference Between Cables / Y. Wu, X. Xu, T. Jiang // 2021 IEEE 9th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). – 2021. – P. 82–84. DOI: 10.1109/ICCSNT53786.2021.9615463.
11. Gazizov A.T. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No 4. – P. 1136–1142. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2548783.
12. Белоусов А.О. Оптимизация помехозащитных структур с модальным разложением / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева. – Томск: Изд-во ТУСУРа. – 2023. – 136 с.
13. Белоусов А.О. Оптимизация модального фильтра на основе микрополосковой линии по частотным крите-

риям / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева, Г.Ю. Ким // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 4. – С. 219–242. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242.

14. Optical Reflection Interference Equalization for Single-Wavelength Bidirectional WDM-PON Transmission System / S. Shibita, D. Hisano, K. Maruta, Y. Nakayama, K. Mishina, A. Maruta // IEEE Photonics Journal. – 2021. – Vol. 13, No. 1. – P. 1–15. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3045049.

15. Rapp L. Performance Impact of Signal Reflections in a Single-Fiber Bidirectional System / L. Rapp, F. Azendorf, M. Eisel // IEEE Photonics Technology Letters. – 2021. – Vol. 33, No. 24. – P. 1411–1414. DOI: 10.1109/LPT.2021.3125524.

16. Ion Electric Propulsion System Electric Breakdown Problems: Causes, Impacts and Protection Strategies / Z. Peng, Z. Li, F. Song, Y. Zhang, H. Xi, F. Liu // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 97340–97352. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312719.

17. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, А.В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Ключкин, А. Алхадж Хасан, А.Е. Максимов, А.В. Осинцев // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9–1 (119). – С. 170–178.

18. Алгоритм DFS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e-maxx.ru/algo/dfs>, свободный (дата обращения: 12.08.2024).

19. Газизов Р.Р. Функции локализации и визуализации токов и напряжений в системе TALGAT / Р.Р. Газизов, Е.В. Лежнин // Современное технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Т. 1. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2016. – С. 100–103.

Гордеева Виктория Олеговна

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-5732-6480
Тел.: +7-996-938-69-67
Эл. почта: vikki.gern@gmail.com

Белоусов Антон Олегович

Канд. техн. наук, докторант каф. ТУ ТУСУРа,
науч. сот. центра экспертизы и испытаний
Сахалинского государственного университета
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-0154-8014
Тел.: +7-923-440-86-02
Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com

Gordeyeva V.O., Belousov A.O.

Optimization of modal filter design for ultrashort pulses propagation from two directions

The article is the first to consider the optimization of a strip modal filter (MF) using the criterion of minimizing the maximum amplitude of ultrashort pulses (USPs) in case of two direction propagation. The authors have implemented this by using the animated dynamic visualization submodule «DynaVis», that allows to estimate the change in the signal shape alongside the specific MF conductor. The optimization was performed using a genetic algorithm with tournament elimination at the selection stage. For the first time, during optimization, we spe-

cified a number of optimized parameters not by ranges, but by a discrete set of values at the stage of generating a new generation. The optimization process entails high computational time costs because the algorithm calculates voltage values at multiple nodes corresponding to the number of subsections (50 in this case) into which the MF is divided during optimization. As a result, the optimization achieved the lowest maximum voltage level of 159.8 mV in the central section of the MF (node 25 out of 50) under the excitation of trapezoidal USPs with an EMF of 1000 mV from sources E_1 and E_2 , and the 717 mV at node 22 under the excitation of USPs corresponding to IRA II with an EMF of 5647 mV (E_1) and SINUS-160 with an EMF of 2575 mV (E_2) generators. The obtained results were evaluated according to several criteria.

Keywords: electromagnetic compatibility, optimization, ultra-short pulse, modal filter, genetic algorithm.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-48-54

References

- Gizatullin Z.M. *Pomekhoustoichivost' sredstv vy-chislitel'noi tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnykh elektromagnitnykh vozdeystviyakh* [Immunity of computing equipment inside buildings to broadband electromagnetic influences]. Kazan, Publishing House of Kazan State Technical University, 2012, 254 p.
- Hamamah F., Ahmad W.W., Gomes C., Isa M.M., Homam M. Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference. *IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/APACE47377.2019.9021096.
- Alnamir H. Study of Low Frequency Electromagnetic Interference Problems in Hospital Environment. *11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ATEE.2019.8724736.
- Fei Y., Haoquan H., Ruiming L., Lutong L., Zhipeng L. New electromagnetic protection devices based on filtering. *IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, 2017, pp. 1–3. DOI: 10.1109/EMC-B.2017.8260382.
- Gao G., Huang Y., Zeng S., Li K., Zhang Y., Zhu J. Transparent and hard TiO₂/Au electromagnetic shielding anti-reflection coatings on aircraft canopy PMMA organic glass. *Applied Surface Science*, 2024, vol. 658, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.159830.
- M'ziou N. Electromagnetic compatibility problems of indirect lightning stroke on Overhead Power Lines. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, vol. 167, pp. 429–442. DOI: 10.1016/j.matcom.2018.04.007.
- Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System and Assessment Notes*. Note 41, 2014, 92 p.
- Zhang J., Ning C., Heng J., Yu S., Zhang Z. Ultra-Short Pulse Generation From Optical Parametric Oscillators With a Cavity-Length Detuning. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, vol. 34, no. 5, pp. 263–266. DOI: 10.1109/LPT.2022.3149528.
- Gaynutdinov R., Chermoshentsev S. Studies of Electromagnetic Disturbances in Coupling Path by Application of Intentional Ultrashort Electromagnetic Pulses. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949973.
- Wu Y., Xu X., Jiang T. Research on Matrix Description of Electromagnetic Interference Between Cables. *IEEE 9th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 2021, pp. 82–84. DOI: 10.1109/ICCSNT53786.2021.9615463.
- Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136–1142. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2548783.
- Belousov A.O., Gordeyeva V.O. Optimizatsiya pomekhozashchitnykh struktur s modal'nym razlozheniem [Optimization of protective structures with modal decomposition]. Tomsk, Publishing office of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2023, 136 p.
- Belousov A.O., Gordeyeva V.O., Kim G.Yu. [Optimization of a modal filter based on a microstrip line according to frequency criteria]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 219–242 (in Russ.). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242.
- Shibita S., Hisano D., Maruta K., Nakayama Y., Mishina K., Maruta A. Optical Reflection Interference Equalization for Single-Wavelength Bidirectional WDM-PON Transmission System. *IEEE Photonics Journal*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3045049.
- Rapp L., Azendorf F., Eiselt M. Performance Impact of Signal Reflections in a Single-Fiber Bidirectional System. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, vol. 33, no. 24, pp. 1411–1414. DOI: 10.1109/LPT.2021.3125524.
- Peng Z., Li Z., Song F., Zhang Y., Xi H., Liu F. Ion Electric Propulsion System Electric Breakdown Problems: Causes, Impacts and Protection Strategies. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 97340–97352. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312719.
- Kuksenko S.P., Gazizov T.R., Kvasnikov A.A., Demakov A.V., Ivanov A.A., Klyukin D.V., Alkhadzh Hasan A., Maksimov A.E., Osintsev A.V. [Development of software for modeling radio-electronic means taking into account electromagnetic compatibility at TUSUR]. *Nanoindustry*, 2023, vol. 16, no. S9–1(119), pp. 170–178.
- DFS Algorithm. Available at: <http://e-maxx.ru/algorithm/dfs>, free (accessed: August 12, 2024) (in Russ.).
- Gazizov R.R., Lezhnin E.V. [Functions of localization and visualization of currents and voltages in the TALGAT system]. *Modern technologies in science and education – STNO-2016 [text]: collection of works of the intern. Sci.-tech. and sci.-method. conf.*, in 4 volumes. vol. 1, under the general editorship of O.V. Milovzorov, Ryazan, Ryazan State Radiotechnical University, 2016, pp. 100–103.

Viktoriya O. Gordeyeva

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-5732-6480
Phone: +7-996-938-69-67
Email: vikki.gern@gmail.com

Anton O. Belousov

Candidate of Sciences in Engineering, Doctoral Student, Department of Television and Control, TUSUR
Researcher, Center for Expertise and Testing at Sakhalin State University.
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0154-8014
Phone: +7-923-440-86-02
Email: ant1lafleur@gmail.com

УДК 621.391

Е. Зима, Р.Р. Газизов

Модальное резервирование: современное состояние

Модальное резервирование (МР) является одним из эффективных способов одновременного обеспечения электромагнитной совместимости и надежности радиоэлектронной аппаратуры. Ранее выполнен развернутый обзор истории развития МР и исследований по нему до 2021 г. В силу бурного развития МР в последние годы выполнен обзор последних исследований, в том числе патентов и зарегистрированных программ для ЭВМ по настоящее время и выделена значимость каждого из них. На основе этого обзора выявлены структуры, подходящие для исследования уровня излучаемой эмиссии от них квазистатическим подходом и экспериментально в ТЕМ-камерах. Обобщена новизна представленных исследований.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, модальная фильтрация, модальное резервирование, печатная плата, гибкий печатный кабель, кондуктивная эмиссия, излучаемая эмиссия.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69

При проектировании радиоэлектронных устройств (РЭУ) большое внимание уделяется их надежности и функциональной безопасности, а с ростом числа РЭУ и усложнением их конструкции вопрос обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) становится особенно острым. Это весьма важно для РЭУ, применяющихся в критических системах, например, спутниковых, бортовых и военных, где требуется их стабильная непрерывная работа. Выход таких систем из строя приводит к серьезным финансовым и информационным потерям. Распространенным способом обеспечения надежности РЭУ является резервирование, т.е. введение избыточности в структуру устройства [1].

Недостатком данного способа является повышение стоимости и массы конструкции, а также отсутствие ослабления электромагнитных помех (ЭМП). ЭМП могут также быть вызваны преднамеренно. Сверхкороткие импульсы (СКИ) являются одним из опасных видов преднамеренных ЭМП. Из-за их малой длительности, широкого спектра и высокой мощности классические устройства защиты от помех не могут эффективно справляться с их подавлением. Модальная фильтрация (МФ) – принцип защиты от СКИ, основанный на разложении импульса помехи в многопроводных линиях передачи на импульсы меньшей амплитуды за счет электромагнитной связи между линиями [2]. На основе данного принципа созданы модальные фильтры, отличающиеся высокой эффективностью при борьбе с ЭМП, а также небольшой массой и стоимостью [3].

Модальное резервирование (МР) является одним из новых способов трассировки и компоновки элементов печатных плат (ПП), одновременно обеспечивающим ЭМС РЭУ за счет применения МФ и повышение их надежности за счет резервирования. Обеспечение ЭМС происходит за счет повышения помехозащищенности РЭУ использованием модального разложения благодаря электромагнитной связи между резервируемыми и резервными проводниками в неоднородной диэлектрической среде. Повышение надежности происходит за счет холодного резервирования замещением резервируемых проводников (при

любых видах отказов) резервными проводниками, не принимающими активного участия в работе РЭУ и не потребляющими энергию. Применение МР может дать стабильную непрерывную работу РЭУ в критических системах.

В настоящее время ведутся активные исследования в области развития и повышения эффективности МР при трассировке и монтаже ПП. Уже тщательно исследовалось применение МР в различных типах ПП. Особое внимание уделялось их исследованию в части кондуктивной эмиссии. Некоторые исследования посвящались оценке излучаемой эмиссии (ИЭ) от ПП с МР. Однако такая оценка выполнялась только на простых классических структурах с бесконечной плоскостью земли, изготовленной в виде одного слоя. Тем временем необходимо обратить внимание на ИЭ от структур сложных геометрических моделей, как, например, от структуры с конечной землей, исполненной в виде одного опорного проводника. Такие исследования позволят в дальнейшем более тщательно исследовать характеристики ПП с МР и проектировать их макеты с учетом уровня ИЭ от них.

Ранее в работах [4, 5] рассмотрена история развития МР с обзором исследований и патентов до 2021 г. Тем не менее целесообразно выполнить обзор свежих исследований для оценки развития данной области за прошедшее время, выделив значимость каждого из них. Также важно выявить возможные структуры ПП с МР с конечной землей, подходящие для оценки уровня ИЭ от них в диапазоне частот, в том числе в условиях критических температур моделью из [6]. Это позволит изготовить их макеты для последующих экспериментальных исследований.

Цель работы – выполнить обзор исследований по МР, выполненных с 2021 г. до настоящего времени, и выявить возможные структуры ПП с МР с конечной землей, подходящие для оценки уровня ИЭ от них квазистатическим подходом, обобщив новизну представленных исследований.

Исследования по МР за 2021–2023 гг.

В рассмотренных здесь работах исследованы структуры с различной кратностью МР: однократным [7–19], двукратным [20–23] и трехкратным [24–

36]. Моделируемые эквивалентные схемы здесь не приводятся, поскольку они везде одинаковы: связанные или многопроводные линии с резисторами 50 Ом на всех концах проводников. Вход и выход на концах одного из проводников.

В работе [7] впервые экспериментально продемонстрировано разложение СКИ в четырехслойной (по числу слоев трассировки) ПП с однократным МР (рис. 1) до и после отказов. Для анализа влияния СКИ на безопасность функционирования структуры использовались N -нормы.

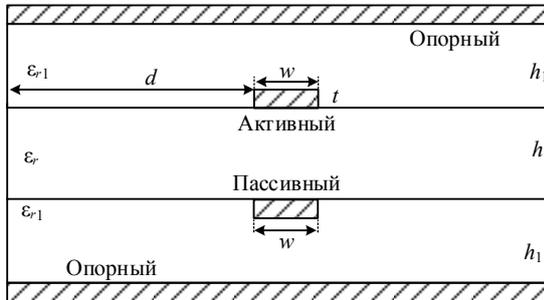


Рис. 1. Поперечное сечение четырехслойной ПП с однократным МР [7]

Для сравнения с результатами эксперимента также выполнены квазистатический и электродинамический анализы. Исследованы случаи короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ) на входе и выходе резервируемого проводника. Для демонстрации разложения СКИ до и после отказов на вход структуры подавались два колоколообразных импульса с общими длительностями 0,15 и 1,5 нс. Экспериментально показано, что структура с МР до и после отказов ведет себя как фильтр низких частот, а отклонения частот резонанса и среза от прогнозируемых после отказов могут достигать 45 и 19% соответственно.

Также показано, что после отказов максимальные амплитуды разложенных импульсов на дальнем конце структуры с МР изменяются в зависимости от длительности импульсов помех на входе. Это влияние объяснено длиной трасс к соединителям SMA. Установлено, что когда двойная задержка в трассе больше общей длительности импульса, то после отказов амплитуда не изменится, так как отраженные импульсы не будут накладываться на основные. Однако с увеличением длины трассы импульсы помех будут накладываться на основные и менять максимальные амплитуды. Все обнаруженные в данной работе явления необходимо учитывать при проектировании четырехслойных ПП с однократным МР. Таким образом, в указанной работе эта структура впервые исследована столь обстоятельно (разными видами анализа, в том числе экспериментально) и системно (в том числе после отказов и с учетом влияния отводов).

В работе [8] исследована двухпроводная (3-й проводник – схемная земля) асимметричная структура с однократным МР, представленная на рис. 2. Эвристическим поиском определены оптимальные

значения геометрических параметров поперечного сечения структуры для достижения минимального уровня вносимых потерь. Показано влияние расположения резервируемого и резервирующего проводников на уровень ослабления импульсов помехи в синфазном и дифференциальном режимах работы при объединении двух центрально-симметричных модальных фильтров, а также определено их оптимальное расположение.

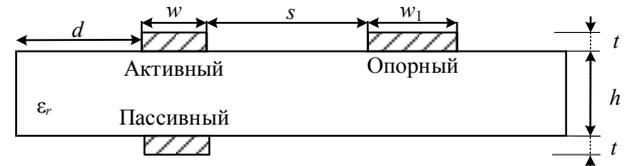


Рис. 2. Поперечное сечение двухпроводной асимметричной структуры с однократным МР [8]

На вход структуры подавались трапециевидный импульс амплитудой 1 В, оцифрованный с осциллографа сигнал амплитудой 0,5 В и два классических сверхширокополосных импульса одинаковой и разной полярностей с амплитудой 1 В. Уровень ослабления в дифференциальном режиме составил $-5,19; 11,57; 5,26$ и $5,22$ дБ, а в синфазном $-5,45; 11,7; 5,65$ и $5,65$ дБ для трапециевидного, оцифрованного, однополярного и биполярного воздействий соответственно. Переход на ближе расположенные пары проводников снижает уровень вносимых потерь на $0,57-0,76$ дБ для синфазного режима и на $0,61-0,82$ дБ для дифференциального режима в зависимости от выбранных линий. В итоге впервые исследованы синфазный и дифференциальные режимы работы сдвоенных структур с лицевой связью, что соответствует требованиям, обычно задаваемым (по обоим режимам) на практике по ослаблению.

При исследовании структур с МР в качестве объектов могут выступать не только ПП, но и гибкие печатные кабели (ГПК). Они могут использоваться для безопасного и надежного соединения между основным (резервируемым) и вторичным (резервирующим) элементами РЭУ. В [9, 10], в отличие от предыдущих работ, исследуются ГПК с однократным МР. Как и в [7], в работе [9] исследована способность ГПК с МР ослаблять СКИ после различных видов отказов.

Исследованы три структуры ГПК: двустороннего [11] (рис. 3), зеркально-симметричного двустороннего (рис. 4) и с лицевой и боковой связями с разным расположением опорных проводников (рис. 5). Для всех продемонстрировано ослабление СКИ после отказов в случае КЗ на входе, ХХ на входе, КЗ на входе и выходе, ХХ на входе и на выходе, КЗ на входе и ХХ на выходе. В качестве входного воздействия использовался трапециевидный импульс амплитудой 2 В. В случае отказа только на одном конце уровень ослабления больше, чем до отказа. Максимальный уровень ослабления достиг 5 раз в случае ХХ на входе: максимальная амплитуда выходного импульса до отказа равна 0,4 В, а после – 0,195 В. При отказе на обоих концах также наблюдается ослабление, но

значительно меньше (в 1,3–1,9 раза). В некоторых случаях при КЗ на входе и ХХ на выходе ослабление оказалось больше, чем до отказа и отказа на одном конце.

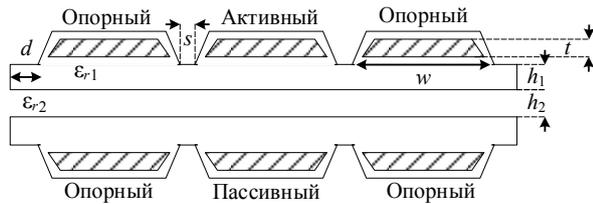


Рис. 3. Поперечное сечение двустороннего ГПК [9, 10]

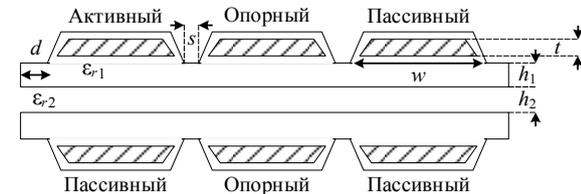


Рис. 4. Поперечное сечение зеркально-симметричного ГПК [9, 10]

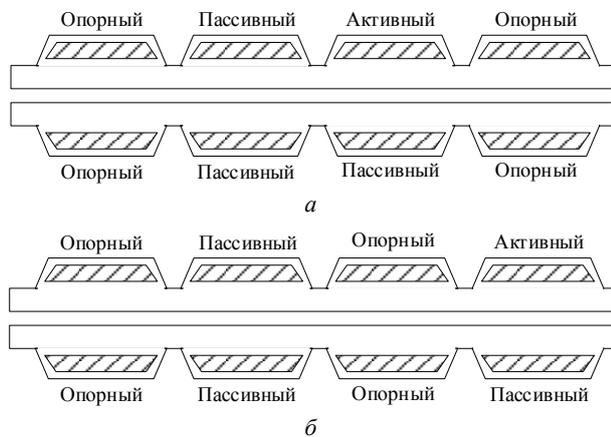


Рис. 5. Поперечные сечения ГПК с боковой и лицевой связью (а) и с попарно-лицевой связью (б) [9, 10]

В [10] рассмотрены ранние исследования различных структур ГПК с МФ, а также, как в [9], выполнено квазистатическое моделирование трех структур ГПК, основанных на модификации МФ на двухсторонней ПП. Выбрана одна из них для реализации ГПК с однократным МР. Также исследовано влияние расстояния между ГПК на разность погонных задержек и амплитуду импульсов разложения. Выявлено, что с ростом этого расстояния уменьшаются разность задержек и ослабление СКИ. При минимальном исследованном расстоянии между ГПК получено ослабление 3,2 раза для двухстороннего ГПК (рис. 3), 3,8 раза – для зеркально-симметричного ГПК (рис. 4) и 4 раза – для ГПК с лицевой и боковой связью (рис. 5, а). Важность этого исследования заключается в том, что, как многие кабели, ГПК могут иметь довольно большую длину, способствующую модальному разложению СКИ, а также много проводников, используемых не как сигнальные, а экранирующие, расположение которых влияет на ослабление

СКИ. Примечательно и обстоятельное исследование влияния на эффективность МР граничных условий после различных отказов.

В работе [12] рассмотрены временные характеристики двуслойной ПП с однократным МР с проводниками на внешнем слое (рис. 6), а также исследовано влияние геометрических параметров поперечного сечения структуры на разность погонных задержек и среднее геометрическое импедансов мод. Временной отклик рассчитывался при подаче трапецидального импульса амплитудой 2 В общей длительностью 30 нс. Исследованная структура гарантирует ослабление входного импульса в 2 раза. В результате установлено, что из всех рассмотренных параметров наиболее сильно на разность погонных задержек влияют высота нижнего слоя подложки и толщина проводников. Поэтому для увеличения разности погонных задержек для таких структур рекомендовано брать максимально возможные из указанных параметров с учетом их влияния на среднее геометрическое импедансов мод. Это исследование примечательно возможностью использования для МР (за счет максимизации разности задержек четной и нечетной мод) структуры, которая ранее исследовалась как пара связанных подвешенных полосковых линий с целью минимизации перекрестной наводки на дальнем конце (за счет выравнивания задержек четной и нечетной мод).

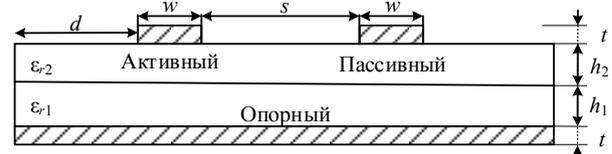


Рис. 6. Поперечное сечение ПП с проводниками на внешнем слое [12]

При изучении характеристик структур с МР до и после отказов также необходимо исследовать влияние климатических условий окружающей среды на эти характеристики. Таким целям посвящена работа [13]. В ней представлены результаты экспериментальных исследований ПП с МР (рис. 7) до и после отказов, но, в отличие от остальных работ, исследования выполнены в частотной области и с учетом температуры окружающей среды от минус 50 до 150 °С с использованием специальной климатической камеры.

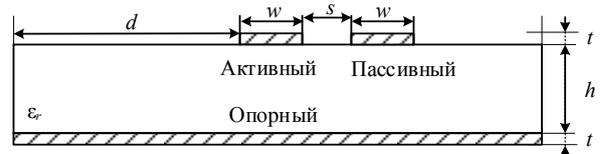


Рис. 7. Поперечное сечение ПП с однократным МР [13]

Рассмотрены частотные зависимости модулей коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и передачи $|S_{21}|$. Показано, что после отказа сохраняется эффект МР, но при высоких температурах замечено сужение диапазона

рабочих частот полезного сигнала. При сравнении ПП с и без МР наблюдалось уменьшение $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ с МР со сдвигом в сторону низких частот. Также $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ ПП с МР до и после отказов уменьшаются при повышении температуры и увеличиваются при ее понижении относительно результатов при комнатной температуре. Параметры $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для ПП с МР оказались меньше на 1,2 дБ, чем без МР, а после отказов – на 0,5 дБ. А $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ после КЗ оказались в среднем на 5 дБ меньше, чем до отказа и без МР, а после ХХ – на 4 дБ выше. Результаты исследования позволяют в дальнейшем уменьшить чувствительность характеристик ПП к перепадам температуры окружающей среды за счет выбора других материалов ПП. Эта объемная работа уникальна совокупностью исследованных аспектов: частотные характеристики, температура, виды отказов с МР и без него.

Для защиты высокоскоростных интегральных схем (ИС) от ЭСР и перенапряжения используются дополнительные электронные компоненты: резисторы, стабилитроны, TVS-диоды и т.д. Помимо перечисленных устройств, также могут применяться схемы с МР.

В работе [14] исследована критичность влияния СКИ различной полярности на эффективность защиты ИС, состоящей из диодной схемы и структуры с МР. Рассмотрены случаи подачи импульсов амплитудой 1 000 В одной полярности, образовавшихся на выходе резервируемого проводника в схеме с МР, и различной полярности, образовавшихся на выходе резервирующего проводника, на вход диодной системы с включенным питанием и без питания. Наибольшая амплитуда импульса 414 В на выходе защитной системы наблюдалась при подаче двух однополярных импульсов с выключенным питанием. При подаче импульсов разной полярности амплитуда достигала 395 В. Когда защитная схема подключена к питанию, амплитуда импульсов на ее выходе не превышала 85 В. В результате авторы рекомендовали совместно использовать диодную схему и структуру с МР для повышения эффективности и надежности защиты ИС. Это исследование важно оценкой возможных угроз не только резервной, но и резервирующим цепям.

Работа [15] отличается от рассмотренных прежде работ тем, что в ней исследовано распространение СКИ при подключении ГПК (рис. 8) к ПП с однократным МР с лицевой (см. рис. 7) и боковой связями (см. рис. 1).

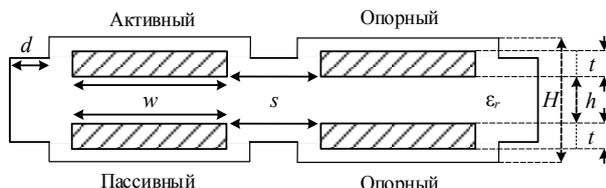


Рис. 8. Поперечное сечение ГПК из [15]

Показано, что для лицевой связи разница в задержках разложенных импульсов не меняла свой знак и варьировалась от 2,2 до 2,65 нс для максималь-

ных длин кабеля и линий ПП соответственно. Для торцевой связи эта разница меняла свой знак, варьируясь от минус 1,25 до +2,65 нс для максимальных длин линий ПП и ГПК соответственно. В результате показано, что при соотношении длин 0,32 разница задержек будет равна нулю. Таким образом, впервые показаны возможные изменения характеристик МР в структурах ГПК–ПП.

Помимо исследований в части кондуктивных помех, для полноценного анализа структур с МР исследовалась ИЭ от них. В работе [17] выполнено квазистатическое моделирование структуры с однократным МР в мини-ТЕМ-камере до 5 ГГц (рис. 9), а в [16] – в классической ТЕМ-камере до 2 ГГц. Сравнены полученные частотные зависимости напряжений на концах центрального проводника камер с измеренными результатами из других работ. В ходе моделирования относительная диэлектрическая проницаемость подложки ПП из стеклотекстолита варьировалась в диапазоне 4,7–5,6. Обнаружено, что её рост меняет резонансную частоту, при её максимальном значении результаты моделирования ближе всего к измеренным, а отличия объяснимы разницей в длине линий ПП и центрального проводника камер. Полученные результаты подтвердили возможность использования вычислительных ресурсов для получения быстрых оценок ИЭ без измерений, что позволяет оптимизировать и исследовать структуры с МР с учетом ИЭ еще на этапе проектирования до изготовления макетов. Это исследование открыло путь к виртуальным испытаниям устройств с МР.

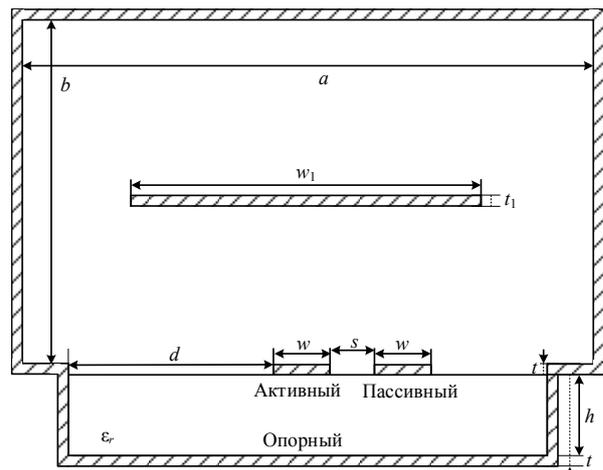


Рис. 9. Поперечное сечение ПП внутри ТЕМ-камеры [17]

В работе [18] выполнены анализ и оптимизация многослойной ПП с однократным МР проводников на внешнем (см. рис. 6) и внутреннем (рис. 10) слоях. Впервые выявлена зависимость разности погонных задержек от параметров подобных структур. Для анализа временных откликов на их вход поступал импульс амплитудой 1 В. Амплитуда выходных импульсов для обеих структур составила 0,5 В. Однако у ПП с проводниками на внутреннем слое наблюдалась малая разность задержек – 0,04 нс, в то время как на внешнем – 1 нс. Оптимизация геометрических пара-

метров структур выполнялась эвристическим поиском и генетическим алгоритмом с целью максимизации модуля разности погонных задержек с учетом и без учета согласования линий в тракте 50 Ом.

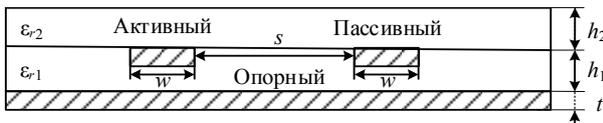


Рис. 10. Поперечное сечение ПП с проводниками на внутреннем слое [18]

В результате оптимизации получены наборы параметров, которые можно использовать для реализации различных задач при проектировании ПП. Например, в цифровых цепях или в радиочастотных и СВЧ-схемах, где требуется согласование линии передачи с трактом, выявлены возможности получения нулевой чувствительности характеристик структур к изменению отдельных параметров. Это исследование также примечательно возможностью использования для МР (за счет максимизации разности задержек четной и нечетной мод), но только уже более сложной структуры, которая ранее исследовалась как последовательно соединенные отрезки связанных подвешенных полосковых линий и связанных обращенных полосковых линий с целью минимизации перекрестной наводки на дальнем конце (за счет выравнивания задержек четной и нечетной мод).

В [19], как и [13], исследовано влияние окружающей среды, а именно температуры и влажности, на характеристики ПП с МР. Предложены модели для оценки этого влияния на ПП с однократным МР с боковой связью (см. рис. 7) во временной области. Рассмотрены три случая: при 25 °С, под слоем 1 мм воды при 25 °С и льда при -50 °С. Вычислен временной отклик на воздействие импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Для воды максимальная амплитуда импульсов на выходе достигала 0,76 В, для льда - 0,42 В, а без них - 0,44 В. Также выявлено, что влажность и температура могут значительно влиять на N-нормы вдоль проводников. Разработанные в работе модели позволят упростить и автоматизировать оценку влияния жестких условий окружающей среды на ПП с МР.

Несколько работ посвящено двукратному МР. Так, в работе [20] исследовано влияние магнетодиэлектрического покрытия на ИЭ в структуре (рис. 11, а) с расчетом временного отклика на воздействие трапецеидального импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Выявлено, что покрытие уменьшило амплитуду импульсов разложения на 0,17 В и напряжение, характеризующее ИЭ от структуры, на 0,2 В. Исследование отличается уникальным сочетанием: двукратное МР, магнетодиэлектрическое покрытие и ИЭ.

В работе [21] исследованы различные варианты асимметрии ПП с двукратным МР (см. рис. 11, б) и их влияние на ее характеристики при воздействии трапецеидального импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Также рассмотрены различные варианты порядка переключения в цепи после отказа ее элементов с

учетом симметрии и асимметрии ее проводников. Наименьшей амплитудой (0,346 В) обладал набор параметров с разной шириной проводников, но с одинаковым расстоянием между ними. В результате показано, что асимметрия ПП с МР улучшает их временные характеристики. Таким образом, работа выявила новый ресурс совершенствования МР.

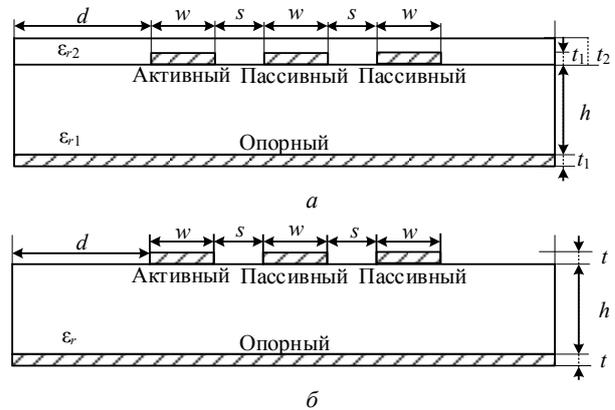


Рис. 11. Поперечное сечение ПП с двукратным МР с магнетодиэлектрическим покрытием (а) и без него (б) [20, 21]

В работах [22, 23] экспериментально исследованы ПП с двукратным МР (см. рис. 11) в части ИЭ. В [22] измерены ИЭ от ПП с двукратным МР до и после отказов через напряжение на концах линий в ТЕМ-камере, работающей до 2 ГГц, а в [23] – до 5 ГГц. Рассмотрены различные виды отказов на концах проводников и определен оптимальный вариант трассировки активного проводника по отношению к пассивным. После проведенного анализа рекомендовано трассировать активный проводник между пассивными, так как после отказов уровень ИЭ от него практически не увеличивается по сравнению с его трассировкой на краях. Также при его трассировке между пассивными восприимчивость ПП к ИЭ после отказов снижается на 20%, а на краях – на 40%. Результаты данных исследований позволят проектировать ПП с учетом уровней ИЭ от них и восприимчивости к ИЭ. Важно, что такие измерения для двукратного МР выполнены впервые, в том числе после отказов.

Много работ посвящено трехкратному МР. Например, в [24] рассмотрено применение зеркально-симметричной двусторонней ПП в качестве структуры с МР (рис. 12). Она отличается простой и недорогой реализацией по сравнению с ранее разработанными аналогами. Рассмотрены различные случаи отказов элементов цепи и варианты переключения после них: на нижний правый проводник, нижний левый и верхний правый. Впервые проанализировано подавление СКИ в подобной структуре. При воздействии трапецеидального импульса с амплитудой ЭДС 1 В максимальная из амплитуд выходных импульсов была 0,242 В до отказов, а после отказа в случае ХХ-50 и переключения на нижний правый пассивный проводник - 0,304 В. Кроме того, анализ N-норм разложенных импульсов показал, что 3-крат-

ное МР в данной структуре не только ослабляет СКИ, но и снижает вероятность электрического и диэлектрического пробоя и повреждения компонентов оборудования. Результаты моделирования показали, что вероятность диэлектрического пробоя в резервирующих цепях меньше, чем в резервируемой. Исследования показательны сочетанием простоты конструкции, высокой кратности (3) МР, полноты (после отказов) и оценкой угроз резервным цепям.

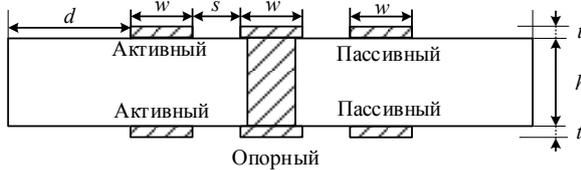


Рис. 12. Поперечное сечение двусторонней ПП [24]

В [25] моделировались и оптимизировались ПП с трехкратным МР двух типов: с опорным проводником в центре структуры (рис. 13) и в виде боковых полигонов (рис. 14). При этом рассмотрены как частотные, так и временные характеристики обеих ПП. Вычислены временные отклики на трапециевидный импульс с амплитудой ЭДС 2 В, электростатический разряд (ЭСР) третьего уровня критичности и оцифрованный импульс с осциллографа С9-11 амплитудой 0,249 В.



Рис. 13. Поперечное сечение ПП с опорным проводником в центре [25]

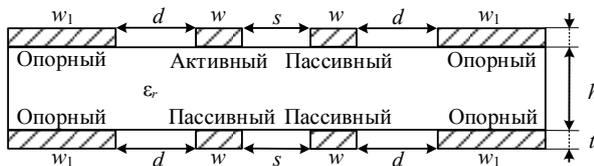


Рис. 14. Поперечное сечение ПП с опорным проводником в виде боковых полигонов [25]

Для трапециевидного импульса структура с опорным проводником в центре обеспечивает ослабление входного импульса в 4,04 раза, а в виде боковых полигонов – в 4,18 раза. ЭСР структуры ослабляют в 1,32 и 1,55 раза соответственно, а импульс с осциллографа с учетом потерь в линиях – в 7,32 и 5,79 раза. Благодаря оптимизации эвристическим поиском удалось снизить максимальное напряжение на выходе структуры с опорным проводником в виде боковых полигонов с 0,243 до 0,235 В, а также выровнять временные интервалы между импульсами разложения для обеих структур. Показано, что они могут быть успешно использованы при проектировании новых устройств с трехкратным МР. Работа отличается комплексным характером: две структуры, временные и частотные характеристики, оптимизация.

В [26] предложен новый метод экспериментального исследования характеристик цепей с трехкратным МР (рис. 15) в частотной и временной областях до и после отказов, позволяющий также определять оптимальный порядок переключения после отказов. Метод позволяет по характеристикам ПП, измеренным в частотной области, вычислить временной отклик с помощью программного обеспечения ADS. Измерены S-параметры до и после различных вариантов отказов на концах линий. Так, при воздействии импульса с амплитудой ЭДС 2 В на выходе структуры наблюдалось разложение с максимальной амплитудой 0,159 В (ослабление в 6,3 раза). Данный метод не требует генераторов специальных воздействий и измерения их результатов, а моделирует их по измеренным частотным зависимостям S-параметров, что значительно сокращает затраты средств и времени.

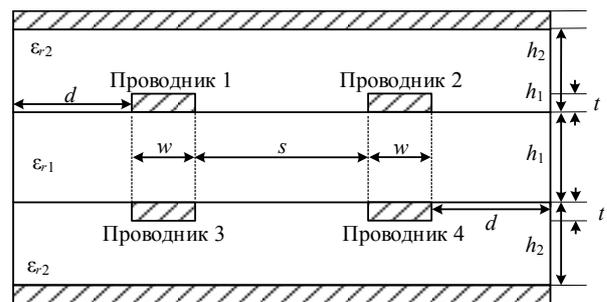


Рис. 15. Поперечное сечение четырехслойной экранированной ПП [26]

В работе [27] проведен предварительный анализ частотных и временных характеристик двуслойной ПП с трехкратным МР (см. рис. 14) для различных материалов диэлектрической подложки. Рассмотрены материалы с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r от 3,8 до 5,4 марок AD (410, 430 и 450) и FR-4. Для анализа временных характеристик на вход структуры подавался импульс с амплитудой ЭДС 2 В. Определены оптимальные параметры поперечного сечения структур, при которых достигаются максимизация минимальных разностей задержек и согласование структуры с трактом для всех рассмотренных материалов.

Для структур с оптимальными параметрами рассмотрены частотные зависимости S-параметров электродинамическим анализом. Выявлено, что с ростом ϵ_r незначительно уменьшаются частота среза и уровень первого резонанса: наибольшие значения у материала AD 410, а наименьшие – у FR-4. Таким образом, работа отличается редким исследованием (причем строгим электродинамическим анализом) улучшения трёхкратного МР за счет выбора реальных материалов, рост ϵ_r которых является основным для улучшения.

В [28] выполнены квазистатический и электродинамический анализы, а также измерения четырехпроводной ПП с трехкратным МР (см. рис. 14) при отказах ее элементов с различными вариантами переключения. При подаче воздействия с амплитудой ЭДС 2 В на выходе структуры наблюдались 4 импульса

амплитудой 0,25 В. Оптимизацией эвристическим поиском минимальная разность задержек между импульсами почти удвоена. Экспериментальное исследование проводилось на основе метода из работы [26]. Максимальное изменение амплитуды импульсов на дальнем конце резервируемого проводника до и после отказов при длительностях входных сигналов 120 и 240 пс составляет 26,8 и 28% соответственно. Результаты эксперимента и моделирования во временной и частотной областях согласуются. Таким образом, это исследование особо отличается полнотой и завершенностью.

В [29] разработана ПП с трехкратным МР с опорным проводником в виде боковых полигонов, анализ проводился только во временной области электродинамическим анализом для различных наклонов отводов исследуемой структуры. По рассчитанным временным откликам на воздействие импульса с амплитудой ЭДС 2 В видно, что для отводов с углами 90 и 60° наблюдается наименьшее влияние отражений от нагрузок по сравнению с отводом в 45°. В результате для реализации ПП с трехкратным МР выбран угол 90°. Исследование важно для практики изготовления макетов ПП с МР.

В [30] представлен алгоритм для анализа структур с трехкратным МР (см. рис. 14) после различных видов отказа. Он позволяет проводить моделирование, оценку и выбор оптимального порядка переключения цепей. Выполнена апробация алгоритма квазистатическим анализом на конкретной структуре с трехкратным МР. При подаче импульса с амплитудой ЭДС 2 В на ее выходе наблюдалось его разложение на 4 импульса с максимальной амплитудой 0,238 В до отказа. Определен оптимальный порядок переключения после отказа по критерию минимальной амплитуды на выходе.

В [31] также изучен квазистатическим анализом порядок переключения ПП с трехкратным МР до и после отказов, но в данном исследовании объектом анализа являлась экранированная ПП (см. рис. 15). При подаче импульса с амплитудой ЭДС 2 В на выходе максимальное напряжение достигало 0,243 В до отказа. Как и в [30], оптимальный порядок переключения определен по критерию максимального ослабления. Указанные исследования важны открывающейся возможностью уменьшения помех после отказов вовсе без затрат: выбором оптимального порядка последующих переключений на остающиеся резервные цепи.

В работе [32] продолжено исследование, начатое в [7], на ПП с трехкратным МР до и после отказов (см. рис. 15). Представлены результаты вычислений электродинамическим анализом и измерений во временной и частотной областях, а также зависимости N -норм от отказов. Как и в предыдущих работах, рассмотрены различные варианты переключений цепи после отказов и выбран оптимальный. Обнаружено, что изменение максимальной амплитуды на выходе после отказов не превышает 8,18%, из чего можно сделать вывод о том, что данная структура с МР

ослабляет СКИ даже после отказов. Данный вывод подтвердился сравнением результатов, полученных моделированием и экспериментально. Поэтому это исследование важно своей обстоятельностью и продолжением экспериментальных исследований в части перехода от однократного к трёхкратному МР.

В [33] впервые исследованы 4 структуры с трехкратным МР с исходным и оптимальным наборами параметров после отказов вдоль проводников квазистатическим анализом. Рассмотрены варианты отказа на конце, вдоль проводников и отказов двух проводников одновременно. Рассмотренные структуры: ПП с опорным проводником в центре (см. рис. 13), кабель с опорным проводником вокруг (рис. 16), ПП с опорным проводником сверху и снизу (см. рис. 15) и ПП с опорным проводником в виде боковых полигонов (см. рис. 14). Для каждой структуры выбран оптимальный порядок переключения, позволяющий уменьшить максимальное выходное напряжение на 5–72 %. Таким образом, обстоятельно исследованы сразу несколько структур с трёхкратным МР и впервые с возможностью отказа вдоль трассы, в том числе с оптимизацией порядка переключения.



Рис. 16. Поперечное сечение структуры с МР и опорным проводником вокруг сигнальных [32]

В [34] представлены результаты квазистатического моделирования во временной и частотной областях для структур с трехкратным МР и опорными проводниками двух типов: вокруг сигнальных (см. рис. 16), а также сверху и снизу (см. рис. 15). Временной отклик рассчитывался при подаче на структуру трех типов воздействия, ранее описанных в [25]. Структуры с опорным проводником вокруг сигнальных и сверху и снизу ослабили входной сигнал: для трапециoidalного импульса – в 2,01 и 3,98 раза, для ЭСР – в 1,22 и 1,17 раза, для оцифрованного импульса – в 2,28 и 5,29 раза соответственно. Для обеих структур выполнена оптимизация параметров эвристическим поиском, уравнивая разности задержек между разложенными импульсами и уменьшившая их амплитуду с 0,5 до 0,29 В с опорным проводником вокруг сигнальных и с 0,25 до 0,24 В – снизу и сверху. Анализ, проведенный в работе, показал, что эти структуры можно использовать при разработке новых устройств с трехкратным МР. Работа примечательна анализом структур с различными опорными проводниками.

В работах [35, 36], как и в [22, 23], представлены измерения ИЭ, но на ПП с трехкратным МР (рис. 17). Оценены ИЭ от ПП с МР путем измерения их S -параметров в ТЕМ-камере после отказов. Определен оптимальный вариант трассировки активного проводника по отношению к пассивным с учетом уровня ИЭ: на краях четырехпроводной ПП. Работа важна своей практической направленностью (измерения), высокой кратностью МР (3) и мало исследованной оценкой (ИЭ).



Рис. 17. Поперечное сечение четырехпроводной ПП [35]

В табл. 1 и 2 представлена классификация рассмотренных в обзоре работ по конструктивным признакам исследуемых структур и по видам и особенностям анализа соответственно.

Видно, что большая часть рассмотренных работ направлена на исследование характеристик структур с однократным и трехкратным МР как во временной, так и в частотной областях. В основном исследования проведены моделированием с помощью квазистатического анализа. Это можно объяснить тем, что он позволяет с достаточной точностью анализировать различные конфигурации без значительных вычислительных затрат по сравнению с электродинамическим анализом. Также можно отметить, что в большей части работ основным объектом исследования выступают ПП с МР, только в некоторых работах изучены характеристики ГПК и других кабелей. Основная часть рассмотренных работ представляет результаты исследований структур с МР до и после отказов и оптимального порядка переключения проводников.

Только в двух работах исследованы характеристики структур с МР при различных условиях окружающей среды, в остальных анализ выполнялся при нормальных условиях. Самые распространенные структуры для анализа в рассмотренных работах: ПП с опорным проводником в виде боковых полигонов и экранированная четырехслойная ПП.

Таблица 1

Классификация работ по конструктивным признакам исследуемых структур

№	Кратность МР			Объект исследования			Тип материала	ϵ_r	Число слоев ПП			№ рисунка
	1	2	3	ПП	ГПК	Кабель			2	3	≥ 4	
[5]	+			+				5,4	+			7
[7]	+			+			FR-4 1080, RO-3010	10,2; 4,3			+	1
[8]	+			+			FR-4	4,6	+			2
[9]	+				+		Полиимид	3,5				3, 4, 5
[10]	+				+		Полиимид	3,5				3, 4, 5
[12]	+			+			Стеклотекстолит	10,2; 4	+			6
[13]	+			+			Стеклотекстолит	4,7	+			7
[14]	+			+					+			7
[15]	+			+	+			4; 4,3	+		+	1, 7, 8
[16]	+			+			Стеклотекстолит	4,7–5,6	+			7
[17]	+			+			Стеклотекстолит	4,7–5,6	+			7
[18]	+			+				4; 10,2	+			6, 10
[19]	+			+				4,4; 4,57	+			7
[20]		+		+				4,6	+			11 (а)
[21]		+		+			FR-4	4	+			11 (б)
[22]		+		+				4,7	+			11 (б)
[23]		+		+				4,7	+			11 (б)
[24]			+	+				4,5	+			12
[25]			+	+				4,5; 5	+	+		13, 14
[26]			+	+				4,3; 10,2			+	15
[27]			+	+			AD (410, 430, 450), FR-4	3,8-5,4	+			14
[28]			+	+			FSD1020T	10,2	+			14
[29]			+	+			Оксид алюминия	9,8	+			14
[30]			+	+				4,5	+			14
[31]			+	+				4,3; 10,2			+	15
[32]			+	+			FR-4 1080, RO-3010	11,2; 4,55			+	15
[33]			+	+		+		5; 10; 6; 16; 30; 4,3	+	+	+	13, 14, 15, 16
[34]			+	+		+		10; 4,5			+	15, 16
[35]			+	+				4,7	+			17
[36]			+	+				4,7	+			17

Таблица 2

Классификация работ по видам и особенностям анализа

№	Вид анализа			Область исследования		Отказы	Учет температуры	Оптимизация	ИЭ
	Эксперимент	Моделирование		Временная	Частотная				
		Квазистатическое	Электродинамическое						
[5]	+				+	+	+		+
[7]	+	+	+	+	+	+			
[8]		+		+				+	
[9]		+		+		+			
[10]		+		+					
[12]		+		+					
[13]	+				+	+	+		+
[14]			+	+					
[15]		+		+					
[16]		+			+				+
[17]		+			+				+
[18]		+		+				+	
[19]		+		+			+		
[20]			+	+					+
[21]		+		+		+			
[22]	+				+	+			+
[23]	+				+	+			+
[24]		+		+		+			
[25]		+		+	+			+	
[26]	+		+	+	+	+			
[27]		+	+	+	+			+	
[28]	+	+	+	+	+	+			
[29]			+	+					
[30]		+		+		+			
[31]		+		+		+			
[32]	+		+	+	+	+			
[33]		+		+		+			
[34]		+		+	+			+	
[35]	+				+	+			+
[36]	+				+	+			+

При исследовании характеристик ПП в большей части работ в качестве материала диэлектрической подложки выбирались дешевые стеклотекстолит и FR-4, но за счет роста относительной диэлектрической проницаемости также пытались увеличить интервалы между импульсами разложения или их ослабление. Между тем мало работ по учету уровня ИЭ от структур с МР.

Также стоит отметить, что в результате исследований за обозреваемый период зарегистрированы программы для ЭВМ и патенты. Программы [37–39] предназначены для оценки ИЭ: [37] – для структур с МР, [38] – для одного и двух связанных проводов над плоскостью земли с диэлектриком и без него, [39] – для ПП с МР путём виртуальных испытаний в мини-ТЕМ-камере. Программа [40] предназначена для анализа четырехслойной зеркально-симметричной полосковой структуры с трехкратным МР.

Все полученные за обозреваемый период патенты относятся к конструированию и трассировке

ПП с МР. Патент [41] предлагает способ трассировки ПП с МР (рис. 18), включающий трассировку резервируемой цепи на верхнем слое, а резервирующей – зеркально на нижнем. За прототип принят способ [11], предлагающий компоновку и трассировку резервируемой цепи на верхнем слое подложки, выполнение сигнальных проводников за счет зазоров в опорной проводящей пластине, а компоновку и трассировку резервной цепи на нижнем слое подложки зеркально верхнему слою. Недостатком старого способа является большая масса ПП и недостаточное ослабление СКИ. Новый предложенный способ уменьшает массу ПП и увеличивает уровень ослабления СКИ. При воздействии с амплитудой ЭДС 2 В максимальная амплитуда выходного импульса достигает 0,42 В, в то время как у прототипа – 0,5 В.

В том же году получен патент [42], основанный на классическом способе [43], который отличается малым коэффициентом ослабления, большой массой ПП и изгибом, возникающим из-за асимметрии рас-

положения проводников на нижней и верхней сторонах ПП. Новый патент предлагает способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с МР (рис. 19), в результате которого достигается уменьшение массы и изгиба ПП, а также на 20% увеличивается уровень ослабления СКИ: 0,42 В на выходе, в то время как у прототипа – 0,5 В.

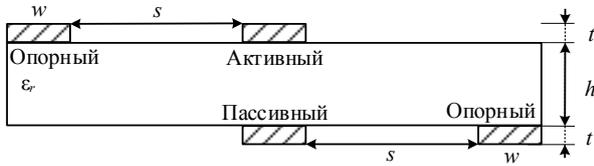


Рис. 18. Поперечное сечение способа трассировки двухсторонней ПП с МР и уменьшенным количеством проводников [41]

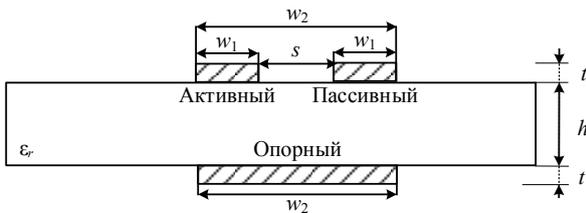


Рис. 19. Поперечное сечение способа симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с МР [42]

Патент [44] также усовершенствует способ [43], повышая надежность ПП за счет трассировки резервируемых и резервных проводников с единым опорным проводником (рис. 20). При этом над резервным и резервируемым проводниками располагается связывающий проводник так, чтобы он имел необходимую для модального разложения электромагнитную связь с сигнальными. Одновременно с патентом [44] получен патент [45], предлагающий способ удаленной компоновки печатных проводников цепей с трехкратным МР. Патент усовершенствует способ, предложенный в [46], недостатком которого являлась низкая надежность цепи из-за высокой плотности компоновки (рис. 21) позволяет повысить защиту структуры от механического повреждения при сохранении помехозащищенности за счет модального разложения.

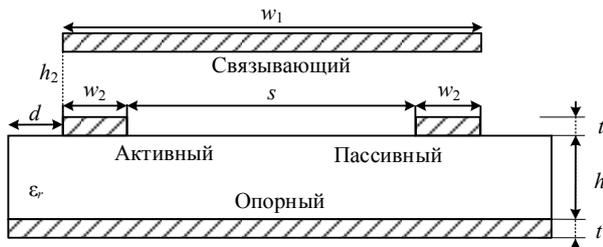


Рис. 20. Поперечное сечение структуры с удаленной трассировкой печатных проводников цепей с однократным МР [44]

Выбор структур с конечной землей для исследований ИЭ

Для анализа ИЭ квазистатическим подходом с последующим изготовлением макетов для экспери-

ментального исследования необходимо определить ПП с конечной схемной землей в виде одного опорного проводника с однократным или многократным МР, подходящие для такой цели.

Исследование экранированных ПП из работ [7, 26] с однократным (см. рис. 1) и трехкратным (см. рис. 15) МР затруднено их сложной структурой, не позволяющей выполнить экспериментальную оценку ИЭ в ТЕМ-камере, а также квазистатическим подходом с помощью модели, разработанной в [6], из-за присутствия нескольких опорных проводников. По этой же причине для анализа не подходят ПП из [24, 25, 46, 41]: в этих структурах несколько опорных проводников трассируются на двух сторонах ПП (см. рис. 12, 14, 18) или внутри слоя подложки (см. рис. 21).

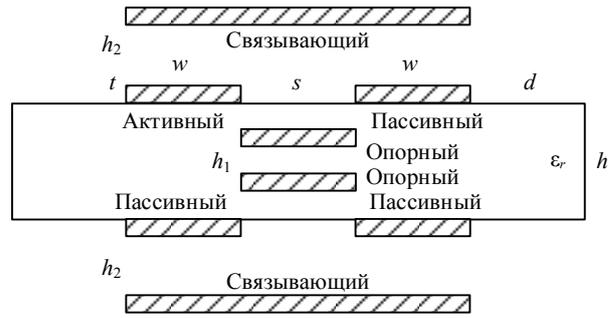


Рис. 21. Поперечное сечение структуры с удаленной компоновкой печатных проводников цепей с трехкратным МР [45]

Экспериментально оценить уровень ИЭ в ТЕМ-камере от ГПК [9, 10, 15] затруднительно из-за их гибкости и нарушения однородности поля в камере, возникающей вследствие отсутствия связи схемной земли покрытого ГПК с землей камеры. Более того, в них присутствует несколько опорных проводников (см. рис. 3–5, 8). По тем же причинам кабель из работы [32] не подходит для измерения ИЭ в ТЕМ-камере (см. рис. 16).

Структуры из работ [13, 20, 21, 35] не подходят для планируемого исследования, так как имеют бесконечную плоскость земли (см. рис. 7, 11, 17). Более того, они уже исследованы в части ИЭ: как моделированием, так и экспериментально.

ПП из [12, 18] также имеют бесконечную землю, при этом в ПП из [18] (см. рис. 10) сигнальные проводники расположены внутри слоя диэлектрической подложки, что усложняет оценку ИЭ от них экспериментально в ТЕМ-камере и моделированием квазистатическим подходом (см. рис. 6). ПП из [45] (см. рис. 20) также не подходит для рассматриваемого исследования как экспериментально, так и моделированием.

В результате для исследований в части ИЭ подходят только следующие структуры: ПП с однократным МР, рассмотренная в работе [8] (см. рис. 2), ПП с однократным МР, предложенная в новом способе [43] (см. рис. 19), ПП с трехкратным МР, рассмотренная в работе [25] (см. рис. 13). Для этих структур ранее не проводилось исследований ИЭ квазистатическим подходом и экспериментально.

Заключение

В работе выполнен обзор исследований и достижений в области МР с 2021 г. до настоящего времени. Он выявил ряд новых тенденций.

– В табл. 1 и 2 сведены разные аспекты МР, которые почти не рассматривались ранее или в совокупности.

– Исследования дифференциального и синфазного режимов.

– Расширение исследований кабелей с МР, поскольку они имеют большие ресурсы для МР в части длины и числа проводников.

– Исследования структур для МР, в которых оно ранее считалось неэффективным.

– МР в структурах кабель–плата.

– Первые виртуальные испытания устройств с МР.

– Использование различных диэлектрических материалов, в том числе магнитоэлектриков с потерями.

– Асимметрия поперечного сечения, позволяющая улучшить характеристики МР.

– Анализ ИЭ.

– Оценка угроз резервным цепям.

– Широкое использование вычисления временного отклика на любое воздействие по измеренным S -параметрам структуры с МР.

– Исследование оптимального порядка последующих переключений на остающиеся резервные цепи при многократном МР.

– Анализ структур с различными опорными проводниками.

– Новые способы МР (со связывающими проводниками), повышающие стойкость к механическим воздействиям за счет удаленной трассировки резервных проводников.

Обзор обращает особое внимание на следующие факты.

– Много работ направлено на исследование временных характеристик различных структур при распространении в них СКИ.

– Исследования характеристик до и после отказов элементов цепи с МР показали эффективность его применения даже после выхода системы из строя и при различных условиях окружающей среды.

– Оптимизированы параметры ПП с МР с ранее предложенными способами трассировки для достижения наилучших временных характеристик.

– Также исследована эффективность применения МР совместно с другими защитными системами для повышения эффективности и надежности защиты ИС.

– Результаты исследований применимы в проектировании бортовой аппаратуры.

Между тем в результате выполненного обзора и анализа рассмотренных работ можно сделать следующие выводы.

– Тема ИЭ от структур с многократным МР недостаточно изучена, несмотря на проведенные исследования в ТЕМ-камерах, разработанные подходы и зарегистрированные программы для ЭВМ.

– Различные типы ПП широко исследованы в части кондуктивной эмиссии, в то время как в части ИЭ рассмотрены только классические структуры с плоскостью земли.

– Выбраны оптимальные структуры с конечной схемной землей для дальнейшего исследования уровня ИЭ от них и последующего изготовления реальных макетов этих структур для проведения измерений.

Исследование МР имеет высокую актуальность, а также большой потенциал. Это подтверждается двумя поддержанными и успешно выполненными проектами РФ (каждый по 3 года с продолжением по 2 года), а также рядом ведущихся сейчас проектов по малым грантам РФ. Кроме того, множество новых решений свидетельствует о том, что проблема далека от окончательного решения, но есть исследователи, продолжающие её решать.

Исследование выполнено в ТУСУРе за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00579, <https://rscf.ru/project/24-29-00579/>.

Литература

1. Шарафутдинов В.Р. Способы резервирования элементов радиотехнических устройств на основе модальной фильтрации: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2019. – 153 с.

2. 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. DOI: 10.1109/EMCZUR.2007.4388248.

3. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: монография / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2013. – 151 с.

4. Алхадж Хасан А. Обзор исследований по модальному резервированию / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 54–67.

5. Alhaj Hasan A. Ensuring the Reliability and EMC by Modal Reservation: A Brief History and Recent Advances / A. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2022. – Vol. 14. – P. 2466. DOI: 10.3390/sym14112466.

6. Zima Y. Improved Estimation of the Radiated Emission from Structures with Multiple Modal Reservation / Y. Zima, A.F. Alhaj Hasan // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2024. – P. 780–783. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615032.

7. Medvedev A.V. Experimental study of a structure with single modal reservation before and after failure / A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2022. – Vol. 64, No. 4. – P. 1171–1181.

8. Lakoza A.M. The Efficiency of Conductor Placement in Circuits with Single Modal Redundancy in Differential and Common Modes / A.M. Lakoza, V.P. Kosteletsky // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2023. – P. 1210–1214. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225177.

9. Samoylichenko M.A. Influence of Failures in Flexible Printed Cables with Single Modal Reservation on the Attenuation of an Ultra-Short Pulse / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices

(EDM). – 2023. – P. 520–524. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225220.

10. Samoylichenko M.A. Single Modal Reservation of Flexible Printed Cables / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2023. – P. 317–322. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10138969.

11. Пат. 2 603 843 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ резервирования для печатных плат / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2015137547/07; заявл. 02.09.15; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 8 с.

12. Морозов С.Р. Характеристики структуры с проводниками на внешнем слое печатной платы с модальным резервированием / С.Р. Морозов, А.В. Медведев // Научная сессия ТУСУР–2023: сборник избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 17–19 мая 2023 г. – Томск: В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева); ТУСУР, 2023. – Ч. 2. – С. 48–51.

13. Алхадж Хасан А. Сравнение измеренных частотных характеристик печатных плат с модальным резервированием до и после отказа при разных температурах / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов // Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 37–51.

14. Zhecheva A.V. Simulating Integrated Circuit Immunity to Powerful Conducted Emissions in Circuits with Single Modal Reservation / A.V. Zhecheva, Y.S. Zhechev // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2021. – №. 4. – P. 122–126.

15. Medvedev A.V. Studying the Propagation of an Ultrashort Pulse in a Cable Attached to a PCB System with Modal Reservation // 2021 IEEE 22th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2021. – P. 167–170. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507706.

16. Алхадж Хасан А. Виртуальные испытания структуры с модальным резервированием в системе TALGAT // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-28–2022): докл. 28-й Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 16 ноября 2022 г. – Томск: ТУСУР, 2022. – С. 102–107.

17. Алхадж Хасан А. Квазистатическое моделирование мини-ТЕМ-камеры в системе TALGAT для испытания структур с модальным резервированием до частоты 5 ГГц // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-28–2022): докл. 28-й Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 16 ноября 2022 г. – Томск: ТУСУР, 2022. – С. 96–101.

18. Морозов С.Р. Квазистатический анализ и оптимизация многослойной печатной платы с модальным резервированием и двусторонней трассировкой / С.Р. Морозов, А.В. Медведев // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 91–106. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-91-106.

19. Gazizov R.R. The Models for Evaluation of Environment Impact for the Circuit Board with Modal Reservation Using N-norms / R.R. Gazizov, T.R. Gazizov // 2022 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) – 2022. – P. 119–121.

20. Мурманский М.С. Применение магнитодиэлектрического покрытия в структуре с двукратным модальным резервированием / М.С. Мурманский, Е.С. Жечев // Научная сессия ТУСУР–2022: сборник избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 18–20 мая 2022 г. – Томск: В-Спектр, 2022. – Ч. 1. – С. 227–230.

21. Morozov S.R. Simulating an asymmetric structure with double modal reservation / S.R. Morozov, A.V. Medvedev // 2023 IEEE XVI International scientific and technical conference actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 2023. – P. 610–613.

22. Alhaj Hasan A. Radiated emissions from PCBs with double MR before and after failure / A. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // 2023 Russian workshop on power engineering and automation of metallurgy industry: research & practice (PEAMI). – 2023. – P. 49–53.

23. Alhaj Hasan A. Understanding the effectiveness of double modal reservation in PCB manufacturing: experimental study on radiated emissions / A. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // 2023 Russian workshop on power engineering and automation of metallurgy industry: research & practice (PEAMI). – 2023. – P. 44–48.

24. Samoylichenko M.A. Application of a Mirror-Symmetric Modal Filter on a Double-Sided Printed Circuit Board for Multiple Modal Reservation / M.A. Samoylichenko, A.V. Zhecheva // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2023. – P. 359–363.

25. Chernikova E.B. Multivariate analysis of multiconductor transmission lines for triple modal reservation / E.B. Chernikova, A. Belousov, A. Zabolotsky // 22st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – 2021. – P. 158–162.

26. Kosteletskii V.P. Method for Experimental Study of Circuits with Triple Modal Reservation in Time and Frequency Domains / V.P. Kosteletskii, A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2022. – P. 80–85.

27. Медведев А.В. Анализ защитных характеристик структуры двуслойной печатной платы из различных материалов с трехкратным модальным резервированием / А.В. Медведев, С.Р. Морозов // 28-я Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-28–2022». – Томск: ТУСУР, 2022. – С. 126–134.

28. Медведев А.В. Моделирование и экспериментальное исследование четырехпроводной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием при отказах её элементов // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 48–55.

29. Лакоза А.М. Разработка печатной платы с трехкратным модальным резервированием с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов / А.М. Лакоза, А.В. Медведев // Сборник избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2022»: в 3 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2022. – С. 224–227.

30. Медведев А.В. Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием после отказов / А.В. Медведев, Т.Р. Газизов // Матер. X Всерос. науч.-техн. конф.: Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. МЭС–2021, Москва. – 2021. – С. 59–66.

31. Medvedev A.V. Studying the circuit switching order after failures for a shielded structure with triple modal reservation / A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – 2021. – P. 0427–0430.

32. Medvedev A.V. Experimental study of a structure with triple modal reservation before and after failures / A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – No. 65(1). – P. 360–363.

33. Медведев А.В. Моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 175–203.

34. Chernikova E.B. Quasi-static analysis of shielded multiconductor transmission lines for triple modal reservation /

E.B. Chernikova, A.O. Belousov // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBERIT). – 2021. – P. 0259–0263.

35. Alhaj Hasan A. Experimental study on after failure radiated emissions of triple modal reservation circuits / A. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2023. – P. 837–842.

36. Alhaj Hasan A. Exploring the impact of triple modal reservation on radiated emissions: experimental insights for PCB manufacturing / A. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // Матер. VII Междунар. научной конф. «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST–2023), 2–6 октября 2023 г., Астрахань. – 2023. – С. 173–176.

37. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663568. Программа для оценки излучаемой эмиссии структуры с модальным резервированием / А. Алхадж Хасан, А.А. Квасников, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2021662273. Дата поступ.: 6 августа 2021 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 18 августа 2021 г.

38. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663457. Программа для оценки излучаемой эмиссии от одного и двух связанных проводов над плоскостью земли с диэлектриком и без него / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2021662294. Дата поступ.: 6 августа 2021 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 17 августа 2021 г.

39. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683074. Оценка излучаемых эмиссий от печатной платы с модальным резервированием путём виртуальных испытаний в мини-ТЕМ-камере / А. Алхадж Хасан, А.А. Квасников, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2022681828. Дата поступ.: 18 ноября 2022 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30 ноября 2022 г.

40. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680554. Анализ четырехслойной зеркально-симметричной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием / Е.С. Жечев, С.В. Власов, А.М. Заболоцкий. – Заявка № 2021669877. Дата поступ.: 08 декабря 2021 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 13 декабря 2021 г.

41. Пат. 2 784 710 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки двухсторонней печатной платы с модальным резервированием и уменьшенным количеством проводников / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов. – № 2 022 122 228; заявл. 16.08.22; опубл. 29.11.2022, Бюл. № 34. – 8 с.

42. Пат. 2 794 739 РФ, МПК Н 04 В 15/00. Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с модальным резервированием / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов. – № 2 022 130 296; заявл. 23.11.2022; опубл. 24.04.2023, Бюл. № 12. – 6 с.

43. Пат. 2 603 850 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2 015 129 253; заявл. 16.07.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 7 с.

44. Пат. 2 801 688 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием / Т.Р. Газизов, И.А. Иванцов. – № 2 022 131 709; заявл. 16.12.2022; опубл. 14.08.2023, Бюл. № 23. – 8 с.

45. Пат. 2 801 830 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ удаленной компоновки печатных проводников цепей с трехкратным модальным резервированием / Т.Р. Газизов, И.А. Иванцов. – № 2 022 132 011; заявл. 08.12.2022; опубл. 16.08.2023, Бюл. № 23. – 8 с.

46. Пат. 2 751 672 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием / Е.С. Жечев, А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов и др. – № 2 020 126 549; заявл. 10.08.2020; опубл. 15.07.2021, Бюл. № 20. – 9 с.

Зима Елизавета

Студентка, инженер каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-884-63-10
Эл. почта: zima_liza_1503@mail.ru

Газизов Рустам Рифатович

Мл. н.с. каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-7717-4215
Тел.: +7-952-802-23-10
Эл. почта: rustam.r.gazizov@tusur.ru

Zima Y., Gazizov R.R.

Modal reservation: state of the art

Modal reservation (MR) is one of the most effective ways to ensure electromagnetic compatibility and reliability of radio electronic equipment. Previously, a detailed review on the history of MR development and research related to it up to 2021 was performed. To evaluate the degree of MR development, a review of recent studies, including patents and registered computer programs, up to the present is performed and importance of each study is highlighted. Based on the review, the structures fitting for studying the level of radiated emission from them experimentally in TEM-cells and using the quasi-static approach were identified. In conclusion, novelty of presented studies is summarized.

Keywords: electromagnetic compatibility, modal filtration, modal reservation, printed circuit board, flexible printed cable, conducted emission, radiated emission.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69

References

1. Sharafutdinov V.R. *Sposoby rezervirovaniya elementov radiotekhnicheskikh ustroystv na osnove modal'noi fil'tratsii* [Methods of radio devices elements reservation based on modal filtering]. Dissertation for the Candidate of Sciences degree. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2019, 153 p. (in Russ.).

2. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection. *The 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 273–276. DOI: 10.1109/EMCZUR.2007.4388248.

3. Zabolotskii A.M., Gazizov T.R. *Modal'nye fil'try dlya zashchity bortovoi radioelektronnoi apparatury kosmicheskogo apparata* [Modal filters for protection of on-board radioelectronic equipment of a spacecraft]. TUSUR Publishing office, 2013, 151 p.

4. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. [A review of studies on modal reservation]. *Proceedings of TUSUR University*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 54–67 (in Russ.).

5. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. Ensuring the Reliability and EMC by Modal Reservation: A Brief History and Recent

Advances. *Symmetry*, 2022, vol. 14, p 2466. DOI:10.3390/sym14112466.

6. Zima Y., Alhaj Hasan A.F. Improved Estimation of the Radiated Emission from Structures with Multiple Modal Reservation. *2024 IEEE 25th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2024, pp. 780–783. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615032.

7. Medvedev A.V., Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Experimental study of a structure with single modal reservation before and after failure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, vol. 64, no. 4, pp. 1171–1181.

8. Lakoza A.M., Kosteletsky V.P. The Efficiency of Conductor Placement in Circuits with Single Modal Redundancy in Differential and Common Modes. *2023 IEEE 24th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2023, pp. 1210–1214. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225177.

9. Samoylichenko M.A., Gazizov T.R. Influence of Failures in Flexible Printed Cables with Single Modal Reservation on the Attenuation of an Ultra-Short Pulse. *2023 IEEE 24th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2023, pp. 520–524. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225220.

10. Samoylichenko M.A., Gazizov T.R. Single Modal Reservation of Flexible Printed Cables. *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2023, pp. 317–322. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10138969.

11. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Zabolotskiy A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob rezervirovaniya dlya pechatnykh plat* [Reservation method for printed circuit boards]. Patent RF, no. 2603843, 2016 (in Russ.).

12. Morozov S.R., Medvedev A.V. *Harakteristiki struktury s provodnikami na vneshnem sloe pechatnoy platy s modal'nym rezervirovaniem* [Characteristics of the structure with conductors on the outer layer of the PCB with modal reservation]. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2023: sbornik izbr. statej Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [TUSUR Scientific Session: Proceedings of the International scientific conference for Bachelor, Master and Postgraduate students], 2023, vol. 2, pp. 48–51.

13. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. [Comparing the Measured Frequency Characteristics of PCBs with Modal Reservation Before and After Failure at Different Temperatures]. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023; vol. 26, no. 2, pp. 37–51 (in Russ.).

14. Zhecheva A.V., Zhechev Y.S. Simulating Integrated Circuit Immunity to Powerful Conducted Emissions in Circuits with Single Modal Reservation. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MJeS)* [Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)], 2021, no. 4, pp. 122–126.

15. Medvedev A.V. Studying the Propagation of an Ultra-short Pulse in a Cable Attached to a PCB System with Modal Reservation. *2021 IEEE 22th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2021, pp. 167–170. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507706.

16. Alhaj Hasan A. [Virtual experiment of a structure with modal reservations in the TALGAT system]. *Natural and Intellectual Resources of Siberia: Proceedings of the 28th International Scientific and Practical Conference*, 2022, pp. 102–107.

17. Alhaj Hasan A. [Quasi-static simulation of a mini-TEM cell in the TALGAT system for testing structures with modal reservation up to a frequency of 5 GHz]. *Natural and*

Intellectual Resources of Siberia: Proceedings of the 28th International Scientific and Practical Conference, 2022, pp. 96–101.

18. Morozov S.R., Medvedev A.V. [Quasi-static analysis and optimization of a multilayer PCB with modal reservation and a two-sided routing]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 91–106. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-91-106.

19. Gazizov R.R., Gazizov T.R. The Models for Evaluation of Environment Impact for the Circuit Board with Modal Reservation Using N-norms. *2022 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, 2022, pp. 119–121.

20. Murmanskii M.S. *Primenenie magnitodielektricheskogo pokrytiya v strukture s dvukratnym modal'nym rezervirovaniem* [Application of magnetodielectric coating in a structure with double modal redundancy]. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2023: sbornik izbr. statej Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [TUSUR Scientific Session: Proceedings of the International scientific conference for Bachelor, Master and Postgraduate students], 2022, vol. 1, pp. 227–230.

21. Morozov S.R., Medvedev A.V. Simulating an asymmetric structure with double modal reservation. *2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, 2023, pp. 610–613.

22. Alhaj Hasan A., Semenyuk V.A., Gazizov T.R. Radiated emissions from PCBs with double MR before and after failure. *2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*, 2023, pp. 49–53.

23. Alhaj Hasan A., Semenyuk V.A., Gazizov T.R. Understanding the effectiveness of double modal reservation in PCB manufacturing: experimental study on radiated emissions. *2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: research & Practice (PEAMI)*, 2023, pp. 44–48.

24. Samoylichenko M.A., Zhecheva A.V. Application of a Mirror-Symmetric Modal Filter on a Double-Sided Printed Circuit Board for Multiple Modal Reservation. *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2023, pp. 359–363.

25. Chernikova E.B., Belousov A., Zabolotskiy A. Multivariate analysis of multiconductor transmission lines for triple modal reservation. *22st International Conference of Young Specialists on Micro/nanotechnologies and Electron Devices EDM*, 2021, pp. 158–162.

26. Kosteletskii V.P., Medvedev A.V., Zhechev Y.S. Method for Experimental Study of Circuits with Triple Modal Reservation in Time and Frequency Domains. *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con)*, 2022, pp. 80–85.

27. Medvedev A.V. [Analysis of the protective characteristics of the structure of a two-layer printed circuit board made of various materials with three-fold modal reservation]. *Natural and Intellectual Resources of Siberia: Proceedings of the 28th International Scientific and Practical Conference*, 2022, pp. 126–134.

28. Medvedev A.V. [Experimental evaluation of decomposition pulse voltage in a double-sided PCB with triple modal reservation after failures]. *Proceedings of TUSUR University*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 48–55 (in Russ.).

29. Lakoza A.M., Medvedev A.V. *Razrabotka pechatnoi platy s trekhkratnym modal'nym rezervirovaniem s ispolneniem opornogo provodnika v vide bokovykh poligonov* [Designing a printed circuit board with triple modal reservation with side polygons as reference conductor] *Nauchnaya sessiya TUSUR-*

2023: *sbornik izbr. statej Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenykh* [TUSUR Scientific Session: Proceedings of the International scientific conference for Bachelor, Master and Postgraduate students], 2022, vol. 1, pp. 224–227.

30. Medvedev A.V., Gazizov T.R. [Algorithm for analysis of structures with triple modal reservation after failures]. *All-Russia Science&Technology Conference Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development*, 2021, pp. 59–66.

31. Medvedev A.V., Gazizov T.R. Studying the circuit switching order after failures for a shielded structure with triple modal reservation. *2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, 2021, pp. 0427–0430.

32. Medvedev A.V., Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Experimental study of a structure with triple modal reservation before and after failures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2023, no. 65(1), pp. 360–363.

33. Medvedev A.V. [Simulating, evaluating, and selecting the optimum switching order for circuits with triple modal reservation after failures along the conductors]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 175–203.

34. Chernikova E.B., Belousov A.O. Quasi-static analysis of shielded multiconductor transmission lines for triple modal reservation. *2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, 2021, pp. 0259–0263.

35. Alhaj Hasan A., Semenyuk V.A., Gazizov T.R. Experimental study on after failure radiated emissions of triple modal reservation circuits. *2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2023, pp. 837–842.

36. Alhaj Hasan A., Semenyuk V.A., Gazizov T.R. Exploring the impact of triple modal reservation on radiated emissions: experimental insights for PCB manufacturing. *2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2023)*, 2023, pp. 173–176.

37. Alhaj Hasan A., Kvasnikov A.A., Gazizov T.R. *Programma dlya otsenki izluchaemoy emissii struktury s modal'nykh rezervirovaniem* [Program for estimating the radiated emission from a structure with modal reservation]. Certificate of state registration of computer program RF, no 2021663568, 2021 (in Russ.).

38. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. *Programma dlya otsenki izluchaemoy emissii ot odnogo i dvukh svyazannykh provodov nad ploskost'yu zemli s dielektrikom i bez nego* [Program for estimating the radiated emission from one and two bounded conductors above the ground plane with and without dielectrics]. Certificate of state registration of computer program RF, no 2021663457, 2021 (in Russ.).

39. Alhaj Hasan A., Kvasnikov A.A., Gazizov T.R. *Otsenka izluchaemykh emissii ot pechatnoi platy s modal'nykh rezervirovaniem putem virtual'nykh ispytaniy v mini-TEM-kamere* [Estimation of radiated emissions from a PCB with modal reservation by virtual testing in a mini-TEM cell]. Certificate of state registration of computer program RF, no 2022683074, 2022 (in Russ.).

40. Zhechev E.S., Vlasov S.V., Zabolotskii A.M. *Analiz chetyrekhsloinoi zerkal'no-simmetrichnoi poloskovoi struktury s trekhkratnym modal'nykh rezervirovaniem* [Analysis of a four-layer mirror-symmetric strip structure with triple modal reservation]. Certificate of state registration of computer program RF, no 2021680554, 2021 (in Russ.).

41. Samoilenko M.A., Gazizov T.R. *Sposob trassirovki dvukhstoronnei pechatnoi platy s modal'nykh rezervirovaniem i umen'shenykh kolichestvom provodnikov* [Method for routing a double-sided pcb with modal reservation and a reduced number of conductors]. Patent RF, no. 2784710, 2022 (in Russ.).

42. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. *Sposob simmetrichnoi trassirovki signal'nykh i opornykh provodnikov tsepei s modal'nykh rezervirovaniem* [Method of symmetric routing of signal and reference conductors of circuits with modal reservation]. Patent RF, no. 2794739, 2023 (in Russ.).

43. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Zabolotskij A.M., Kuksenko S.P., Buichkov E.N. *Sposob trassirovki pechatnykh provodnikov tsepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors of circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603850, 2016 (in Russ.).

44. Gazizov T.R., Ivantsov I.A. *Sposob udalennoi trassirovki pechatnykh provodnikov tsepei s odнократnym modal'nykh rezervirovaniem* [Method for remote tracing of printed circuit conductors with single modal redundancy]. Patent RF, no. 2801688, 2023 (in Russ.).

45. Gazizov T.R., Ivantsov I.A. *Sposob udalennoi komponovki pechatnykh provodnikov tsepei s trekhkratnym modal'nykh rezervirovaniem* [Method for remote layout of printed conductors of circuits with three-time modal reservation]. Patent RF, no. 2801830, 2023 (in Russ.).

46. Zhechev E.S., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotskii A.M., Chernikova E.B. *Sposob komponovki pechatnykh provodnikov dlya tsepei s modal'nykh rezervirovaniem* [Method for arranging printed conductors for circuits with modal redundancy]. Patent RF, no. 2751672, 2021 (in Russ.).

Yelizaveta Zima

Student, Engineer of the Television and Control Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-884-63-10
Email: zima_liza_1503@mail.ru

Rustam R. Gazizov

Junior Researcher, Department of the Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-7717-4215
Phone: +7-952-802-23-10
Email: rustam.r.gazizov@tusur.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 537.877

Н.Н. Кривин, Д.Е. Понамарев, М.А. Шипуля

Численное моделирование эффекта резонансного поглощения электромагнитных волн в среде со спиральной симметрией

Представлено сравнение экспериментальных данных по прохождению электромагнитных волн через среду, обладающую спиральной симметрией, с результатами, полученными при помощи расчётов на основе модели рассматриваемой среды в виде массива спиральных антенн. Показано, что данная модель позволяет адекватно описывать рассматриваемый процесс в рамках соответствующих приближений.

Ключевые слова: спиральная симметрия, массив антенн, численное моделирование.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-73-78

Недавние исследования [1–4] в области применения в радиолокации электромагнитных волн (ЭМВ), обладающих ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ), значительно повышают интерес к вопросу описания распространения таких волн в различных средах, способам их генерации и детектирования, возможностям применения их в различных технических приложениях.

На данный момент существует достаточно большое количество различных научных работ по вопросам, связанным как с аналитическим описанием свойств электромагнитных волн такого типа [5–10], так и с описанием их разнообразных технических приложений [11–32].

Большинство из указанных выше работ рассматривают ЭМВ в диапазоне длин волн микрометрового порядка, экспериментальное исследование которых требует достаточно точной аппаратуры и строгого соблюдения условий проводимых экспериментов. Понижение значения частоты ЭМВ позволяет увеличить рамки абсолютных погрешностей для используемого оборудования, сохранив при этом относительную ошибку на достаточно низком уровне. Это, в свою очередь, делает возможность проведения экспериментов более доступной. В частности, в диапазоне частот 1–10 ГГц допуски в рамках 14-го качества, очевидно, составляют 0,001–0,01 длины волны указанного диапазона, что позволяет надеяться на отсутствие значительных систематических ошибок эксперимента, связанных с качеством используемых в нем материалов и оборудования. Кроме того, в силу естественных причин, обусловленных нестабильностью атмосферной среды на трассе распространения рассматриваемых ЭМВ, понижение частоты таких волн дает возможность использования их на значительно больших расстояниях по сравнению с микрометровым диапазоном.

Таким образом, исследования распространения ЭМВ приведённого ранее диапазона в средах с неоднородностями в рамках погрешностей, указанных выше, позволяют оценить наличие либо отсутствие тех или иных физических эффектов, связанных как со свойствами самих ЭМВ с ненулевым ОУМ, так и со свойствами среды, в которой они распространяются.

Простейший способ создать среду, обеспечивающую наличие ненулевого ОУМ для распространяющихся в ней ЭМВ, – обеспечить в данной среде наличие спиральной симметрии. Среда, обладающая такой симметрией, очевидно, изменяет фазу распространяющихся в ней плоских ЭМВ таким образом, что при аналитическом описании электрического и магнитного полей, соответствующих прошедшим сквозь нее волнам, становится возможным выделение в явном виде фазового множителя, соответствующего ненулевому значению ОУМ [5–10]. Таким образом, становится возможным ассоциировать ЭМВ, распространяющиеся в среде со спиральной симметрией, с ЭМВ, обладающими ненулевым ОУМ.

Одной из базовых характеристик любой среды распространения ЭМВ является ω_p – её резонансная частота поглощения. С точки зрения исследований свойств матрицы рассеяния рассматриваемой среды данная частота соответствует наименьшему значению коэффициента пропускания (КП) – $s_{21}(\omega)$ в рассматриваемом диапазоне. Таким образом, измерив в эксперименте частотную зависимость КП радиотрассы, содержащей по ходу распространения ЭМВ среду со спиральной симметрией, возможно определить его экстремальное значение в соответствующем частотном диапазоне. Соответственно, частоту ω_p , при которой достигается данный экстремум, возможно ассоциировать с указанной выше характеристикой исследуемой среды – резонансной частотой поглощения.

Таким образом, целью данной работы является экспериментальное и аналитическое исследование частотных, в частности резонансных, свойств среды со спиральной симметрией, представляющей собой экспериментальную трассу распространения ЭМВ, а именно сравнительный анализ результатов измерений её КП с результатами компьютерного моделирования данной экспериментальной трассы.

Экспериментальные исследования коэффициента прохождения

Экспериментальные исследования проводились при помощи скалярного анализатора цепей P2M-04A и программного обеспечения «Graphit P2M» [33], позволяющих определять все элементы матрицы рас-

сеяния для соответствующей радиотрассы в диапазоне частот 2–4 ГГц. В частности, в рамках данной работы исследовалась частотная зависимость КП экспериментальной трассы распространения ЭМВ, состоящей из двух рупорных антенн: приемной (ПРМА) и передающей (ПРДА). ПРМА и ПРДА находятся на расстоянии $l \sim 1$ м (порядка 10 длин волн λ) в атмосферной среде с помещенным в середине трассы исследуемым образцом. Исследуемый образец обеспечивает наличие спиральной симметрии в среде (рис. 1) и состоит из диэлектрической подложки, прозрачной для ЭМВ в указанном частотном диапазоне, на которой симметрично относительно центра располагаются 9 спиралей из проводящего материала. Все проводящие спирали имеют одинаковую ориентацию и выполнены из медной проволоки диаметром 0,5 мм.

Размеры подложки составляют 200×200 мм. Диаметр каждой из проводящих спиралей составляет $D = 35 \pm 3$ мм, их высота – $h = 160 \pm 2$ мм, а шаг между витками $s = 20 \pm 2$ мм. Расстояние между центрами спиральных элементов массива варьировалось в ходе проведения эксперимента в рамках значений $d = 5–80$ мм с шагом 10 мм. Таким образом, исследуемый образец фактически представляет собой массив спиральных антенн, расстояние между которыми возможно дискретно изменять в ходе проведения экспериментов.

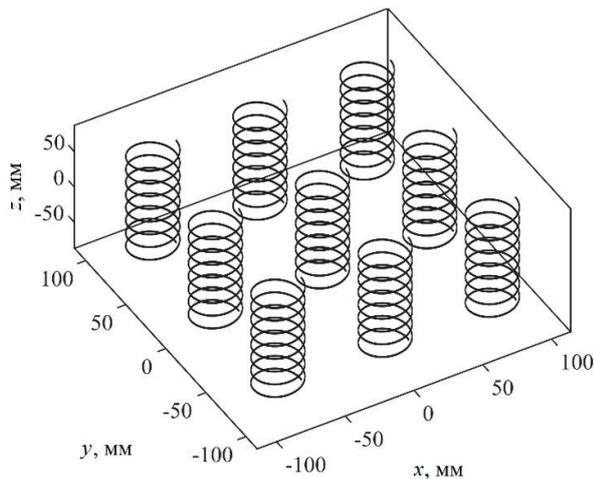


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемого образца, обеспечивающего наличие спиральной симметрии в среде распространения ЭМВ

Измерения коэффициента пропускания среды проводились в диапазоне 3–4 ГГц для различных значений среднего расстояния между элементами массива. Разрешение скалярного анализатора в данном диапазоне было выбрано равным 500 точкам. Типичный вид зависимости КП от частоты представлен на рис. 2. Следует отметить, что измерение точного значения резонансной частоты для всех соответствующих расстояний между спиральными элементами массива в рамках указанных значений для проведенного эксперимента представляется достаточно проблематичным ввиду следующего обстоятельства: в целях исключения влияния факторов, связанных с возможными потерями за счет применения дополни-

тельных элементов конструкций, проводящие спирали выполнены по бескаркасному принципу, в связи с чем изменение среднего расстояния между элементами массива неизбежно связано с некоторой деформацией его элементов. Таким образом, убедившись в наличии резких резонансных пиков КП при изменении среднего расстояния между элементами массива, возможно ограничиться только одним определенным значением данного параметра и провести статистический набор данных в целях исключения систематической ошибки эксперимента.

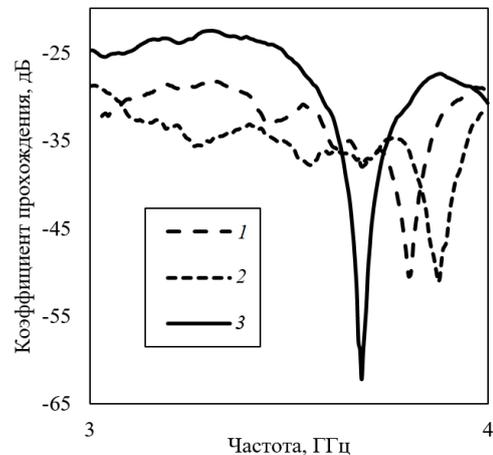


Рис. 2. Частотная зависимость КП экспериментальной трассы при различных значениях расстояния между центрами спиральных элементов массива: 1 – 0,05 м, 2 – 0,06 м, 3 – 0,07 м

На рис. 3 представлена частотная зависимость КП трассы для случая $d = 80$ мм. Усреднение значений КП проводилось по серии из 8 экспериментов. При построении данных зависимостей КП из экспериментальных данных исключен соответствующий фон, измеренный в отсутствие исследуемого образца на трассе.

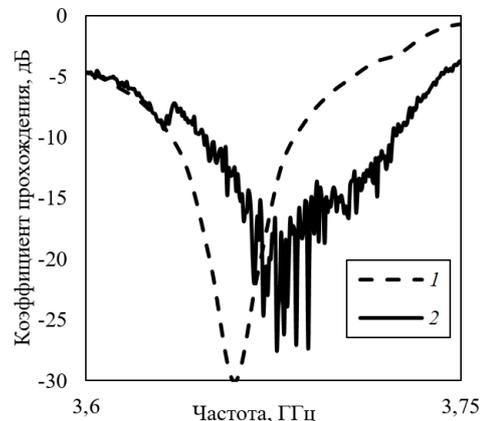


Рис. 3. Зависимость КП при значении расстояния между центрами спиральных элементов массива $d = 0,08$ м: 1 – усредненное значение; 2 – типичная экспериментальная кривая

Численная модель эксперимента и результаты моделирования

Численная модель эксперимента позволяет качественно оценить достоверность полученных экспериментальных данных. Для построения модели исполь-

зовались стандартные, хорошо известные методы среды разработки MATLAB [34–36]. В частности, для массива спиральных антенн, обладающего параметрами, указанными выше, была проведена серия из 256 численных экспериментов, в рамках которой случайным образом менялись параметры исследуемого массива. Допуски на изменение расстояний между центрами элементов массива, изменение диаметра проводящих спиралей, а также допуск на межвитковое расстояние данных спиралей составлял ± 2 мм. Все проведенные численные эксперименты были построены по одинаковой схеме: для каждого из значений частоты в исследуемом диапазоне вначале вычисляется импеданс элементов указанного массива, а затем – значения элементов матрицы рассеяния при вычисленном значении импеданса. При этом экспериментально зафиксированная частотная зависимость КП, очевидно, соответствует среднему значению элементов матрицы рассеяния описанного выше численного эксперимента.

На рис. 4 приведено среднее значение вещественной $\text{Re}[Z(\omega)]$ и мнимой $\text{Im}[Z(\omega)]$ частей импеданса, вычисленных в ходе проведения численных экспериментов. Хорошо заметно наличие изгиба данных кривых вблизи резонансной частоты поглощения исследуемого массива.

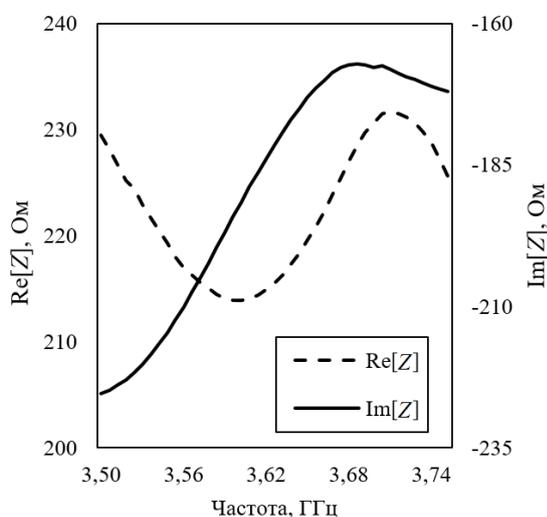


Рис. 4. Зависимость вещественной $\text{Re}[Z]$ и мнимой $\text{Im}[Z]$ частей импеданса по серии из 256 численных экспериментов

Следует отметить, что поскольку численная модель не учитывает многих факторов реального эксперимента (например, характеристики ПРМА и ПРДА), полученные абсолютные значения данных величин носят лишь оценочный характер. В связи с этим сравнивать КП, полученный в результате численного моделирования, с тем, который получен в ходе проведения реального эксперимента, корректно только с точки зрения относительных величин.

Типичная зависимость среднего значения коэффициента пропускания, рассчитанная на основе вычисленных в ходе эксперимента значений матрицы рассеяния, представлена на рис. 5. Хорошо видно, что

численная модель достаточно точно описывает имеющуюся экспериментальную зависимость. Заметное расхождение в полуширине резонансных кривых числовой модели и экспериментальных данных вызвано, в первую очередь, наличием гораздо большего количества вариантов расположения элементов массива спиральных элементов, предусмотренное большим количеством проведенных числовых экспериментов. Влиянием этого же фактора возможно объяснить небольшое (порядка 3 МГц) расхождение в значениях резонансных частот рассматриваемых кривых.

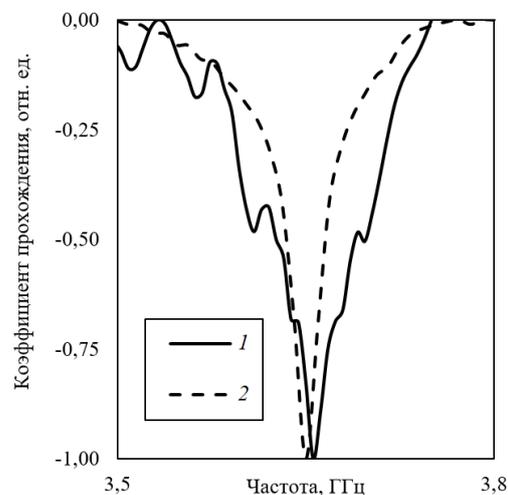


Рис. 5. Сравнение частотных зависимостей КП, полученных в ходе численного моделирования – 1 и в результате проведения эксперимента – 2

Таким образом, возможно утверждать, что рассматриваемая в работе простейшая численная модель эксперимента при условии набора необходимого объема статистических данных позволяет достаточно точно описывать поведение реальной физической системы.

Возможная доработка численной модели посредством включения в рассмотрение свойств рупорных антенн (ПРМА и ПРДА), свойств среды распространения (зависимость коэффициента преломления атмосферы от физических характеристик) и свойств измерительной аппаратуры, очевидно, позволит более точно рассчитывать результаты проводимых экспериментов. Это, в свою очередь, позволяет считать рассмотренную модель достаточно полезной с точки зрения сокращения временных и ресурсных затрат на проведение реальных экспериментов по изучению коэффициента прохождения различных радиотрасс.

Заключение

Таким образом, в данной работе представлены экспериментальные данные частотной зависимости коэффициента прохождения среды, обладающей спиральной симметрией, а также результаты, полученные при помощи численного моделирования процесса распространения ЭМВ в той же среде, представляющей собой массив спиральных антенн. В результате сравнительного анализа этих данных показано, что рассматриваемая численная модель адекватно описывает данные эксперимента.

Впоследствии полученные результаты будут использоваться для натурной и компьютерной имитации сред со спиральной симметрией, для исследования зависимости резонансных свойств данных сред от их геометрических параметров. В аспекте технической применимости полученные результаты позволят в дальнейшем разработать способы генерации радиоволн СВЧ-диапазона с ненулевым ОУМ для проведения дальнейших исследований особенностей их распространения в средах гидрометеоров и закономерностей отражения от радиолокационных объектов разного типа.

Литература

1. Integrated terahertz vortex beam emitter for rotating target detection / J. Xie, J. Qian, T. Wang, L. Zhou, X. Zang, L. Chen, Y. Zhu, S. Zhuang // *Advanced Photonics*. – 2023. – No. 6. – P. 066002.
2. Joint OAM Radar-Communication Systems: Target Recognition and Beam Optimization / W.-X. Long, R. Chen, M. Moretti, W. Zhang, J. Li // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2023. – Vol. 22, No. 7. – P. 4327–4341.
3. Super-resolution Orbital Angular Momentum based Radar Targets Detection / M. Lin, Y. Gao, P. Liu, J. Liu // *Electronics Letters*. – 2016. – Vol. 52, No. 13. – P. 1168–1170.
4. Target scattering characteristics for OAM based radar / K. Liu, Y. Gao, X. Li, Y. Cheng // *AIP Advances*. – 2018. – Vol. 8, No. 2. – P. 025002.
5. 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.
6. Bogdanov O.V. The Probability of Radiation of Twisted Photons in Dispersing Media / O.V. Bogdanov, P.O. Kazinski, G.Yu. Lazarenko // *Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-19): book of abstracts XIII International Symposium, September 15–20, 2019, Belgorod, Russian Federation*. – Tomsk: TPU Publishing House, 2019. – 51 p.
7. Bogdanov O.V. Probability of radiation of twisted photons in an inhomogeneous isotropic dispersive medium / O.V. Bogdanov, P.O. Kazinski, G.Yu. Lazarenko // *Physical Review A*. – 2019. – Vol. 100, No. 4. – P. 043836-1–043836-21.
8. Kazinski P.O. Scattering of plane-wave and twisted photons by helical media / P.O. Kazinski, P.S. Korolev // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. – 2022. – Vol. 55, No. 39. – P. 395301.
9. Barnett S.M. Optical orbital angular momentum / S.M. Barnett, M. Babiker, M.J. Padgett // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2017. – Vol. 375. – P. 2087.
10. Orbital Angular Momentum Waves: Generation, Detection and Emerging Applications / R. Chen, H. Zhou, M. Moretti, X. Wang, J. Li // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2020. – Vol. 22, No. 2. – P. 840–868.
11. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test / F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thide, A. Bianchini, F. Romanato // *New Journal of Physics*. – 2012. – Vol. 14. – P. 033001.
12. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing / Y. Yan, G. Xie, M.P.J. Lavery, H. Huang, N. Ahmed, C. Bao, Y. Ren, Y. Cao, L. Li, Z. Zhao, A.F. Molisch, M. Tur, M.J. Padgett, A.E. Willner // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – P. 4876.
13. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain / B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, K. Palmer, J. Bergman, T.D. Carozzi, Ya.N. Istomin, H.N. Ibragimov, R. Khamitova // *Physical Review Letters*. – 2007. – Vol. 99, No. 8. – P. 087701.
14. Stability tests in time of OAM multiplexing schemes in highly disturbed environments / F. Tamburini, B. Thidé, P. Weibel, V. Voaga, F. Carraro, M. Pup. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/350992393_Stability_tests_in_time_of_OAM_multiplexing_schemes_in_highly_disturbed_environments, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
15. Highly-twisted states of light from a high quality factor photonic crystal ring / X. Lu, M. Wang, F. Zhou, M. Heuck, W. Zhu, V.A. Aksyuk, D.R. Englund, K. Srinivasan // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14, No. 1. – P. 1119.
16. He C. Towards higher-dimensional structured light / C. He, Y. Shen, A. Forbes // *Light: science & applications*. – 2022. – Vol. 11. – P. 205.
17. OAM multiple transmission using uniform circular arrays: numerical modelling and experimental verification with two digital television signal / R. Gaffoglio, A. Cagliero, A.De. Vita, B. Sacco // *Radio Science*. – 2016. – Vol. 51, No. 6. – P. 645–658.
18. Robust quantum sensors with twisted-light fields induced optical transitions / T. Zanon-Willette, F. Impens, E. Arimondo, D. Wilkowski, A. Taichenachev, V. Yudin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/371989112_Robust_quantum_sensors_with_twisted-light_fields_induced_optical_transitions, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
19. L00L and p00p entanglement / D. Danese, S. Wollmann, S. Leedumrongwatthanakun, W. McCutcheon, M. Erhard, W. Plick, M. Malik [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/371855308_L00L_and_p00p_entanglement, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
20. 1.58 Tbps OAM Multiplexing Wireless Transmission with Wideband Butler Matrix for Sub-THz Band / H. Sasaki, Y. Yagi, R. Kudo, D. Lee // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2024. – Vol. 42, No. 6. – P. 1613–1625.
21. Jiang Z.H. Electromagnetic Vortices: Wave Phenomena and Engineering Applications / Z.H. Jiang, D.H. Werner. – Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2022. – 499 p.
22. Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive optics / Y. Horst, B.I. Bitachon, L. Kulmer, J. Brun, T. Blatter, J.-M. Conan, A. Montmerle-Bonnefois, J. Montri, B. Sorrente, C.B. Lim, N. Védrenne, D. Matter, L. Pommarel, B. Baeuerle, J. Leuthold // *Light: Science & Applications*. – 2023. – Vol. 12, No. 1. – P. 153.
23. Generation of rotational orbital angular momentum beams in the radio frequency based on an optical-controlled circular antenna array / X. Song, Z. Su, J. Ma, Y. Yao, Y. Bai, Z. Zheng, X. Gao, S. Huang // *Optics Express*. – 2021. – Vol. 29, No. 15. – P. 23717–23728.
24. Generation of coupled radio frequency orbital angular momentum beam with an optical-controlled circular antenna array / M. Zhao, X. Gao, M. Xie, J. Qian, C. Song, S. Huang // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 426. – P. 126–129.
25. Generation of terahertz vortex pulses without any need of manipulation in the terahertz region / Q. Lin, S. Zheng, Q. Song, X. Zeng, Y. Cai, Y. Li, Z. Chen, L. Zha, X. Pan, S. Xu // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44. – P. 887–890.
26. Orbital Angular Momentum in Radio – A System Study / S.M. Mohammadi, L.K.S. Daldorff, J.E.S. Bergman, R.L. Karlsson, B. Thide, K. Forozesh, T.D. Carozzi, B. Isham // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2010. – Vol. 58, No. 2. – P. 565–572.
27. Measurement of the rotational Doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam / M. Zhao, X. Gao, M. Xie, W. Zhai, W. Xu, S. Huang, W. Gu // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, No. 11. – P. 2549–2552.

28. Multiplexed Cassegrain Reflector antenna for simultaneous generation of three orbital angular momentum (OAM) modes / W.J. Byun, K.S. Kim, B.S. Kim, Y.S. Lee, M.S. Song, H.D. Choi, Y.H. Cho // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 27339.

29. Generation of plane spiral orbital angular momentum waves by microstrip yagi antenna array / X.Y. Liu, Y. Zhu, W. Xie, G.H. Peng, W. Wang // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 175688–175696.

30. Yagi Y. Prototyping of 40 GHz Band Orbital Angular Momentum Multiplexing System and Evaluation of Field Wireless Transmission Experiments / Y. Yagi, H. Sasaki, D. Lee // NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation, Kanagawa 239-0847. – Japan, 2022. – Vol. 10. – P. 130040–130047.

31. Leyser T.B. Radio Pumping of Ionospheric Plasma with Orbital Angular Momentum // *Physical Review Letters*. – 2009. – Vol. 102. – P. 065004.

32. 1-Pbps orbital angular momentum fibre-optic transmission / J. Liu, Z. Li, Z. Lin, J. Zhang, C. Huang, S. Mo, L. Shen, S. Lin, Y. Chen, R. Gao, L. Zhang, X. Lan, X. Cai, S. Yu // *Light: Science & Applications*. – 2022. – Vol. 11. – P. 202.

33. Scalar network analyzer R2M series – Micran. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://micran.com/productions/test-measurement/test-measurement-equipment/scalar-network-analyzers/scalar-network-analyzers-r2m-series/>, свободный (дата обращения: 14.07.2024).

34. Antenna Toolbox Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mathworks.com/help/antenna/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, свободный (дата обращения: 14.07.2024).

35. Create regular or AI-based helical dipole antenna - MatLab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/dipolehelix.html>, свободный (дата обращения: 14.07.2024).

36. Create rectangular antenna array – MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/rectangulararray.html>, свободный (дата обращения: 14.07.2024).

Kravin N.N., Ponomarev D.E., Shipulia M.A.

Numerical simulation of the electromagnetic waves resonant absorption effect in a medium with spiral symmetry

A comparison of experimental data on the passage of electromagnetic waves through a medium with spiral symmetry with the results obtained using a model of the medium in the form of a lattice of spiral antennas is presented. It is shown that this model allows us to adequately describe the process under consideration within the framework of appropriate approximations.

Keywords: spiral symmetry, array of antennas, numerical simulation.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-73-78

References

1. Xie J., Qian J., Wang T., Zhou L., Zang X., Chen L., Zhu Y., Zhuang S. Integrated terahertz vortex beam emitter for rotating target detection. *Advanced Photonics*, 2023, no 6, 066002 p.

2. Long W.-X., Chen R., Moretti M., Zhang W., Li J. Joint OAM Radar-Communication Systems: Target Recognition and Beam Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, vol. 22, no. 7, pp. 4327–4341.

3. Lin M., Gao Y., Liu P., Liu J. Super-resolution Orbital Angular Momentum based Radar Targets Detection. *Electronics Letters*, 2016, vol. 52, no. 13, pp. 1168–1170.

4. Liu K., Gao Y., Li X., Cheng Y. Target scattering characteristics for OAM based radar. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, no. 2, 025002 p.

5. 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.

6. Bogdanov O.V., Kazinski P.O., Lazarenko G.Yu. The Probability of Radiation of Twisted Photons in Dispersing Media. *Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-19)*: book of abstracts XIII International Symposium, September 15–20, 2019, Belgorod, Russian Federation. Tomsk: TPU Publishing House, 2019, 51 p.

7. Bogdanov O.V., Kazinski P.O., Lazarenko G.Yu. Probability of radiation of twisted photons in an inhomogeneous isotropic dispersive medium. *Physical Review A*, 2019, vol. 100, no. 4, pp. 043836-1–043836-21.

8. Kazinski P.O., Korolev P.S. Scattering of plane-wave and twisted photons by helical media. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2022, vol. 55, no. 39, 395301 p.

9. Barnett S.M., Babiker M., Padgett M.J. Optical orbital angular momentum. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2017, vol. 375, 2087 p.

10. Chen R., Zhou H., Moretti M., Wang X., Li J. Orbital Angular Momentum Waves: Generation, Detection and Emerging Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 840–868.

11. Tamburini F., Mari E., Sponselli A., Thide B., Bianchini A., Romanato F. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test. *New Journal of Physics*, 2012, vol. 14, 033001 p.

12. Yan Y., Xie G., Lavery M.P.J., Huang H., Ahmed N., Bao C., Ren Y., Cao Y., Li L., Zhao Z., Molisch A.F., Tur M., Padgett M.J., Willner A.E. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing. *Nature Communications*, 2014, vol. 5, 4876 p.

13. Thide B., Then H., Sjöholm J., Palmer K., Bergman J., Carozzi T.D., Istomin Ya.N., Ibragimov H.N., Khamitova R. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain. *Physical Review Letters*, 2007, vol. 99, no. 8, 087701 p.

14. Tamburini F., Thide B., Weibel P., Boaga V., Carraro F., Pup M. Stability tests in time of OAM multiplexing schemes

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.kravin@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) 51-23-27

Эл. почта: sma@main.tusur.ru

in highly disturbed environments. Available at: https://www.researchgate.net/publication/350992393_Stability_tests_in_time_of_OAM_multiplexing_schemes_in_highly_disturbed_environments, free. (Accessed: July 14, 2024).

15. Lu X., Wang M., Zhou F., Heuck M., Zhu W., Aksyuk V.A., Englund D.R., Srinivasan K. Highly-twisted states of light from a high quality factor photonic crystal ring. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, no. 1, 1119 p.

16. He C., Shen Y., Forbes A. Towards higher-dimensional structured light. *Light: Science & Applications*, 2022, vol. 11, no. 1, 205 p.

17. Gaffoglio R., Cagliero A., De Vita A., Sacco B. OAM multiple transmission using uniform circular arrays: numerical modelling and experimental verification with two digital television signal. *Radio Science*, 2016, vol. 51, no. 6, pp. 645–658.

18. Zanon-Willette T., Impens F., Arimondo E., Wilkowski D., Taichenachev A., Yudin V. Robust quantum sensors with twisted-light fields induced optical transitions. Available at: https://www.researchgate.net/publication/371989112_Robust_quantum_sensors_with_twisted-light_fields_induced_optical_transitions, free (Accessed: July 14, 2024).

19. Danese D., Wollmann S., Leedumrongwatthanakun S., McCutcheon W., Erhard M., Plick W., Malik M. L00L and p00p entanglement. Available at: https://www.researchgate.net/publication/371855308_L00L_and_p00p_entanglement, free (Accessed: July 14, 2024).

20. Sasaki H., Yagi Y., Kudo R., Lee D. 1.58 Tbps OAM Multiplexing Wireless Transmission with Wideband Butler Matrix for Sub-THz Band. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, vol. 42, no. 6, pp. 1613–1625.

21. Jiang Z.H., Werner D.H. *Electromagnetic Vortices: Wave Phenomena and Engineering Applications*, Hoboken, New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2022, 499 p.

22. Horst Y., Bitachon B.I., Kulmer L., Brun J., Blatter T., Conan J.-M., Montmerle-Bonnefois A., Montri J., Sorrente B., Lim C.B., Védrenne N., Matter D., Pommarel L., Baeuerle B., Leuthold J. Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive. *Light: Science & Applications*, 2023, vol. 12, no. 1, 153 p.

23. Song X., Su Z., Ma J., Yao Y., Bai Y., Zheng Z., Gao X., Huang S. Generation of rotational orbital angular momentum beams in the radio frequency based on an optical-controlled circular antenna array. *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 15, pp. 23717–23728.

24. M. Zhao, X. Gao, M. Xie, J. Qian, C. Song, S. Huang. Generation of coupled radio frequency orbital angular momentum beam with an optical-controlled circular antenna array. *Optics Communications*, 2018, vol. 426, pp. 126–129.

25. Lin Q., Zheng S., Song Q., Zeng X., Cai Y., Li Y., Chen Z., Zha L., Pan X., Xu S. Generation of terahertz vortex pulses without any need of manipulation in the terahertz region. *Optics Letters*, 2019, vol. 44, pp. 887–890.

26. Mohammadi S.M., Daldorff L.K.S., Bergman J.E.S., Karlsson R.L., Thide B., Forozesh K., Carozzi T.D., Isham B. Orbital Angular Momentum in Radio – A System Study. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 2, pp. 565–572.

27. Zhao M., Gao X., Xie M., Zhai W., Xu W., Huang S., Gu W. Measurement of the rotational Doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 11, pp. 2549–2552.

28. Byun W.J., Kim K.S., Kim B.S., Lee Y.S., Song M.S., Choi H.D., Cho Y.H. Multiplexed Cassegrain Reflector antenna

for simultaneous generation of three orbital angular momentum (OAM) modes. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 1, 27339 p.

29. Liu X.Y., Zhu Y., Xie W., Peng G.H., Wang W. Generation of plane spiral orbital angular momentum waves by microstrip yagi antenna array. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 175688–175696.

30. Yagi Y., Sasaki H., Lee D. Prototyping of 40 GHz Band Orbital Angular Momentum Multiplexing System and Evaluation of Field Wireless Transmission Experiments. *NTT Network Innovation Laboratories*, NTT Corporation, Kanagawa 239-0847, Japan, 2022, vol. 10, pp. 130040–130047.

31. Leyser T.B. Radio Pumping of Ionospheric Plasma with Orbital Angular Momentum. *Physical Review Letters*, 2009, vol. 102, 065004 p.

32. Liu J., Li Z., Lin Z., Zhang J., Huang C., Mo S., Shen L., Lin S., Chen Y., Gao R., Zhang L., Lan X., Cai X., Yu S. 1-Pbps orbital angular momentum fibre-optic transmission. *Light: Science & Applications*, 2022, vol. 11, 202 p.

33. 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).

34. Antenna Toolbox Documentation. Available at: https://www.mathworks.com/help/antenna/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, free (Accessed: July 14, 2024).

35. Create regular or AI-based helical dipole antenna – MATLAB. Available at: https://www.mathworks.com/help/antenna/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, free (Accessed: July 14, 2024).

36. Create rectangular antenna array. Available at: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/rectangulararray.html>, free (Accessed: July 14, 2024).

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, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (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) 51-23-27
Email: sma@main.tusur.ru

УДК 004.94:004.021

М.И. Кочергин

Компенсация амплитудно-временной погрешности в дискретно-непрерывных компонентных моделях на основе задачи обратной интерполяции

Рассматриваются подходы к решению задачи корректного обнаружения событий в гибридных (дискретно-непрерывных системах) и снижения возникающей накапливающейся погрешности по величине целевой (отслеживаемой) переменной и по времени. Предлагается численный алгоритм компенсации такой амплитудно-временной погрешности, основанный на решении обратной задачи интерполяции. Сравняется результативность предлагаемого метода и метода, заложенного в гибридные автоматы. Оцениваются возможности предлагаемого метода для согласования вектора состояния компонентных моделей подсистем моделируемого объекта, которые представлены на различных слоях объектного уровня многоуровневой компьютерной модели, при проведении вычислительного эксперимента на модели.

Ключевые слова: моделирование, амплитудно-временная погрешность, метод компонентных цепей, гибридные системы, конечный автомат, диаграмма состояний.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-79-84

При исследовании сложных динамических систем исследователи [1, 2] выделяют класс гибридных (дискретно-непрерывных) систем – абстракций для описания реальных систем в виде моделей, характеризующихся сменой своего непрерывного поведения при наступлении определенных событий. Такие модели имеют дискретную составляющую, выраженную во множестве допустимых состояний и условиях перехода, которую удобно моделировать конечными автоматами, гибридными автоматами [3] или диаграммами состояний [4], и непрерывную, моделируемую, как правило, системами дифференциальных уравнений. Такие системы также могут называться дискретно-событийными.

При моделировании таких систем возникает задача корректного обнаружения событий гибридных систем, решаемая как зарубежными [5–8], так и отечественными [9, 10] исследователями. Предлагаемые исследователями решения могут быть сгруппированы в 3 категории:

1) варьирующие (замедляющие) шаг моделирования (интегрирования) при приближении к границе смены режима гибридной системы;

2) решающие итерационными методами нелинейные уравнения вида $f(t) = 0$, описывающего кривую поведения в пространстве состояния, для определения момента времени t пересечения границы смены режима гибридной системы. Такое решение делится на 2 фазы [11, 12]: обнаружение перехода с пробным расчётом новой итерации и локализация точки смены режима с применением численного метода;

3) методы, основанные на аппроксимации функции поведения системы и её исследовании, в том числе с применением прогнозных методов.

Недостатком методов первой группы является негативное влияние на быстродействие анализа (расчёта) компьютерной модели, а большинства методов второй группы – риски пропуска точек пере-

ключения на немонотонных функциях поведения (хотя существуют алгоритмы [2], позволяющие обнаруживать многократные переходы ценой больших вычислительных затрат). Численные характеристики сравнения различных вычислительных методов приведены в [13].

В данной работе предлагается алгоритм обнаружения точки перехода и компенсации возникающей амплитудно-временной погрешности на основе решения обратной задачи интерполяции.

Природа амплитудно-временной погрешности

Применение диаграмм состояний или конечных автоматов для описания поведения систем сопряжено с выполнением на каждой итерации проверки значения целевой переменной, выход которой за пределы диапазона, заданного в сторожевом условии перехода, инициирует смену режима. Допустим, что система должна перейти в новое состояние при выходе системы $y = 0$ (в виду дискретизации модели условие корректно формулировать как $y \leq 0$). Тогда срабатывание условия перехода произойдёт при $y = -\Delta y$ (в случае изначального уменьшения значения y), где Δy – некоторое малое число (погрешность) – амплитудная составляющая погрешности. При этом (рис. 1) из-за смещения y ниже оси ОХ переход в новое состояние произойдёт позже на Δt – временная составляющая погрешности.

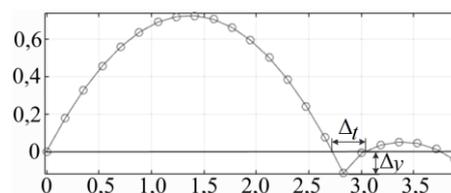


Рис. 1. Иллюстрация амплитудной и временной составляющей погрешности при моделировании отскока тела от поверхности

Источник погрешности – особенности машинных вычислений, осуществляемых с дискретным

шагом. Несмотря на то, что величина погрешности является незначительной, она носит аккумулятивный характер с течением времени при достаточно большом количестве переходов из одного состояния в другое. При построении модели штангового глубинного насоса [14] допустимо применение диаграмм состояний [4] для задания смены направления движения штока при возвратно-поступательном

движении. При этом можно наблюдать эффект смещения зависимости характеристик с течением времени. На рис. 2 приведено смещение зависимости скорости штока штангового глубинного насоса от времени с течением времени. Штрихпунктирной линией показана зависимость, полученная при анализе модели с шагом интегрирования 0,001 с, сплошной – 0,01 с.

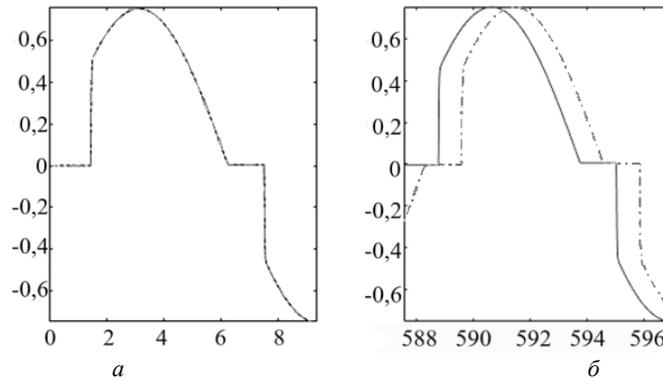


Рис. 2. Смещение графика зависимости скорости штока штангового глубинного насоса от времени: a – на интервале $t = [0, 10]$ с; b – на интервале $t = [588, 598]$ с

Уменьшить рассматриваемую погрешность можно за счёт уменьшения шага моделирования (интегрирования). Но полностью избавиться от такой погрешности при стандартном подходе не получится – со временем она продолжит накапливаться в модели, что может сильно повлиять на корректность результатов моделирования, особенно моделей, предназначенных для длительного расчёта, например моделей цифровых двойников [15].

Постановка задачи

Сформулируем постановку задачи для решения предлагаемый алгоритмом. Имеется динамическая система с гибридным поведением, которая в один момент времени находится в одном из дискретных состояний S_i , $S = \{S_0, S_1, \dots, S_n\}$, где каждому S_i установлено соответствие $R = S \rightarrow C, R \subseteq S \times C$ компонентной схеме (цепи) C_j из общего множества компонентных схем модели $C = \{C_0, C_1, \dots, C_m\}$, описывающей в данном дискретном состоянии непрерывное поведение системы (1), где $f_i(y, t)$ – вектор-функция правых частей дифференциальных уравнений (каждая компонентная цепь является эквивалентом системы алгебро-дифференциальных уравнений первого порядка вида (1), записанных относительно переменных состояния y), t_0 – время начала очередного дискретного состояния (и завершения предыдущего), t_i – время завершения очередного дискретного состояния (и начала следующего), y_0 – вектор начальных условий для дифференциальных переменных (конечное значение y предыдущего состояния является начальным условием следующего).

$$\frac{dy}{dt} = f_i(y, t), \quad y(t_0) = y_0, \quad t \in [t_0, t_i], \quad i = 0, \dots, n. \quad (1)$$

Порядок переходов (переход считается мгновенным) между дискретными состояниями S определяется множеством дискретных переходов

$T = \{(S_0, S_1), \dots, (S_{n-1}, S_n)\}$, $T \subseteq S \times S$. Переход из S_i в S_j осуществляется по сторожевому условию, задаваемому соответствующим предикатом $G_{ij}(y_{ц})$ вида $y_{ц} \geq a$ или $y_{ц} \leq a$, отслеживающим изменение целевой переменной $y_{ц}$, где $y_{ц} \in y$, a – некоторая константа. В каждом дискретном состоянии S может быть своя целевая переменная $y_{ц}$, а вместо константы a может задаваться аналитическое выражение, подлежащее расчёту.

При интегрировании дифференциальных уравнений вида (1) ввиду дискретности шага интегрирования срабатывание предиката $G_{ij}(y_{ц})$ (а вследствие этого и переход в новое дискретное состояние) произойдет в момент времени $t = t^* + \Delta t$ при $y_{ц} = a \pm \Delta a$ (знак зависит от роста или убывания $y_{ц}$), где Δa – амплитудная составляющая погрешности, Δt – временная, t^* – реальное (искомое) время перехода.

Наличие такой погрешности в модели системы является нежелательным (а при некоторых условиях неприемлемым) по причине её аддитивности (накопления с каждой сменой дискретного состояния) и неправильного обнаружения точки переключения одной непрерывной модели поведения системы на другую. Цель работы алгоритма – определение момента времени t^* , при котором выполнялось условие $y_{ц} = a$, и пересчёт вектора решения (включающего переменные x, y исследуемой системы и переменные z внешней по отношению к исследуемой системе среды) компонентной схемы с переносом непрерывного состояния системы в пространстве состояний из (y, t) в (y^*, t^*) и внешней среды из (z, t) в (z^*, t^*) , где $z \in Z$, Z – вектор переменных состояния внешней среды. К внешней среде исследуемой системы (подсистемы) следует также относить другие подсистемы системы верхнего уровня, функционирующие совместно с исследуемой.

б) добавление дополнительного узла сетки в окрестности точки перехода системы в новое состояние и продолжение последующих расчётов в узлах старой сетки (рис. 4: выполняется только условие «Возврат к старой сетке»);

в) нахождение точки перехода системы в новое состояние и перерасчёт вектора решения в следующем узле старой сетки без изменений её узлов и добавления новых (выполняются оба условия).

Наличие трёх вариантов изменения сетки позволяет организовать согласование вектора решения компонентных моделей подсистем, представленных на разных уровнях объектного уровня (т.е. представленными изолированными компонентными моделями) в многоуровневой компьютерной модели [18], в соответствии с заданными целями. Так, смещение расчётной сетки (вариант *а*) применимо в моделях с независимыми объектными слоями, рассчитываемыми разными вычислительными ядрами, при необходимости исследования экстремальных значений целевой переменной в рамках вычислительного эксперимента и при наличии требований к равной длине массива траектории поведения подсистем (т.е., когда необходимо, чтобы в результатах моделирования каждой подсистемы было одинаковое количество записей (точек)).

Добавление дополнительного узла (вариант *б*) применимо в тех же условиях, но при отсутствии требования к длине массивов результатов моделирования. Перерасчёт по старой сетке (вариант *в*) применим в случаях, когда результаты расчёта компонентной цепи на одном слое используются в параллельном расчёте другой компонентной цепи на другом слое – т.е. тогда, когда смещение расчётной сетки для одной подсистемы может привести к погрешностям в расчёте другой, а одновременный пересчёт сетки во всех слоях модели может привести к циклическому срабатыванию условий перехода в новое состояние каких-либо подсистем и, как следствие, к повышению вычислительных затрат.

Вызываемая на рис. 4 процедура «Компенсация погрешности» рассчитывается по формуле (2) для всего вектора решений без смены счётчика итераций, процедура «Очередная итерация модели» выполняет расчёт новой итерации вектора решений компонентной модели, процедура «Передача значений диаграммой состояний» инициализирует работу

текущего компонента «Событие» или «Состояние», которая заключается в передаче определённого на схеме модели значения параметра на выход компонента с целью дальнейшей передачи сообщения для параметризации компонента объектного или логического слоя. Более подробно механизм работы диаграмм состояний метода компонентных цепей описан в работе [4].

Оценка результатов и обсуждение

В работе [19] при использовании гибридных автоматов для моделирования гибридной механической системы предлагается присвоить целевой переменной $f(t)$ в момент инициализации перехода системы в новое состояние значение 0 с целью устранения погрешности рассматриваемого типа. Однако, по нашему мнению, данная процедура не только не снизит погрешность, но, наоборот, приведёт к рассогласованию непрерывного состояния системы в целом и её подсистем и росту погрешности, так как компенсация погрешности при таком подходе осуществляется только для одной переменной, а не всего вектора решения.

Продemonстрируем это на примере сравнения с эталонной моделью моделей, построенных с шагом моделирования $dt = 10^{-3}$ с. В качестве эталона возьмём модель без компенсации погрешностей большей точности – с шагом моделирования $dt = 10^{-6}$ с.

В таблице представлено сравнение трёх моделей:

- 1) использующей предложенный в данной работе алгоритм компенсации погрешности,
- 2) использующей алгоритм гибридного автомата [19],
- 3) не использующей алгоритмы компенсации погрешности.

Сравнение будет производиться по целевой переменной $f(t)$ и её производной $df(t)/dt$, чтобы проиллюстрировать эффект взаимного усиления погрешностей – ошибка в расчёте $f(t)$ влечёт за собой возникновение ошибки и в $df(t)/dt$ при решении системы дифференциальных уравнений, что, в свою очередь, влияет и на расчёт $f(t)$ на новой итерации. Для выполнения сравнения результатов моделирования с разным шагом интегрирования из табличных зависимостей, построенных с шагом $dt = 10^{-6}$ с, были удалены промежуточные узлы, в которых отсутствовали значения переменных в отклике какой-либо из моделей (таблица).

Сравнение погрешности моделей при применении предлагаемого алгоритма, алгоритма-аналога и без применения алгоритмов компенсации погрешности

Время t оценки погрешности	Модель при $dt = 10^{-3}$ с	Среднее абсолютное отклонение от результатов моделирования при $dt = 10^{-6}$ с		Среднее относительное отклонение от результатов моделирования при $dt = 10^{-6}$ с	
		$\Delta f(t)$	$\Delta df(t)/dt$	$\delta f(t)$	$\delta df(t)/dt$
В момент первого перехода в новое состояние	Алгоритм компенсации	0,002938	0,02443	0,693%	1,384%
	Гибридный автомат	0,002940	0,02444	0,693%	1,384%
	Без компенсации	0,002942	0,02444	0,694%	1,384%
В момент второго перехода в новое состояние	Алгоритм компенсации	0,002922	0,04957	2,760%	2,8%
	Гибридный автомат	0,003634	0,06119	3,432%	3,5%
	Без компенсации	0,003282	0,05654	3,100%	3,2%

В таблице выделены полужирным наименьшие значения погрешностей и подчеркнуты первые отличающиеся в них значащие цифры.

Как видно из сопоставления таблиц, после третьего дискретного состояния общая погрешность решения без использования алгоритма компенсации выросла с $\delta f(t) = 0,69\%$ до $\delta f(t) = 3,10\%$, а с использованием – всего до $\delta f(t) = 2,76\%$. Эта разница (0,34%) и представляет собой амплитудно-временную погрешность, которую компенсирует предложенный алгоритм (после первого перехода в новое состояние разница составляла 0,001%, что свидетельствует о её росте с течением времени). Общий рост погрешности (с 0,69 до 2,76%) связан с разницей шага моделирования (интегрирования) рассматриваемой модели и эталонной.

Заключение

Предложенный в данной работе алгоритм компенсации амплитудно-временной погрешности основан на решении обратной задачи интерполяции, что обеспечивает снижение накапливаемой в конечных автоматах и диаграммах состояний погрешности без привлечения итерационных процедур, характерных для численных методов решения уравнений или методов адаптации шага моделирования. Требуемая гладкость функции состояния системы может быть обеспечена повышением степени полинома для кусочной интерполяции, что влечёт за собой снижение быстродействия алгоритма.

Параметрируемость алгоритма обеспечивает его применимость как в задачах проведения вычислительного эксперимента, требующего точных оценок экстремальных значений переменных в модели, так и в моделях сложных систем, представленных распределёнными компонентными цепями на разных слоях объектного уровня и требующих согласованности узлов расчёта вектора решения во временной области.

Литература

1. Колесов Ю.Б. Развитие метода объектно-ориентированного анализа для задач проектирования гибридных систем управления: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 2003. – 252 с.
2. Сениченков Ю.Б. Основы теории и средства моделирования гибридных систем: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 2005. – 312 с.
3. Колесов Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 224 с.
4. Kochergin M.I. Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language // Proceedings of the TUSUR University. – 2017. – Vol. 20, No. 4. – P. 122–125. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-122-125.
5. Mosterman P. An overview of hybrid simulation phenomena and their support by simulation packages // Hybrid Systems: Computation and Control: vol. 1569 of Lecture Notes in Computer Science. – Springer Verlag, 1999. – P. 165–177.
6. Park T. Stale event location in differential-algebraic models. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation / T. Park, P.I. Barton // TOMACS. – 1996. – № 6 (2). – P. 137–165.

7. Cellier F. Combined discrete continuous system simulation by use of digital computers: techniques and tools // PhD thesis, ETH Zurich. – Switzerland, 1979. – P. 144–156.

8. Gear C.W. Solving ordinary differential equations with discontinuities / C.W. Gear, O. Osterby // Technical report. – Dept. of Comput. Sci., University of Illinois, 1981. – P. 27–31.

9. Сениченков Ю.Б. Численное моделирование гибридных систем. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 206 с.

10. Шорников Ю.В. Прикладное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение компьютерного анализа гибридных систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.11. – Новосибирск, 2009. – 313 с.

11. Bruck D. Dyraola user's manual / D. Bruck, H. Elmquist, M. Otter. – Lund Switzerland, 1996. – 340 p.

12. A hierarchical hybrid system model and its simulation / J. Lui, X. Lui, T.J. Koo, B. Sinopoli, S. Sastry, E.A. Lee // Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control. – 1999. – P. 2407–2411.

13. Попов Е.А. Детекция событий разного типа в гибридных динамических системах / Е.А. Попов, Ю.В. Шорников // Научный вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2020. – № 4 (80). – С. 159–176. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-159-176.

14. Многоуровневое моделирование физико-технических задач на примере глубинного насоса / М.И. Кочергин, Д.С. Торгаева, М.П. Сухоруков, В.М. Дмитриев, Ю.А. Шурыгин // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 79–86. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-79-86.

15. Дмитриев В.М. Реализация цифрового двойника в среде моделирования MAPC / В.М. Дмитриев, Л.А. Гембух, А.Е. Сахабудинов // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. – Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 26–36. DOI: 10.14529/ctcr230403.

16. Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing / W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. – Cambridge: Cambridge University Press, 1997. – 1018 p.

17. Thompson J.F. Numerical Grid Generation, Foundations and Applications / J.F. Thompson, Z.A. Warsi, C.V. Martin. – Amsterdam: North-Holland, 1985. – 331 p.

18. Дмитриев В.М. Матрично-топологический анализ компонентных цепей / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, М.И. Кочергин // Вестник Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 62. – С. 25–35.

19. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование в среде Rand Model Designer 7: учеб.-практ. пособие / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – М.: Проспект, 2016. – 256 с.

Кочергин Максим Игоревич

Канд. техн. наук, доцент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-7404-8718
Тел.: 8 (382-2) 70-15-15, внутр.: 20-64
Эл. почта: maksim.i.kochergin@tusur.ru

Kochergin M.I.

Compensation of amplitude-time error in discrete-continuous component models based on the inverse interpolation problem

The paper discusses approaches to solve the problem of correct event detection in hybrid (discrete-continuous systems) and reducing the resulting cumulative error in the value of the target (tracked) variable and in time. A numerical algorithm for compensating for such an amplitude-time error is proposed, based on solving the inverse interpolation problem. The efficiency of the proposed method and the method embedded in hybrid automata is compared. The capabilities of the proposed method to match the state vector of component models of the subsystems of the simulated object, presented on different layers of the object level of a multi-level computer model, are assessed when conducting a computational experiment on the model.

Keywords: modeling, amplitude-time error, component circuit method, hybrid systems, finite state machine, state diagram.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-79-84

References

1. Kolesov Yu.B. *Razvitie metoda ob'ektno-orientirovannogo analiza dlya zadach proektirovaniya gibridnyh sistem upravleniya* [Development of the method of object-oriented analysis for the problems of designing hybrid control systems. Dissertation for Doctor of Science in Engineering title]. St. Petersburg, 2003, 252 p. (in Russ.).
2. Senichenkov Yu.B. *Osnovy teorii i sredstva modelirovaniya gibridnyh sistem* [Fundamentals of the theory and means of modeling hybrid systems. Dissertation for Doctor of Science in Engineering title]. St. Petersburg, 2005, 312 p. (in Russ.).
3. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy* [Modeling of systems. Dynamic and hybrid systems]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2012, 224 p. (in Russ.).
4. Kochergin M.I. Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language, *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 122–125. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-122-125.
5. Mosterman P. An overview of hybrid simulation phenomena and their support by simulation packages, *Hybrid Systems: Computation and Control*, vol. 1569 of Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, 1999, pp. 165–177.
6. Park T., Barton P.I. Stale event location in differential-algebraic models. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, TOMACS*, 1996, no. 6 (2), pp. 137–165.
7. Cellier F. *Combined discrete continuous system simulation by use of digital computers: techniques and tools*. PhD thesis, ETH Zurich, Switzerland, 1979, pp. 144–156.
8. Gear C.W., Osterby O. Solving ordinary differential equations with discontinuities, *Technical report*, Dept. of Comput. Sci., University of Illinois, 1981, pp. 27–31.
9. Senichenkov Yu.B. *CHislennoe modelirovanie gibridnyh sistem* [Numerical modeling of hybrid systems]. St. Pe-

tersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2004, 206 p. (in Russ.).

10. Shornikov Yu.V. *Prikladnoe matematicheskoe, algoritmicheskoe i programnoe obespechenie kompyuternogo analiza gibridnyh sistem* [Applied mathematical, algorithmic and software support for computer analysis of hybrid systems. Dissertation for Doctor of Science in Engineering title]. Novosibirsk, 2009. 313 p. (in Russ.).

11. Bruck D., Elmqvist H., Otter M. *Dyraola user's manual*. Switzerland, Lund, 1996, 340 p.

12. Lui J., Lui X., Koo T.J., Sinopoli B., Sastry S., Lee E.A. A hierarchical hybrid system model and its simulation, *Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control*, 1999, pp. 2407–2411.

13. Popov E.A., Shornikov Yu.V. Detection of different type events in hybrid dynamical systems, *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2020, no. 4 (80), pp. 159–176. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-159-176 (in Russ.).

14. Kochergin M.I., Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Dmitriev V.M., Shyrigin Yu.A. Multilevel modeling of physical and technical problems using the example of a deep-well pump, *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 79–86. DOI 10.21293/1818-0442-2019-22-3-79-86 (in Russ.).

15. Dmitriev V.M., Gembukh L.A., Sakhabutdinov A.E. Implementation of a Digital Twin in the MARS Modeling Environment, *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics*, 2023, vol. 23, no. 4. pp. 26–36. DOI 10.14529/ctcr230403 (in Russ.).

16. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing*. Cambridge, Cambridge University Press, 1997, 1018 p.

17. Thompson Joe F., Warsi Z. A., Mastin C. V. *Numerical Grid Generation, Foundations and Applications*. Amsterdam, North-Holland, 1985, 331 p.

18. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Kochergin M.I. Matrix-topological analysis of component circuits, *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2023, no. 62, pp. 25–35 (in Russ.).

19. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Ob'ektno-orientirovannoe modelirovanie v srede Rand Model Designer 7* [Object-oriented modeling in the Rand Model Designer 7 environment]. Moscow, Prospect, 2016, 256 p. (in Russ.).

Maksim I. Kochergin

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor, Department of Computer Systems in Control and Design, Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-7404-8718
Phone: +7 (382-2) 70-15-15, int.: 20-64
Email: maksim.i.kochergin@tusur.ru

УДК 004.056

П.А. Теплюк, А.Г. Якунин

Методика фаззинга системных вызовов ядра Linux с применением больших языковых моделей

Актуальной проблемой организации фаззинг-тестирования ядра Linux является создание спецификаций системных вызовов – специальных декларативных описаний, которые впоследствии используются фаззером для генерации последовательностей системных вызовов. По большей части это является ручной работой, требующей глубоких знаний, занимающей много времени и не исключающей фактор ошибки. В настоящее время проводятся исследования, направленные на автоматизацию процесса создания таких спецификаций. В работе рассмотрены подходы к генерации спецификаций системных вызовов KSG, SyzDescribe и KernelGPT, которые зарекомендовали себя при обнаружении уникальных сбоев ядра в процессе фаззинг-тестирования. Предложена методика организации фаззинг-тестирования ядра Linux, содержащая в том числе этап автоматической генерации спецификаций системных вызовов на основе больших языковых моделей (Large Language Model – LLM).

Ключевые слова: операционная система, ядро Linux, фаззинг, Syzkaller, спецификации системных вызовов, LLM.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-85-91

В настоящее время вместе со стремительным развитием компьютерных технологий все более актуальной становится задача обеспечения безопасности операционных систем, сетевых протоколов и программного обеспечения. Операционные системы на базе ядра Linux как основа системного программного обеспечения используются в информационных системах, в том числе являющихся объектами критической информационной инфраструктуры [1].

В соответствии с приказом ФСТЭК России № 239 от 25 декабря 2017 г. «Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [2], в число требований к испытаниям по выявлению уязвимостей в программном обеспечении входит проведение фаззинг-тестирования программы.

При организации фаззинг-тестирования ядра Linux необходимо решить следующие задачи:

- выбор способа запуска ядра системы;
- определение входных данных для проведения фаззинга;
- выбор способа передачи входных данных ядру системы;
- разработка технологии автоматической генерации входных данных;
- определение способов выявления сбоев или уязвимостей системы в процессе ее тестирования;
- разработка системы автоматизации процесса фаззинга.

В предыдущей работе [3] исследованы подходы к определению поверхности атаки ядра Linux в контексте подготовки к фаззинг-тестированию. Определение поверхности атаки позволяет выявить наиболее приоритетные подсистемы, которые необходимо протестировать в первую очередь ввиду достаточно объемной кодовой базы ядра Linux.

В другой работе [4] был проведен анализ существующих подходов и инструментов фаззинга си-

стемных вызовов ядра Linux, а также выполнено экс-периментальное фаззинг-тестирование с применением инструмента с открытым исходным кодом Syzkaller [5]. В рамках исследования были выявлены сбои и уязвимости в актуальных версиях ядра, одна из которых – use-after-free (использование памяти после освобождения).

Возвращаясь к вопросу решения проблем при организации фаззинг-тестирования ядра Linux, входными данными для фаззера уровня ядра являются системные вызовы, аргументы к которым необходимо передавать через запуск исполняемого файла.

Инструмент Syzkaller в процессе своей работы генерирует случайные программы на основе спецификаций системных вызовов, запускает их на исследуемой ОС, получает обратную связь в виде достигнутого покрытия кода по ядру и выполняет мониторинг журнала ядра на предмет записей об ошибках. Случайные программы конструируются таким образом, чтобы увеличить размер покрытия.

Актуальной проблемой организации фаззинга ядра с помощью Syzkaller является процесс создания спецификаций системных вызовов – в настоящее время это остается по большей части ручной работой, требующей глубоких знаний ядра и больших затрат времени. Вследствие этого достаточное количество системных вызовов еще не охвачено. Не исключен также человеческий фактор при создании спецификаций, что может привести к ошибкам.

Создание спецификаций системных вызовов в Syzkaller

Фаззер Syzkaller для генерации системных вызовов использует спецификации – сконструированные определенным образом описания интерфейсов ядра, чтобы знать, какие имеются системные вызовы и какие типы аргументов они принимают. Описания составляются вручную разработчиками фаззера.

В процессе своей работы Syzkaller исполняет программы, которые состоят из последовательности системных вызовов. Программы генерируются слу-

чайным образом на основе описаний. Цепочки системных вызовов обычно связаны друг с другом. Например, за системным вызовом `open()` следует `write()`, который пишет данные в файл.

Syzkaller составляет список наиболее «интересных» с точки зрения эффективности фаззинга программ, который называется корпусом.

Помимо генерации новых программ с нуля, Syzkaller может взять существующую программу из

```
syscallname "(" [arg [", " arg]*] ")" [type] ["(" attribute* ")"]
arg = argname type
argname = identifier
type = typename [ "[" type-options "]" ]
typename = "const" | "intN" | "intptr" | "flags" | "array" | "ptr" |
"string" | "strconst" | "filename" | "glob" | "len" |
"bytesize" | "bytesizeN" | "bitsize" | "vma" | "proc" |
"compressed_image"
type-options = [type-opt [", " type-opt]]
```

Рис. 1. Пример грамматики описания системного вызова

Пример описаний системных вызовов для MIDI-интерфейса [7] представлен на рис. 2.

```
write$midi(
    fd fd_midi,
    data ptr[in, array[int8]],
    len bytesize[data]
)

read$midi(
    fd fd_midi,
    data ptr[out, array[int8]],
    len bytesize[data]
)

ioctl$SNDRV_RAWMIDI_IOCTL_PVERSION(
    fd fd_midi,
    cmd const[SNDRV_RAWMIDI_IOCTL_PVERSION],
    arg ptr[out, int32]
)

ioctl$SNDRV_RAWMIDI_IOCTL_INFO(
    fd fd_midi,
    cmd const[SNDRV_RAWMIDI_IOCTL_INFO],
    arg ptr[out, snd_rawmidi_info]
)
```

Рис. 2. Спецификация системных вызовов для MIDI-интерфейса

Такие описания уже дальше используются фаззером для генерации, мутации, сериализации, десериализации программ. Программой, как уже ранее было сказано, является в данном случае последовательность системных вызовов с конкретным набором аргументов. Пример программы представлен на рис. 3.

```
r0 = open(&(0x7f0000000000)="/file0", 0x3, 0x9)
read(r0, &(0x7f0000000000), 42)
close(r0)
```

Рис. 3. Пример программы Syzkaller

Подходы к автоматической генерации спецификаций системных вызовов

Как уже было отмечено, актуальным вопросом при организации фаззинг-тестирования ядра Linux с помощью Syzkaller является создание спецификаций системных вызовов – по большей части описания

корпуса и изменить ее. Мутация включает в себя вставку и удаление системных вызовов, а также изменение их аргументов. Измененные программы, которые фаззер пометил в качестве «интересных», также могут включаться в корпус.

Описание грамматики системных вызовов осуществляется с помощью специального декларативного языка Syzlang [6]. Пример грамматики представлен на рис. 1.

интерфейсов составляются вручную разработчиками, что занимает определенное время и человеческие ресурсы. В последнее время проводятся исследования, направленные на автоматизацию данного процесса.

Авторы работы [8] предлагают подход к генерации спецификаций системных вызовов KSG (Kernel Specification Generation) для фаззеров уровня ядра. Вследствие сложности исходного кода ядра Linux возникают следующие проблемы:

1. Извлечение точек входа – операций подсистем ядра, которые выполняются системными вызовами. Некоторые такие операции могут быть зарегистрированы динамически во время инициализации ядра и загрузки модуля.

2. Типы входных данных для точек входа могут различаться в разных путях выполнения кода, что усложняет их идентификацию.

3. Для генерации спецификаций с использованием языка, применяемого конкретным фаззером, необходимо выполнить сопоставление синтаксиса и семантическое кодирование на основе собранной информации.

Автоматическая генерация спецификаций системных вызовов в KSG выполняется в 3 шага:

1. Сначала извлекается информация о точках входа без привязки к деталям их реализации.

2. На основе полученных точек входа KSG выполняется чувствительный к путям выполнения кода анализ для сбора точных типов входных данных и ограничений диапазона.

3. На основе собранной информации генерируются спецификации системных вызовов на языке Syzlang.

Процесс генерации представлен на рис. 4.

В исследовании [9] предлагается решение под названием SyzDescribe для создания описаний системных вызовов драйверов ядра Linux. Процесс генерации состоит из двух основных этапов:

1. Анализ модулей ядра. SyzDescribe определяет модули ядра по функциям инициализации и связывает их с порядком выполнения во время загрузки ядра. Затем SyzDescribe распознает наличие драйвер-

ра ядра, который охватывает более одного модуля, и восстанавливает основные интерфейсы, созданные и предоставленные пользовательскому пространству, т.е. поддерживаемые системные вызовы и соответствующие обработчики, а также имя файла устройства.

2. Анализ обработчиков системных вызовов. Для каждого обнаруженного обработчика системных вызовов восстанавливаются дополнительные сведения об этих интерфейсах: значения команд и типы аргументов, поддерживаемые системным вызовом `ioctl()`. В конечном итоге SyzDescribe может преобразовать полученную информацию в формат описаний системных вызовов, поддерживаемый фаззером Syzkaller.

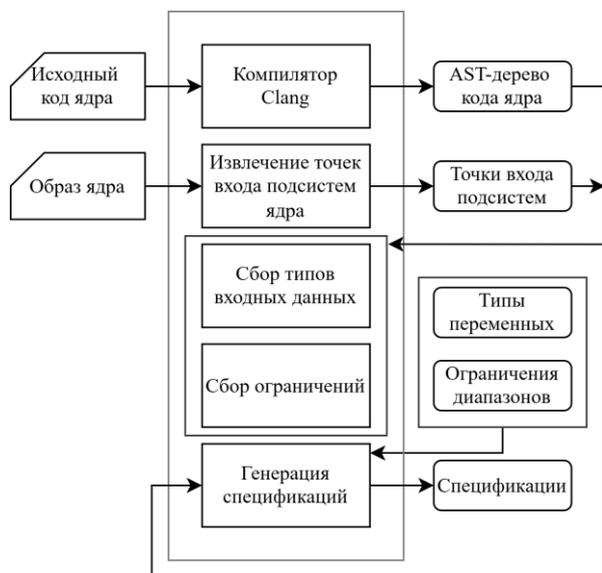


Рис. 4. Процесс генерации спецификаций системных вызовов в KSG

По результатам экспериментов было обнаружено, что разработанные вручную спецификации системных вызовов в Syzkaller составляют менее половины от общего числа спецификаций, генерируемых SyzDescribe. Кроме того, решение было применено к ядру ОС Android смартфона Google Pixel 6, для которого еще не было существующих спецификаций, и обнаружено 18 уникальных сбоев ядра.

В работе [10] предлагается подход, именуемый KernelGPT, в основе которого лежит использование больших языковых моделей (Large Language Model – LLM) для генерации спецификаций системных вызовов. Применение LLM обусловлено, в частности, тем, что именованные системные вызовы и аргументы, как правило, выполняются на естественном языке.

Большая языковая модель – это нейронная лингвистическая сеть, обученная на огромных корпусах данных для понимания и обработки текста. Следующие ключевые особенности LLM позволяют применить ее для автоматического создания спецификаций системных вызовов ядра:

- глубокое понимание контекста именованных системных вызовов и их аргументов;
- способность генерации описаний с использованием именованных системных вызовов на естественном языке.

LLM в последнее время активно внедряются для решения задач в области информационной безопасности [11–14].

В рамках реализации подхода KernelGPT используется модель GPT4 от компании OpenAI [15]. Модель обучается на основе исходного кода ядра, документации и вариантов использования системных вызовов.

Сначала KernelGPT идентифицирует драйверы с помощью LLM, чтобы вывести имена устройств и спецификации их инициализации, используя сведения об обработчиках операций. Затем KernelGPT определяет значения команд, типы аргументов и определения типов для описания обработчиков `ioctl()` устройств. При этом используется соответствующий исходный код ядра. KernelGPT использует итеративный подход для автоматического включения всех компонентов спецификации.

На рис. 5 представлена архитектура KernelGPT с примером генерации спецификации для системного вызова `ioctl()`, предназначенного для операций ввода-вывода, специфичных для устройства.

В рамках экспериментальных исследований с помощью модуля извлечения кода было выявлено 132 обработчика `ioctl()` в конфигурации ядра Syzbot, не считая обработчиков USB и сетевых драйверов. У 50 из них не были обнаружены спецификации в Syzkaller. KernelGPT сгенерировал 39 описаний. Оставшиеся 11 спецификаций не были сгенерированы по следующим причинам:

1. Сложная логика кода затрудняет его понимание со стороны LLM.
2. Анализируемый код может превышать ограничение контекстного окна LLM.

Используя KernelGPT, авторам удалось обнаружить 7 ранее неизвестных сбоев ядра в драйверах, спецификации к которым были сгенерированы автоматически.

Описание методики организации фаззинга системных вызовов

По результатам анализа подходов к автоматической генерации спецификаций системных вызовов была предложена методика фаззинг-тестирования ядра Linux, включающая в себя 5 этапов.

Этап 1. Выбор и развертывание актуальной версии ядра Linux.

Необходимо в основной операционной системе либо в виртуальной машине выполнить сборку фаззера. Также нужно определиться с актуальной версией ядра Linux. Его необходимо загрузить, скомпилировать и создать образ, который далее будет использоваться фаззером для создания тестовых виртуальных машин.

Этап 2. Определение поверхности атаки.

Предварительным этапом организации фаззинг-тестирования, как уже упоминалось ранее, является определение поверхности атаки, т.е. выявление всех неконтролируемых входов в систему, которые не подконтрольны легитимному пользователю, но могут быть потенциально подконтрольны злоумышленнику.

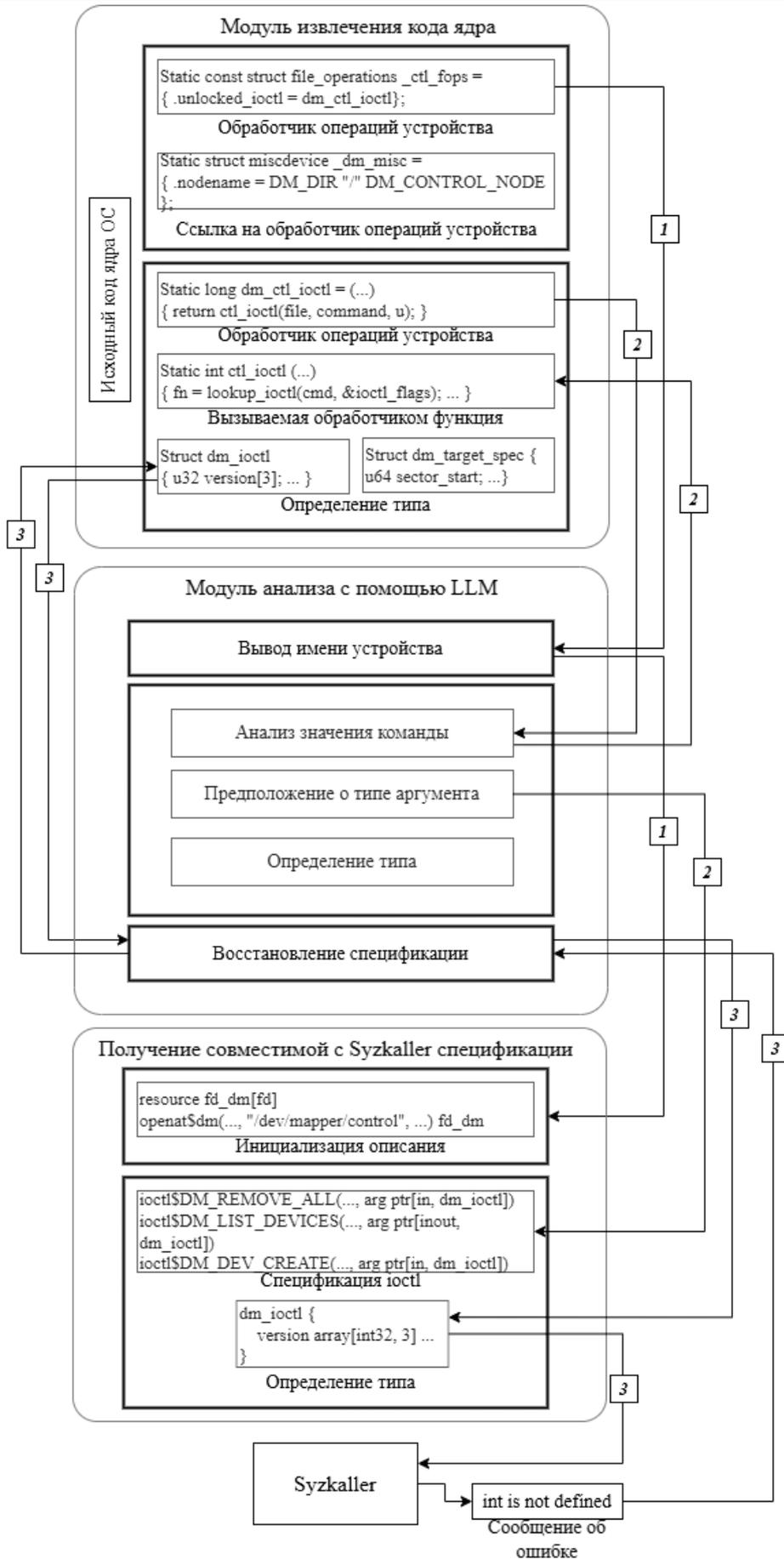


Рис. 5. Архитектура KernelGPT

В предыдущей работе [3] был предложен гибридный подход к определению поверхности атаки ядра Linux, который включает в себя следующие методы:

- измерение метрик сложности кода [16];
- применение интроспекции виртуальных машин;
- динамический анализ помеченных данных [17].

Применение предложенного подхода, в котором сочетаются статические и динамические методы анализа, позволяет более точно построить поверхность атаки, нежели использование методов по отдельности.

Этап 3. Генерирование спецификаций системных вызовов на основе больших языковых моделей.

Фаззеры уровня ядра требуют определенного формата описания системных вызовов. Как правило, такие спецификации составляются вручную разработчиками на декларативном языке Syzlang. Однако были исследованы новые подходы, которые предлагают автоматическую генерацию этих описаний и, судя по результатам экспериментов, показали свою эффективность.

В частности, на данном этапе методики предлагается использовать описанный выше перспективный подход KernelGPT на базе LLM для автоматизации создания спецификаций.

Этап 4. Запуск фаззинг-тестирования.

Фаззинг осуществляется путем запуска системных вызовов с аргументами в виде случайных данных. При фаззинге системных вызовов необходимо решить 2 проблемы:

- корректно сформировать аргументы системных вызовов для прохождения валидации;
- корректно зафиксировать факт того, что ядро ведет себя неожиданным способом.

Многие системные вызовы осуществляют валидацию переданных аргументов. Поэтому необходимо, чтобы фаззер создавал необходимые условия для корректного запуска системных вызовов. Этот подход существенно повышает эффективность тестирования по сравнению с более грубым подходом, когда системные вызовы выполняются с абсолютно случайными аргументами.

Существуют следующие методы генерации входных данных для фаззинга:

1. Модификация существующих данных. Новые данные генерируются путем незначительных изменений имеющихся данных.

2. Генерация новых данных. Данные подготавливаются заранее на основе протоколов или в соответствии с заданными правилами [18].

Для того чтобы понять, что программа ведет себя недокументированным способом, необходимо анализировать возвращаемые значения. Поэтому любой фаззер системных вызовов должен вести журнал всех попыток.

Этап 5. Анализ результатов фаззинг-тестирования.

На данном этапе необходимо проанализировать следующие результаты:

- информацию о найденных сбоях ядра;

- входные данные, приводящие к сбою;
- воспроизводимость найденных сбоев;
- графы вызовов функций;
- взаимосвязь линейных блоков функций.

В рамках этого этапа необходимо также определить, приводит ли сбой к уязвимости.

На рис. 6 представлены этапы фаззинг-тестирования ядра Linux согласно предложенной методике.

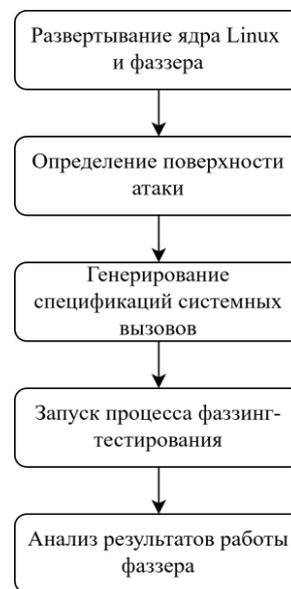


Рис. 6. Этапы методики фаззинг-тестирования ядра Linux

Заключение

В работе были проанализированы следующие подходы к автоматическому созданию спецификаций системных вызовов для фаззинга ядра Linux: KSG, SyzDescribe и KernelGPT. Как правило, в своей основе эти подходы предполагают статический анализ кода ядра и дальнейшую обработку полученных системных вызовов, а также типов их аргументов.

Интересным с точки зрения исследования является KernelGPT. KernelGPT – первый подход к автоматическому созданию спецификаций системных вызовов с помощью LLM. Перспективными направлениями исследований являются генерация тестовых наборов данных с помощью KernelGPT, мутации данных для фаззинга и непосредственной генерации последовательностей системных вызовов для программ Syzkaller.

Предложена методика проведения фаззинг-тестирования с использованием LLM. Она включает в себя следующие этапы:

1. Выбор и развертывание актуальной версии ядра Linux и фаззера.
2. Определение поверхности атаки.
3. Генерирование спецификаций системных вызовов с использованием LLM.
4. Запуск фаззинг-тестирования.
5. Анализ результатов.

В дальнейшем планируется экспериментальное тестирование предложенной методики с использованием фаззера Syzkaller.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минцифры России (грант ИБ). Проект № 26/23-К.

Литература

1. Хорошилов А. Международный проект по разработке ядра Linux // Системный администратор. – 2022. – № 3 (232). – С. 32–37.

2. Информационное сообщение ФСТЭК России от 10 февраля 2021 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-10-fevralya-2021-g-n-240-24-647>, свободный (дата обращения: 28.08.2023).

3. Теплюк П.А. Модели и подходы к анализу поверхности атаки для фаззинг-тестирования ядра Linux / П.А. Теплюк, А.Г. Якунин // Безопасность информационных технологий. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 135–145. DOI: 10.26583/bit.2024.1.08.

4. Теплюк П.А. Выявление недостатков безопасности ядра Linux с применением фаззинга системных вызовов / П.А. Теплюк, А.Г. Якунин // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2024. – № 2 (59). – С. 138–151. DOI: 10.48612/jisp/pdp9-d25r-gbeu.

5. Syzkaller – kernel fuzzer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/google/syzkaller>, свободный (дата обращения: 07.09.2024).

6. Syscall description language [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/google/syzkaller/blob/master/docs/syscall_descriptions_syntax.md, свободный (дата обращения: 07.09.2024).

7. Спецификации MIDI-интерфейса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/google/syzkaller/blob/master/sys/linux/dev_snd_midi.txt, свободный (дата обращения: 07.09.2024).

8. Sun H. KSG: Augmenting Kernel Fuzzing with System Call Specification Generation / H. Sun, Y. Shen, J. Liu, Y. Xu, Y. Jiang // Proc. of the 2022 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 22). – 2022. – P. 351–365.

9. Hao Y. SyzDescribe: Principled, Automated, Static Generation of Syscall Descriptions for Kernel Drivers / Y. Hao, G. Li, X. Zou, W. Chen, S. Zhu, Z. Qian, A. Sani // Proc. of 2023 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). – 2023. – P. 3262–3278. DOI: 10.1109/SP46215.2023.10179298.

10. Yang C. KernelGPT: Enhanced Kernel Fuzzing via Large Language Models / C. Yang, Z. Zhao, L. Zhang // arXiv:2401.00563 [cs.CR]. – 2023. – P. 13. DOI: 10.48550/arXiv.2401.00563.

11. Patsakis C. Assessing LLMs in malicious code deobfuscation of real-world malware campaigns / C. Patsakis, F. Casino, N. Lykousas // Expert Systems with Applications. – 2024. – Vol. 256. – P. 13. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124912.

12. Ye J. Detecting command injection vulnerabilities in Linux-based embedded firmware with LLM-based taint analysis of library functions / J. Ye, X. Fei, X. de Carne de Carnavalet, L. Zhao // Computers & Security. – 2024. – Vol. 144. DOI: 10.1016/j.cose.2024.103971.

13. Lu G. GRACE: Empowering LLM-based software vulnerability detection with graph structure and in-context learning / G. Lu, X. Ju, X. Chen, W. Pei, Z. Cai // Journal of Systems and Software. – 2024. – Vol. 212. DOI: 10.1016/j.jss.2024.112031.

14. Sufi F. An innovative GPT-based open-source intelligence using historical cyber incident reports / F. Sufi // Natural Language Processing Journal. – 2024. – Vol. 7. – P. 17. DOI: 10.1016/j.nlp.2024.100074.

15. GPT4 | OpenAI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://openai.com/index/gpt-4/>, свободный (дата обращения: 09.09.2024).

16. Bavendiek S. Attack surface analysis of the Linux kernel based on complexity metrics. // Master's Thesis in the study course «Applied Informatics / Software Engineering». – 2021. – P. 88. DOI: 10.13140/RG.2.2.29943.70561.

17. Natch: Определение поверхности атаки программ с помощью отслеживания помеченных данных и интроспекции виртуальных машин / П.М. Довгалюк, М.А. Климушенкова, Н.И. Фурсова, В.М. Степанов, И.А. Васильев, А.А. Иванов, А.В. Иванов, М.Г. Бакулин, Д.И. Егоров // Труды ИСП РАН. – 2022. – Т. 34, № 5. – С. 89–110.

18. Томилов И.О. Разработка методики применения фаззинга для анализа уязвимостей программного обеспечения / И.О. Томилов, И.Н. Карманов, П.А. Звягинцева, Е.В. Грицкевич // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 4. – С. 48–63.

Теплюк Павел Андреевич

Ст. преп. каф. информатики, вычислительной техники и информационной безопасности

Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова

Ленина пр-т, 46, г. Барнаул, Россия, 656038

Тел.: +7-909-506-53-05

Эл. почта: my@teplyukpavel.ru

Якунин Алексей Григорьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. информатики, вычислительной техники и информационной безопасности

Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова

Ленина пр-т, 46, г. Барнаул, Россия, 656038

Тел.: +7 (385-2) 29-07-86

Эл. почта: almpas@list.ru

Teplyuk P.A., Yakunin A.G.

Methodology for fuzzing Linux kernel system calls using large language models

A pressing issue in organizing Linux kernel fuzzing testing is creating system call specifications – special declarative descriptions that are subsequently used by a fuzzer to generate system call sequences. This is mostly manual work that requires deep knowledge, takes a lot of time, and does not exclude the error factor. Research is currently underway to automate the process of creating such specifications. The paper considers approaches to generate system call specifications KSG, SyzDescribe, and KernelGPT that have proven themselves in detecting unique kernel crashes during fuzz testing. A methodology to organize Linux kernel fuzzing testing is proposed, that includes a stage of automatic generation of system call specifications based on large language models (Large Language Model – LLM).

Keywords: operating system, Linux kernel, fuzzing, Syzkaller, system call specification, LLM.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-85-91

References

1. Khoroshilov A. [International Linux Kernel Development Project]. *Sistemnyj Administrator*, 2022, no. 3 (232), pp. 32–37 (in Russ.).

2. Информационное сообщение ФСТЕК России от 10 февраля 2021 г. [Information message from FSTEC of Russia dated February 10, 2021] (in Russ.). Available at: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informationnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-10-fevralya-2021-g-n-240-24-647>, free (Accessed: August 28, 2023).
3. Teplyuk P.A., Yakunin A.G. Models and approaches to attack surface analysis for fuzz testing of the Linux kernel. It Security (Russia), 2024, vol. 31, no. 1, pp. 135–145. DOI: 10.26583/bit.2024.1.08.
4. Teplyuk P.A., Yakunin A.G. Identifying security flaws in the Linux Kernel using system call fuzzing. Information Security Problems. Computer Systems, 2024, no. 2 (59), pp. 138–151. DOI: 10.48612/jisp/pdp9-d25r-g6eu.
5. Syzkaller – kernel fuzzer. Available at: <https://github.com/google/syzkaller>, free (Accessed: September 7, 2024).
6. Syscall description language. Available at: https://github.com/google/syzkaller/blob/master/docs/syscall_descriptions_syntax.md, free (Accessed: September 07, 2024).
7. MIDI system calls specifications. Available at: https://github.com/google/syzkaller/blob/master/sys/linux/dev_snd_midi.txt, free (Accessed: September 07, 2024).
8. Sun H., Shen Y., Liu J., Xu Y., Jiang Y. KSG: Augmenting Kernel Fuzzing with System Call Specification Generation. *Proceedings of the 2022 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 22)*, 2022, pp. 351–365.
9. Hao Y., Li G., Zou X., Chen W., Zhi S., Qian Z., Sani A. SyzDescribe: Principled, Automated, Static Generation of Syscall Descriptions for Kernel Drivers. *Proceedings of 2023 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2023, pp. 3262–3278. DOI: 10.1109/SP46215.2023.10179298.
10. Yang C., Zhao Z., Zhang L. KernelGPT: Enhanced Kernel Fuzzing via Large Language Models. arXiv:2401.00563 [cs.CR], 2023, 13 p. DOI: 10.48550/arXiv.2401.00563.
11. Patsakis C., Casino F., Lykousas N. Assessing LLMs in malicious code deobfuscation of real-world malware campaigns. *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 256, 13 p. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124912.
12. Ye J., Fei X., de Carne de Carnavalet X., Zhao L. Detecting command injection vulnerabilities in Linux-based embedded firmware with LLM-based taint analysis of library functions. *Computers & Security*, 2024, vol. 144. DOI: 10.1016/j.cose.2024.103971.
13. Lu G., Ju X., Chen X., Pei W., Cai Z. GRACE: Empowering LLM-based software vulnerability detection with graph structure and in-context learning. *Journal of Systems and Software*, 2024, vol. 212. DOI: 10.1016/j.jss.2024.112031
14. Sufi F. An innovative GPT-based open-source intelligence using historical cyber incident reports. *Natural Language Processing Journal*, 2024, vol. 7, 17 p. DOI: 10.1016/j.nlp.2024.100074.
15. GPT4 / OpenAI. Available at: <https://openai.com/index/gpt-4/>, free (Accessed: September 09, 2024).
16. Bavendiek S. Attack surface analysis of the Linux kernel based on complexity metrics. Master's Thesis in the study course «Applied Informatics / Software Engineering», 2021, 88 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.29943.70561.
17. Dovgalyuk P.M., Klimushenkova M.A., Fursova N.I., Stepanov V.M., Vasiliev I.A., Ivanov A.A., Ivanov A.V., Bakulin M.G., Egorov D.I. [Natch: using virtual machine introspection and taint analysis for detection attack surface of the software]. *Trudy ISP RAN [Proceedings of ISP RAS]*, 2022, vol. 34, no. 5, pp. 89–110 (in Russ.)
18. Tomilov I.O., Karmanov I.N., Zvyagintseva P.A., Gritskevich E.V. Development of fuzzing application technique for software vulnerabilities analysis. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 48–63.

Pavel A. Teplyuk

Senior Lecturer, Department of Informatics,
Computer Engineering and Information Security,
Polzunov Altai State Technical University
46, Lenin pr., Barnaul, Russia, 656038
Phone: +7-909-506-53-05
Email: my@teplyukpavel.ru

Alexey G. Yakunin

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Informatics, Computer Engineering
and Information Security,
Polzunov Altai State Technical University
46, Lenin pr., Barnaul, Russia, 656038
Phone: +7 (385-2) 29-07-86
Email: almpas@list.ru

УДК 681.5.09; 004.052.44; 004.032.26

С. Ван, В.Л. Елисеев

Методика повышения качества нейросетевого моделирования динамических объектов

Рассматривается задача нейросетевого моделирования нелинейных динамических объектов с помощью рекуррентных нейронных сетей. Предлагается подход по улучшению точности моделирования с помощью статической нейронной сети типа «многослойный перцептрон», обрабатывающей корреляционные зависимости динамического процесса и аппроксимирующей ошибку моделирования. Сформулирована методика синтеза и применения корреляционной нейросетевой модели CCF-MLP, обеспечивающей улучшение качества моделирования обычной рекуррентной нейронной сети. Проведены имитационные эксперименты с нейросетевой рекуррентной сетью типа GRU, моделирующей поведение нелинейного динамического объекта, а также GRU с предложенной моделью CCF-MLP. Подтверждено улучшение качества моделирования (RMSE, MAPE) при применении CCF-MLP как в случае наличия, так и отсутствия помехи в наблюдаемых данных. Практическая применимость предложенного метода проверена на реальной системе контроля уровня жидкости.

Ключевые слова: взаимная корреляционная функция, многослойный перцептрон, рекуррентная нейронная сеть, моделирование динамического объекта, нелинейный динамический объект.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-92-99

Одной из важнейших задач науки и техники является создание моделей объектов и систем. Решение этой задачи открывает широкие возможности по предсказанию поведения моделируемого объекта, в том числе для целей оптимального управления. Особенно сложной задачей является синтез моделей динамических объектов, т.е. таких, где наблюдаемый выход зависит не только от текущего входа, но и от входов в предыдущие моменты времени. Таким образом, динамический объект в каком-то смысле обладает памятью, которую обычно называют состоянием. В непрерывном времени динамические объекты описываются дифференциальными уравнениями, в которых состояние представлено дифференцируемой по времени величиной:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t), \\ y = g(x, u, t), \end{cases} \quad (1)$$

где x – состояние объекта, u – входное воздействие на объект, y – наблюдаемый выход объекта, t – время. В случае дискретного времени вместо дифференциального уравнения используется разностное:

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_k, t_k), \\ y_k = g(x_k, u_k, t_k), \\ t_k = t_{k-1} + \Delta t. \end{cases} \quad (2)$$

Состояние недоступно для непосредственного наблюдения. Кроме того, состояние субъективно – оно зависит от выбора математической структуры модели. Синтез моделей аналитическими методами в общем случае является достаточно трудоёмким процессом, поскольку требует задания в явном виде математической структуры модели и оценки её параметров. Разработка общих методик синтеза моделей для нелинейных объектов вряд ли возможна, хотя для распространенных частных случаев существуют разработанные подходы [1]. По этой причине нелинейные динамические объекты исследуются с

целью построения модели только в случае специальных требований к качеству моделирования [2].

Одними из современных инструментов непараметрического моделирования являются искусственные нейронные сети (ИНС). К неоспоримым достоинствам ИНС относится возможность синтеза модели по данным наблюдения за моделируемым объектом. Нейросетевое моделирование может осуществляться только в дискретном времени.

Рассматривая задачу нейросетевого моделирования динамических объектов, следует выделить два подхода:

- регрессионные или предсказывающие модели:

$$\tilde{y}_k = M_y(y_{k-1}, y_{k-2}, \dots, u_k);$$

- автономные или поведенческие модели:

$$\tilde{y}_k = M_y(\tilde{y}_{k-1}, u_k).$$

Регрессионные нейросетевые модели не имеют обратных связей, не хранят внутреннее состояние, но при этом обеспечивают очень высокую точность предсказания наблюдаемых выходов объекта. К недостаткам таких моделей следует отнести невозможность работы без самого объекта, относительно текущего наблюдаемого выхода которого и строится предсказание.

Автономные модели могут быть реализованы с помощью рекуррентных ИНС (Recurrent Neural Networks, RNN), и они не требуют наличия объекта для моделирования его поведения.

$$\tilde{y}_k = \text{RNN}(\tilde{y}_{k-1}, u_k). \quad (3)$$

Современными представителями рекуррентных ИНС являются сети GRU и LSTM. Отметим, что такие модели не всегда обеспечивают необходимую точность моделирования, особенно при широком спектре частот в моделируемых процессах. Повышение точности моделей типа GRU и LSTM сопряжено с увеличением количества ячеек, что повышает вычислительную сложность обучения таких моделей.

Рассмотрим подход, позволяющий увеличить точность автономной нейросетевой модели с архитектурой GRU за счёт применения взаимной корреляционной функции (ВКФ) и многослойного перцептрона (МП).

Улучшение способности нейронных сетей моделировать динамические объекты является важным и перспективным исследованием. Традиционные методы синтеза часто полагаются на точные математические модели, такие как дифференциальные и разностные уравнения, но эти модели часто ограничены сложностью и нелинейными характеристиками системы. В последние годы нейронные сети как мощный инструмент аппроксимации функций широко используются при моделировании динамических объектов благодаря своей адаптивности и способности к обучению [3, 4].

Во-первых, преимущество нейросетевого моделирования заключается в его адаптивности. Для набора наблюдений нейронная сеть может найти оптимальную конфигурацию весов, при которой взаимосвязь между входными и выходными данными будет максимально приближена к истинному динамическому поведению. Данное свойство используется в практических приложениях, поскольку нейронные сети могут аппроксимировать динамические зависимости, обычно описываемые дифференциальными и разностными уравнениями, не требуя при этом явных аналитических решений [5]. Это позволяет нейронным сетям описывать процессы и давать достаточно точные предсказания даже в отсутствие известных физических моделей.

Применение глубоких нейронных сетей, особенно рекуррентных нейронных сетей, позволяет адаптироваться к различным сложным закономерностям временных рядов, включая периодичность, тренд и шум и т.д., что очень важно для моделирования сложного поведения многих реальных систем [6].

Известные ранее недостатки рекуррентных нейронных сетей, обусловленные эффектами исчезающих и взрывающихся градиентов при обучении на длинных временных рядах, были эффективно преодолены в современных архитектурах LSTM и GRU. Эффективность рекуррентных нейронных сетей при работе с временными рядами позволяет применять их для моделирования нелинейных процессов химических реакций, таких как pH-нейтрализация [7].

Во-вторых, многие инженерные приложения требуют построения моделей как часть проектирования системы управления [8]. Это связано с тем, что адаптивный регулятор, построенный на основе модели идентификации системы, обладает большей робастностью при наличии неизвестных параметров модели и внешних возмущений.

Однако применение методов моделирования нелинейных динамических объектов сталкивается со многими проблемами. Объём обучающих данных и их свойства определяют способность модели к обобщению. Если в наборе данных отсутствуют

ключевые характеристики, такие как рабочее распределение амплитуд и характерные частоты изменения сигнала, либо если присутствует значительная по интенсивности случайная помеха, то это может привести к неудовлетворительному качеству модели и низкой точности прогнозирования. Кроме того, чрезмерно сложные нейронные сети при обучении на недостаточных по объёму и вариативности обучающих данных могут не приобрести в процессе обучения обобщающую способность, плохо работая на незнакомых данных. Это особенно заметно в динамических системах, поскольку сам по себе большой объём обучающей выборки может содержать мало паттернов динамического поведения системы и не полностью описывать её динамику.

В настоящее время улучшение возможностей нейронных сетей по моделированию динамических объектов, как правило, рассматривается комплексно с точки зрения структуры сети и стратегий обучения. Например, улучшение структуры сети помогает уменьшить ошибки обобщения модели [9], а выбор различных функций потерь более устойчив к выбросам значений и шуму [10]. Также вводятся элементы конфронтации в процесс обучения, чтобы сделать модель более устойчивой к небольшим возмущениям и уменьшить ошибку распознавания при состязательной атаке [11].

Несмотря на впечатляющие результаты применения глубоких рекуррентных нейронных сетей, исследователи отмечают сложность моделирования нелинейных динамических объектов. Легко убедиться, что даже успешные, по мнению авторов статьи [12], результаты применения LSTM далеки от идеала.

Постановка задачи

Несмотря на то, что автономные модели могут быть реализованы с использованием нейронных сетей с обратной связью, предсказания модели не всегда точны. На такие модели могут влиять такие факторы, как объём и полнота обучающих данных, переобучение или недостаточное обучение, что приводит к ошибкам в результатах моделирования. Также ошибки могут возникать в случае быстрого изменения входного воздействия. Поставим задачу улучшить качество моделирования рекуррентной нейросетевой модели нелинейного динамического объекта на основе подходов по представлению динамики объекта с помощью композиции взаимной корреляционной функции (ВКФ) и ИНС.

Автономные модели функционируют параллельно и независимо от объекта (Plant), как показано на рис. 1. При работе автономных моделей всегда возникает ошибка $e_t = y_t - \tilde{y}_t$. И обычно y_t неизвестен, потому что не всегда есть эталонная модель.

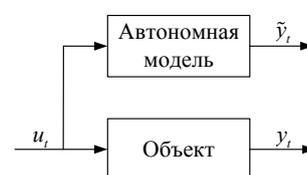


Рис. 1. Автономная модель и моделируемый объект

Реальный результат объекта выражается как $y_t = e_t + \tilde{y}_t$, т.е., зная ошибку e_t или её оценку \tilde{e}_t , можно получить более точное приближение y_t . После синтеза автономной модели прогноз \tilde{e}_t , полученный путем прогнозирования ошибки прогнозирования автономной модели на основе RNN, может быть использован для дополнения результатов прогнозирования исходной модели

$$\hat{y}_t = \tilde{e}_t + \tilde{y}_t. \quad (4)$$

Вычислим взаимную корреляционную функцию (ВКФ) как характеристику входных и выходных данных рекуррентной ИНС за определенный период времени и воспользуемся этой характеристикой для прогнозирования ошибки на выходе модели RNN с помощью многослойного перцептрона (МП). Прогноз ошибки на выходе модели RNN будет использован для улучшения результатов ее прогнозирования. Будем называть модель предсказания ошибки CCF-MLP, поскольку она составлена из ВКФ (Cross-correlation function, CCF) и МП (Multi-layer perceptron, MLP). Предложенная схема улучшенной модели представлена на рис. 2.



Рис. 2. Предложенная улучшенная автономная модель и моделируемый объект

Будем сравнивать качество моделирования динамических объектов с помощью характеристик RMSE и MAPE, используемых в задачах регрессии:

$$\text{MAPE} = 100\% \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\tilde{y}_i - y_i|}{|y_i|}, \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - y_i)^2}. \quad (6)$$

Методология

Существует тесная взаимосвязь между динамическим поведением системы управления и входным сигналом. Динамическое поведение – это характеристика, которая определяет реакцию системы на изменение входного сигнала, включая устойчивость, скорость отклика и установившийся выходной сигнал. Если входной сигнал с некоторой задержкой оказывает значительное влияние на объект, то корреляция между входным и выходным сигналами на времени этой задержки будет очень сильной. Взаимная корреляционная функция (ВКФ) является одним из инструментов описания этой взаимосвязи в предположении о её линейности. Последовательность ВКФ, рассчитанных в разные моменты времени, демонстрирует реакцию объекта на входной сигнал.

ВКФ является мерой оценки линейной взаимосвязи входа и выхода. В работе [13] показано, что совокупность ВКФ позволяет описать динамику нелинейных объектов. Применение ВКФ совместно с ИНС позволило решить полезные и практически важные задачи обнаружения разладки и смены рабочего режима [14, 15].

Для сигналов в непрерывном времени $u(t)$ и $y(t)$ ВКФ $r_{uy}(\tau)$ представляет степень корреляции между каждым значением входного сигнала $u(t)$ и соответствующим значением выходного сигнала $y(t + \tau)$ при временной задержке τ

$$r_{uy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)y(t + \tau)dt. \quad (7)$$

При цифровой обработке сигналов ВКФ обычно дискретизируется:

$$r_{uy}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} u(n)y(k+n). \quad (8)$$

Поскольку ВКФ между входным и выходным сигналом содержит информацию о динамическом отклике объекта, будем аппроксимировать ошибку предсказания уточняемой рекуррентной нейросетевой модели с помощью ВКФ и МП.

Основной мотивацией использования многослойного перцептрона для прогнозирования ошибки являются его простота и возможность аппроксимации произвольных нелинейных функций. В отличие от рекуррентных нейросетей, перцептрон с ВКФ на входе может учитывать динамику системы в пределах окна расчёта ВКФ и при этом не нуждается в обратных связях. Сама ВКФ реализует локальную память, отражающую динамику моделируемого процесса.

Метод синтеза CCF-MLP

Представим изложенные идеи в форме алгоритма, обеспечивающего синтез модели CCF-MLP для предсказания прогнозируемой ошибки моделирования динамического объекта рекуррентной ИНС.

Шаг 1. Получение исходных данных. Проведём моделирование целевого процесса $y(t) = g(u(t))$ или получим набор данных вход-выход $\{u(t), y(t)\}$ при наблюдении за натурной динамической системой в дискретном времени. Это будут временные ряды входа $u(t)$ и выхода $y(t)$, где $1 \leq t \leq L$ – индекс отчёта времени, а L – длина времени моделирования или наблюдения. Обучаем соответствующую рекуррентную нейросетевую модель динамического объекта для получения набор данных вход-выход $\{u_t, \tilde{y}_t\}$, где $\tilde{y}_t = \text{RNN}(\tilde{y}_{t-1}, u_t)$. Одновременно получаем временной ряд ошибок $\{e_t\} = \{y_t - \tilde{y}_t\}$.

Шаг 2. Рассчитаем ВКФ в дискретном времени в окне шириной d по временным рядам входа u_t и выхода \tilde{y}_t нейросетевой модели динамического объекта с шагом 1 по формуле (9):

$$r_{uy}(\tau, k) = \frac{1}{d} \sum_{i=k}^{k+d-1} u_i \tilde{y}_{i+\tau} \quad (9)$$

и получим набор векторов ВКФ \mathbf{R}_{iy}^k , описывающих поведение динамической системы. Далее для обозначения номера окна, в котором рассчитывалась ВКФ, будем использовать индекс k , значения которого находятся в интервале: $1 \leq k \leq L-d+1$.

Индекс k указывает на позицию во временном ряду, в котором рассчитана данная ВКФ, а аргумент τ является смещением одного ряда относительно другого, для которого рассчитывается одно значение дискретной ВКФ. Таким образом, ВКФ в позиции k можно рассматривать, как вектор

$$\mathbf{R}_{iy}^k = (r_{iy}(-d+1, k), \dots, r_{iy}(0, k), \dots, r_{iy}(d-1, k))^T.$$

Компактно можно записать, что

$$\mathbf{R}_{iy}^k = CCF(u_k, \tilde{y}_k, d).$$

Шаг 3. Обучение многослойного перцептрона для вычисления прогнозируемого значения \tilde{e}_k делается на основе набора данных $\{\mathbf{R}_{iy}^k, \tilde{e}_{k+d-1}\}$:

$$\tilde{e}_{k+d-1} = \text{MLP}(\mathbf{R}_{iy}^k),$$

$$\sum_{k=1}^{L-d+1} (e_{k+d-1} - \tilde{e}_{k+d-1})^2 \rightarrow \min.$$

Будем соотносить рассчитанный по окну $(k, k+d-1)$ вектор ВКФ с ошибкой в позиции $k+d-1$, поскольку предсказание ошибки не должно нарушать причинно-следственную связь между сигналами.

Метод применения CCF-MLP

После того как модель прогнозирования ошибок CCF-MLP создана, она вводится для улучшения результатов прогнозирования рекуррентной ИНС. Схема показана на рис. 3 и изложена ниже по шагам.



Рис. 3. Алгоритм повышения качества нейросетевого моделирования динамических объектов

Шаг 1. Собрать временной ряд последовательных значений на входе $\mathbf{u}_k = (u_1, \dots, u_d)^T$ и на выходе $\tilde{\mathbf{y}}_k = (\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_d)^T$ длиной d отсчётов времени.

Шаг 2. Рассчитать ВКФ по \mathbf{u}_k и $\tilde{\mathbf{y}}_k$, чтобы получить векторы $\mathbf{R}_{iy}^k = CCF(u_k, \tilde{y}_k, d)$.

Шаг 3. Рассчитать с помощью МП прогнозируемое значение ошибки $\tilde{e}_{k+d-1} = \text{MLP}(\mathbf{R}_{iy}^k)$.

Шаг 4. Дополнить \tilde{e}_{k+d-1} к выходным данным \tilde{y}_{k+d-1} нейросетевой модели динамического объекта, чтобы получить улучшенный результат прогнозирования \hat{y}_{k+d-1} .

Численные эксперименты

Для иллюстрации применения изложенной методики рассмотрим задачу моделирования нелинейного динамического объекта.

$$y(k) = 0,8 \sin(y(k-1)) + 1,2u(k-1). \quad (10)$$

В качестве входного сигнала будем использовать амплитудно-модулированный псевдослучайный сигнал (APRBS). Пример входного сигнала u и соответствующего ему выходного y длительностью 3 000 отсчётов времени показан на рис. 4.

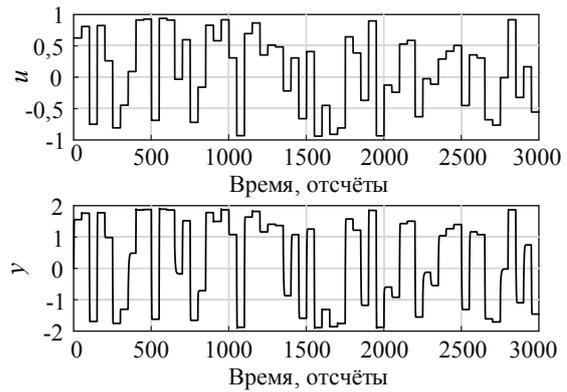


Рис. 4. Входной сигнал u и выходной сигнал y для обучения GRU

В качестве автономной нейросетевой модели использовалась архитектура GRU. Структура ИНС включала слой 5-мерной ячейки GRU, связанный с полносвязным слоем нейронов размером 5 и слоем регрессии, который используется для построения выходных данных сети. На текущем временном шаге k в сеть GRU поступает сигнал $u(k), \dots, u(k-d+1)$ для прогнозирования сигнала $y(k)$, где d – длина входного сигнала 50. Обучение GRU продолжалось 400 эпох, для минимизации функции потерь использовался алгоритм оптимизации ADAM. Производительность обученной модели GRU при моделировании динамического объекта на тестовом наборе показана на рис. 5.

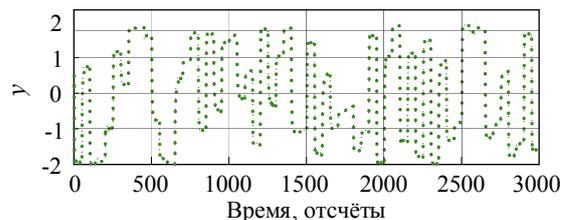


Рис. 5. Моделируемый GRU-сигнал \tilde{y} (пунктирная линия) и выходной сигнал y динамического объекта (сплошная линия)

Далее ВКФ и ошибка e будут рассчитываться по длине окна $d = 50$, а многослойный перцептрон обучим вычислять ошибку \tilde{e} . Входные и выходные данные перцептрона показаны на рис. 6 и 7. Размер набора обучающих данных для МП составляет 5 000 окон.

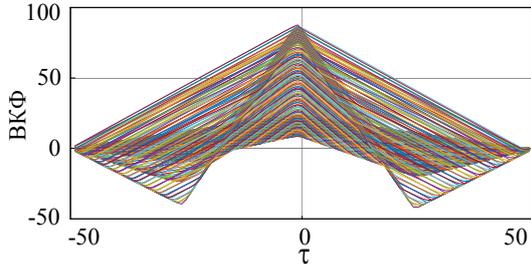


Рис. 6. Рассчитанные ВКФ для обучающей выборки

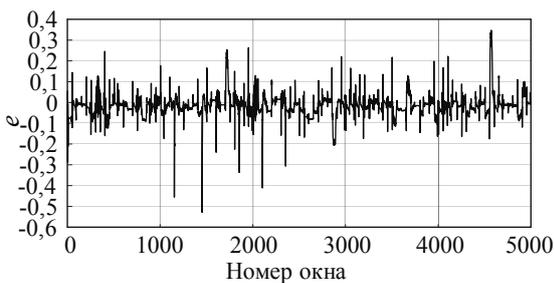


Рис. 7. Сигнал e для обучающей выборки

Структура МП имеет 5 скрытых слоёв, количество нейронов в каждом скрытом слое равно 7.

Затем входные данные u длиной 1 049 вводятся в модель GRU для получения результата прогнозирования \tilde{y} , а затем ВКФ извлекается из 1 000 окон в качестве входных данных перцептрона. Результаты прогнозирования перцептрона показаны на рис. 8.

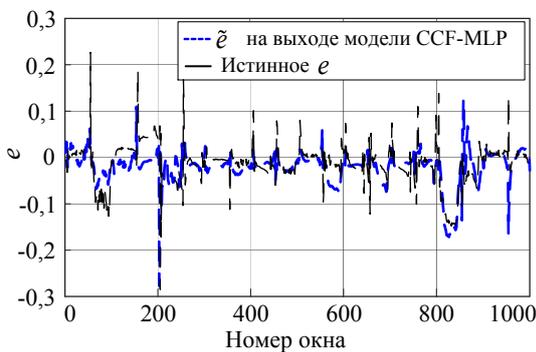


Рис. 8. Сигнал \tilde{e} на выходе модели CCF-MLP

Модель CCF-MLP используется для улучшения результатов прогнозирования модели GRU по формуле $\hat{y} = \tilde{e} + \tilde{y}$.

Таким образом, улучшенная модель GRU+CCF-MLP может быть представлена формулами:

$$\begin{cases} \tilde{y}_k = \text{GRU}(\tilde{y}_{k-1}, u_k); \\ \hat{y}_k = \text{MLP}(\text{CCF}(\tilde{y}_{k-1}, \dots, u_k, \dots)) + \tilde{y}_k. \end{cases} \quad (11)$$

Сравнение результатов прогнозирования показано на рис. 9.

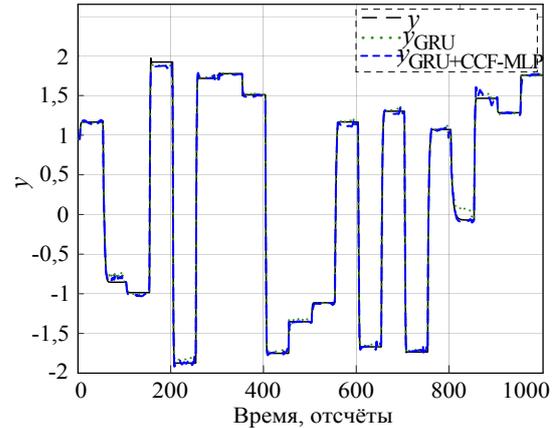


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования

В табл. 1 показаны результаты сравнения результатов двух моделей. Видно, что внедрение модели CCF-MLP улучшает результаты прогнозирования модели GRU.

Таблица 1

Сравнение результатов тестирования двух моделей GRU и GRU+CCF-MLP

Нейросетевая модель	RMSE	MAPE
GRU	0,044379	32,9332
GRU+CCF-MLP	0,039344	7,5385

Теперь рассмотрим случай, когда сигнал y на выходе динамического объекта содержит аддитивный шум s_j средним 0 и дисперсией 0,001.

Прогнозирование ошибок e между выходными данными динамического объекта и выходными данными нейросетевой модели GRU динамического объекта с помощью модели CCF-MLP показано на рис. 10.

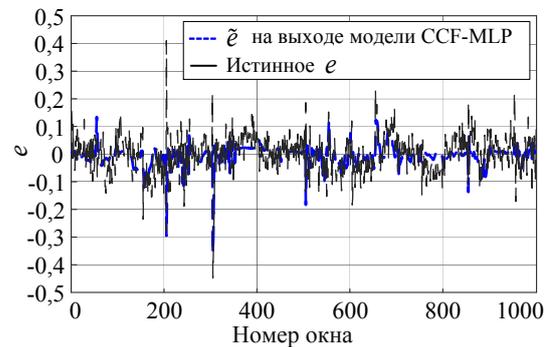


Рис. 10. Сигнал \tilde{e} на выходе модели CCF-MLP

Сравнение результатов прогнозирования модели GRU и модели GRU, улучшенной с использованием модели CCF-MLP, показано на рис. 11. Сравнение качества нейросетевых моделей в численных характеристиках RMSE и MAPE представлено в табл. 2.

Приведенные результаты показывают, что модель CCF-MLP позволяет улучшить результаты моделирования модели GRU для динамического объекта, когда наблюдаемый сигнал y на выходе динамического объекта содержит помеху.

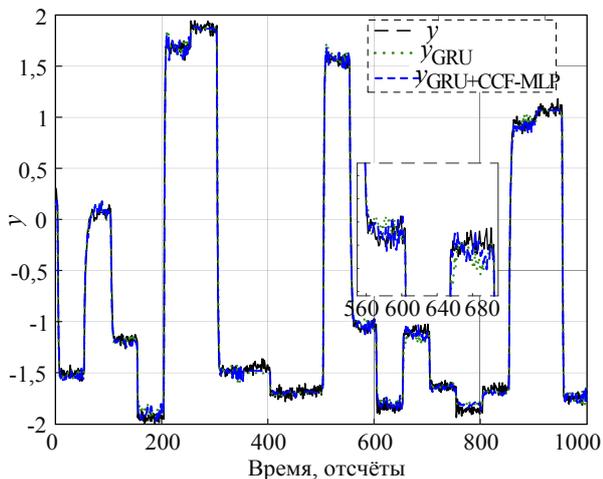


Рис. 11. Сравнение результатов моделирования

Таблица 2

Сравнение результатов тестирования моделей GRU и GRU+CCF-MLP при наличии шума

Нейросетевая модель	RMSE	MAPE
GRU	0,066521	56,0253
GRU+CCF-MLP	0,064535	30,1615

Эксперименты на реальных данных

С целью демонстрации возможности практического применения предложенного метода были проведены эксперименты на данных из реальной системы контроля уровня жидкости, состоящей из двух каскадных резервуаров со свободными выходами, питаемыми насосом. Данные взяты из материалов статьи [16]. Входным сигналом является напряжение $u(k)$, подаваемое на насос, а выходным сигналом является измерение уровня воды $h(k)$ в нижнем резервуаре. Некоторые данные, полученные из системы контроля уровня жидкости, показаны на рис. 12.

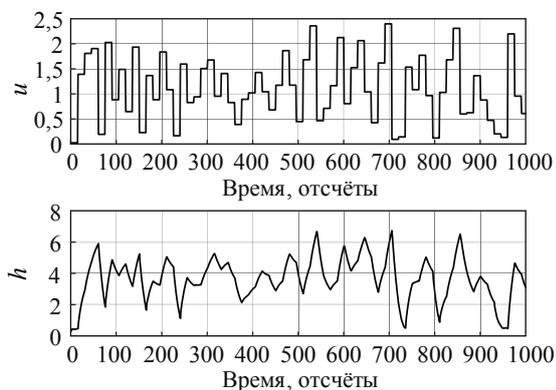


Рис. 12. Входные-выходные данные из каскадных резервуаров

Поскольку выпускные отверстия открыты, а резервуары глубокие и имеют большую вертикальную протяженность, результатом является существенно нелинейная динамика, которая меняется в зависимости от уровня воды. Набор данных был сформирован с тактовым периодом 15 отсчетов, шагом дискретизации 4,0 с, и было записано 7 500 отсчетов.

Архитектура и условия обучения нейросети GRU как автономной модели были аналогичны описанным ранее экспериментам.

Далее ВКФ и ошибка e рассчитывались с шириной окна $d=50$, а многослойный перцептрон обучался вычислять ошибку \tilde{e} . Структура МП включала 5 скрытых слоёв, количество нейронов в каждом скрытом слое равно 7. Размер набора обучающих данных для МП составил 3 700 окон.

Входные данные u длиной 750 отсчетов подавались на вход модели GRU для получения результата прогнозирования \hat{y} , а затем ВКФ рассчитывалась по 701 окну в качестве входных данных МП. Результаты прогнозирования ошибки с помощью обученного МП показаны на рис. 13.

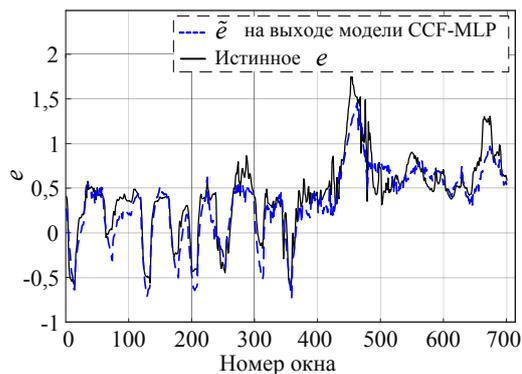


Рис. 13. Сигнал \tilde{e} на выходе модели CCF-MLP

Сравнение результатов прогнозирования модели GRU и модели GRU, улучшенной с использованием модели CCF-MLP, показано на рис. 14.

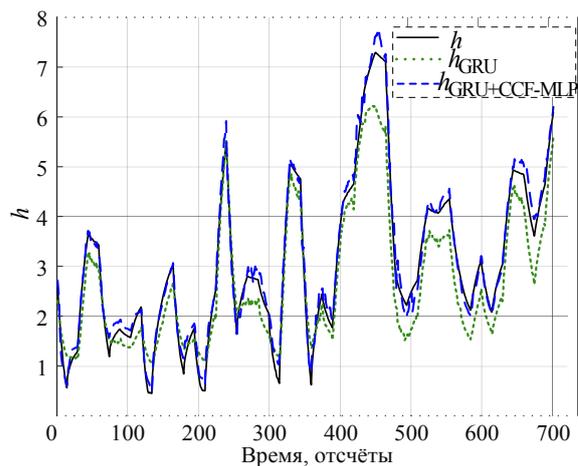


Рис. 14. Сравнение результатов моделирования

Видно, что модель GRU+CCF-MLP может отслеживать траекторию уровня жидкости лучше, чем одна модель GRU.

В табл. 3 показаны результаты сравнения результатов моделирования моделей GRU и GRU+CCF-MLP для систем контроля уровня жидкости.

Значение RMSE и значение MAPE модели GRU+CCF-MLP относительно меньше, чем у модели GRU, что доказывает эффективность предлагаемого метода на реальных данных.

Таблица 3
Сравнение результатов моделирования моделей GRU и GRU+CCF-MLP для систем контроля уровня жидкости

Нейросетевая модель	RMSE	MAPE
GRU	0,532	19,3977
GRU+CCF-MLP	0,18333	7,0089

Обсуждение

В работе предложена методика улучшения качества моделирования автономной нейросетевой модели с помощью статической нейросети типа многослойный перцептрон, обрабатывающей на входе ВКФ входного и выходного сигнала автономной модели. Корреляционно-нейросетевой блок CCF-MLP в экспериментах с моделированием нелинейного динамического объекта эффективно дополнил автономную нейросетевую модель GRU. Уникальной особенностью CCF-MLP является отсутствие внутреннего механизма памяти, что упрощает процесс обучения и повышает точность прогнозов модели. Это проектное решение снижает сложность вычислений и делает нашу модель более эффективной при решении сложных задач последовательности.

С другой стороны, ВКФ как стратегия линейной динамической локальной оценки расширяет возможности GRU, особенно для задач долгосрочной зависимости, и компенсирует ограничения GRU при обработке определенных долгосрочных моделей. Эта комбинация позволяет модели лучше фиксировать временные корреляции в данных последовательности, улучшая общую производительность.

Стоит отметить, что из-за дифференцируемой природы CCF-MLP объединение его с GRU для построения модели GRU+CCF-MLP дает возможность применять ее в сложных сценариях, таких как синтез модели обратной динамики объекта управления и предиктивное управление по модели (Model Predictive Control, MPC). Этот метод не только сохраняет преимущества GRU, но также обеспечивает более эффективные и точные решения по управлению за счет надежности и гибкости CCF-MLP.

Выводы

В данной работе подробно исследуется возможность использования ВКФ и многослойного перцептрона для улучшения результатов прогнозирования автономных нейросетевых моделей нелинейных динамических объектов. Предлагается методика синтеза улучшенной нейросетевой модели, дополненной по сравнению с исходной обучаемым корреляционно-нейросетевым блоком CCF-MLP.

Результаты показывают, что по сравнению с исходной моделью GRU улучшенная модель GRU с CCF-MLP демонстрирует преимущества в точности моделирования нелинейного динамического объекта. Значения MAPE и RMSE улучшенной модели значительно снизились, что доказывает, что предложенный метод действительно эффективно снижает ошибку прогнозирования. Эксперименты с зашумленными и реальными данными показывают, что предложенный метод улучшения качества модели может использоваться на практике при работе с реальными динамическими объектами и их моделями.

Применение разработанного метода не ограничивается улучшением качества моделирования нейронных сетей GRU. Разработанный метод также может быть использован с другими типами рекуррентных нейронных сетей, таких как LSTM, а также потенциально может принести пользу для улучшения качества моделей других типов.

Литература

1. Шумихин А.Г. Применение нейросетевых динамических моделей в задаче параметрической идентификации технологического объекта в составе системы управления / А.Г. Шумихин, А.С. Бояришинова // Вестник ПНИПУ. – 2015. – № 3. – С. 21–38.
2. Schoukens J. Nonlinear system identification: A user-oriented road map / J. Schoukens, L. Ljung // IEEE Control Systems Magazine. – 2019. – Vol. 39, No. 6. – P. 28–99.
3. Yamada T. Dynamic system identification using neural networks / T. Yamada, T. Yabuta // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. – 1993. – Vol. 23, No. 1. – P. 204–211.
4. Wang J. A fully automated recurrent neural network for unknown dynamic system identification and control / J. Wang, Y. Chen // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2006. – Vol. 53, No. 6. – P. 1363–1372.
5. Legaard C. Constructing neural network based models for simulating dynamical systems / C. Legaard, T. Schranz, G. Schweiger, J. Dragoña // ACM Computing Surveys. – 2023. – Vol. 55, No. 11. – P. 1–34.
6. Gonzalez J. Non-linear system modeling using LSTM neural networks / J. Gonzalez, W. Yu // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, No. 13. – P. 485–489.
7. Bonassi F. Nonlinear MPC for offset-free tracking of systems learned by GRU neural networks / F. Bonassi, C.F. da Silva, R. Scattolini // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54, No. 14. – P. 54–59.
8. Al Seyab R.K. Nonlinear system identification for predictive control using continuous time recurrent neural networks and automatic differentiation / R.K. Al Seyab, Y. Cao // Journal of Process Control – 2008. – Vol. 18, No. 6. – P. 568–581.
9. Vaswani A. Attention is all you need / A. Vaswani, N.M. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A.N. Gomez, Ł. Kaiser, I. Polosukhin // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017.
10. Lin T. Focal loss for dense object detection / T. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, P. Dollár // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2020. – Vol. 42, No. 2. – P. 318–327.
11. Madry A. Towards deep learning models resistant to adversarial attacks // arXiv preprint arXiv:1706.06083. – 2017.
12. Gonzalez J. Non-linear system modeling using LSTM neural networks / J. Gonzalez, W. Yu // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, No. 13. – P. 485–489.
13. Елисеев В.Л. Применение функции взаимной корреляции в качестве характеристики динамики нестационарных, нелинейных объектов и нейросетевых моделей / В.Л. Елисеев, С. Ван // Тезисы докл. XXVIII Байкальской Всерос. конф. с междунар. участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении». – Иркутск, 2023. – 57 с.
14. Ван С. Обнаружение разладки модели динамического объекта с помощью функции корреляции / С. Ван, В.Л. Елисеев // XXX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М.: Радуга, 2024. – 301 с.
15. Ван С. Нейросетевой метод обнаружения смены режима работы нелинейного динамического объекта /

С. Ван, В.Л. Елисеев // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 48–56.

16. Wigren T. Three free data sets for development and benchmarking in nonlinear system identification / T. Wigren, J. Schoukens // 2013 European control conference (ECC). – Zurich: 2013. – P. 2933–2938.

Ван Сюэчунь

Аспирант каф. управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ»

Красноказарменная ул., 13, с. 3, г. Москва, Россия, 111250

ORCID: 0009-0006-1319-6374

Тел.: +7-985-457-43-56

Эл. почта: vansiuech@mpei.ru

Елисеев Владимир Леонидович

Канд. техн. наук, доцент каф. управления

и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ»

Красноказарменная ул., 13, с. 3, г. Москва, Россия, 111250

ORCID: 0000-0002-9341-7475

Тел.: +7-916-914-98-89

Эл. почта: vlad-eliseev@mail.ru

Wang X., Eliseev V.L.

Methodology to improve the quality of neural network modeling of dynamic objects

The problem of neural network modeling of nonlinear dynamic objects using recurrent neural networks is considered. An approach to improve the accuracy of modeling using a static neural network of the «multilayer perceptron» type, that processes correlation dependencies of a dynamic process and approximates the modeling error, is proposed. A technique for synthesis and application of the correlation neural network model CCF-MLP improving the quality of modeling of a conventional recurrent neural network, is formulated. Simulation experiments are carried out with a neural network recurrent network of the GRU type, that models the behavior of a nonlinear dynamic object, as well as GRU with the proposed CCF-MLP model. The improvement in the quality of modeling (RMSE, MAPE) is confirmed in the case of using CCF-MLP both in the presence and absence of noise in the observed data. The practical applicability of the proposed method was tested on a real liquid level control system.

Keywords: cross-correlation function, multilayer perceptron, recurrent neural network, dynamic object modeling, nonlinear dynamic object.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-92-99

References

1. Shumikhin A.G., Boyarshinova A.S. [Controlled Technological Objects Parametric Identification with Dynamic Neural Network Models]. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*, 2015, no. 11, pp. 21–38 (in Russ.).

2. Schoukens J., Ljung L. Nonlinear system identification: A user-oriented road map. *IEEE Control Systems Magazine*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 28–99.

3. Yamada T., Yabuta T. Dynamic system identification using neural networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1993, vol. 23, no. 1, pp. 204–211.

4. Wang J., Chen Y. A fully automated recurrent neural network for unknown dynamic system identification and control. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2006, vol. 53, no. 6, pp. 1363–1372.

5. Legaard C., Schranz T., Schweiger G., Drgoňa J. Constructing neural network based models for simulating dynamical systems. *ACM Computing Surveys*, 2023, vol. 55, no. 11, pp. 1–34.

6. Gonzalez J., Yu W. Non-linear system modeling using LSTM neural networks. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 13, pp. 485–489.

7. Bonassi F., da Silva C.F., Scattolini R. Nonlinear MPC for offset-free tracking of systems learned by GRU neural networks. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, vol. 54, no. 14, pp. 54–59.

8. Al Seyab R.K., Cao Y. Nonlinear system identification for predictive control using continuous time recurrent neural networks and automatic differentiation. *Journal of Process Control*, 2021, vol. 18, no. 6, pp. 568–581.

9. Vaswani A., Shazeer N.M., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez, A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017.

10. Lin T., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. Focal loss for dense object detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, vol. 42, no. 2, pp. 318–327.

11. Madry A. Towards deep learning models resistant to adversarial attacks. *arXiv preprint arXiv:1706.06083*, 2017.

12. Gonzalez J., Yu W. Non-linear system modeling using LSTM neural networks. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 13, pp. 485–489.

13. Eliseev V.L., Wang X. [Application of the cross-correlation function as a characteristic of the dynamics of non-stationary, non-linear objects and neural network models]. *Materials of the 28th Baikal All-Russian Conference with international participation «Information and Mathematical Technologies in Science and Management»*. Irkutsk, 2023, 57 p. (in Russ.).

14. Wang X., Eliseev V.L. [Detecting Dynamic Object Model Disorders Using Correlation Function]. *Materials of the Technical Conference of Students and Postgraduates «Radio Electronics, Electrical Engineering and Power Engineering»*. M.: Raduga, 2024, 301 p. (in Russ.).

15. Wang X., Eliseev V.L. [Neural Network Method for Detecting Changes in the Operating Mode of a Nonlinear Dynamic Object]. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2024, no. 3, pp. 48–56 (in Russ.).

16. Wigren T., Schoukens J. Three free data sets for development and benchmarking in nonlinear system identification. *2013 European Control Conference (ECC)*. Zurich, 2013, pp. 2933–2938.

Xuechun Wang

Postgraduate student, Department of Control

and Intelligent Technologies, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

13, Krasnokazarmennaya st., bldg. 3, Moscow, Russia, 111250

ORCID: 0009-0006-1319-6374

Phone: +7-985-457-43-56

Email: vansiuech@mpei.ru

Vladimir L. Eliseev

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor,

Department of Control and Intelligent Technologies, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

13, Krasnokazarmennaya st., bldg. 3, Moscow, Russia, 111250

ORCID: 0000-0002-9341-7475

Phone: +7-916-914-98-89

Email: vlad-eliseev@mail.ru

УДК 519.87

Е.Б. Грибанова, Д.В. Леонов

Разработка моделей условной оптимизации с использованием экспертных оценок

Исследованы возможности генеративного текстового искусственного интеллекта по определению весовых коэффициентов относительной важности признаков на основе модели рандомизации. Впервые выполнена модификация моделей условной оптимизации с целью учёта весовых коэффициентов относительной важности.

Ключевые слова: текстовый генеративный искусственный интеллект, весовые коэффициенты, оптимизационная модель, условная оптимизация, ChatGPT.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-100-108

Актуальность направления исследования определяется востребованностью оптимизационных методов в различных областях: технике, медицине, образовании и т.д. В прикладной экономике решение оптимизационных задач позволяет осуществить оптимальное распределение ресурсов, прогнозирование, классификацию объектов, оценку их эффективности и т.д. Применение оптимизационных методов способствует повышению качества управленческих решений, от которых зависит эффективность функционирования социально-экономической системы. В условиях неопределенности, изменчивости и сложности современного мира возникает необходимость использования суждений экспертов, основанных на знаниях, интуиции и практическом опыте. Эти оценки могут принимать различные формы, включая количественные прогнозы, качественные анализы и рекомендации. Весовые коэффициенты определяют относительную важность каждого из факторов в процессе оценки. В частности, они используются для формирования интегральных показателей, прогнозов, решения обратных задач и т.д. Для оценки весовых коэффициентов, как правило, привлекается группа экспертов. При этом возникает ряд проблем:

- 1) субъективность оценки эксперта;
- 2) трудность проверки достоверности оценок, отсутствие их обоснования в публикациях;
- 3) сложность поиска и привлечения экспертов в исследуемой области;
- 4) использование нерепрезентативной выборки для исследования;
- 5) трудоемкость процесса экспертизы, расстановки отношений признаков, возможность ошибок, особенно при большом числе исследуемых признаков.

В данной статье исследуется возможность решения обозначенных проблем с помощью текстового генеративного искусственного интеллекта и метода стохастического доминирования, в частности, метода рандомизации весовых коэффициентов [1].

Метод рандомизации весовых коэффициентов

Наиболее распространенным методом оценки весовых коэффициентов относительной важности является метод анализа иерархий, согласно которому эксперты проводят парные сравнения критериев. На основании сравнений вычисляются весовые коэффи-

циенты, которые в дальнейшем чаще всего используются для формирования интегрального показателя с применением аддитивной свертки. Однако в статье [2] показано, что решение, полученное с помощью метода анализа иерархий, является лишь частным случаем всех возможных решений и может отличаться математическим ожиданием.

Таким образом, методы, основанные на однозначном выборе весовых коэффициентов, подвергаются критике [3]: при отсутствии обоснований необходимости использования однозначного выбора весовых коэффициентов для решения задачи предпочтительным и более естественным является упорядочивание признаков по степени их влияния на основе модели рандомизации коэффициентов [1]. Полученные данные считаются более достоверными, устойчивыми и могут быть представлены в виде системы неравенств, которые должны быть выполнены с вероятностью, равной единице [1]:

$$p_i \geq p_j, \quad \forall i \neq j.$$

На коэффициенты накладываются следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1, p_i \geq 0, i = \overline{1, m}.$$

Весовые коэффициенты могут принимать значения из следующего набора:

$$p_i \in \left\{ 0, \frac{1}{N}, \dots, \frac{N-1}{N}, 1 \right\},$$

где N – заданное целое число, которое определяет точность оценки весов.

В случае если все показатели являются ключевыми и не допускаются нулевые значения весовых коэффициентов, их минимальное значение устанавливается равным $\frac{1}{N}$.

В таком случае число L всех возможных векторов весовых коэффициентов конечно. При линейной свертке и отсутствии иерархии показателей имеет место равномерное распределение, где каждый набор весов принимается с вероятностью $\frac{1}{L}$. При таком подходе веса являются случайной величиной.

В [3] говорится о том, что допустимым является любой набор рандомизированных значений.

В [1] был предложен алгоритм, согласно которому определяются все возможные комбинации, соответствующие установленным ограничениям, и вычисляется математическое ожидание для каждого из весов.

Текстовая модель генеративного искусственного интеллекта ChatGPT

В 2022 г. была представлена языковая модель искусственного интеллекта ChatGPT, предоставляющая сгенерированные диалоговые ответы на вопросы. Модель обучается с использованием алгоритмов обучения с подкреплением и участием человека. Внушительное число параметров, превышающее 1,7 трлн [4], позволяет эффективно обрабатывать и анализировать сложные данные. ChatGPT была названа прорывом из-за высоких результатов, получаемых с её помощью. Некоторые авторы отмечают потенциальные риски применения ChatGPT, которые в первую очередь связаны с возможной безработицей и снижением уровня самостоятельности работ в образовании [5]. Также ожидается, что в будущем появятся более совершенные модели [6], что сделает ChatGPT таким же привычным средством для решения задач, как и Excel [7].

В связи с этим наблюдается большой интерес к практическому применению таких моделей и раскрытию их потенциала в различных областях.

Так, было установлено, что ChatGPT способна успешно пройти экзамен на юридическую аккредитацию в США [8]. Gautier Marti [9] подготовил достаточно полное руководство по количественной торговле, основанное почти исключительно на результатах, полученных с помощью ChatGPT. Также были опубликованы результаты в части составления рациона питания для аллергиков с помощью ChatGPT [10], что вызвало интерес и последующее обсуждение [11]. При этом некоторые авторы исследований даже включают ChatGPT в соавторы научных статей [12].

В последнее время стали появляться работы, посвященные применению ChatGPT в области экономики и управления. Рассмотрим некоторые из них.

В статье [13] приводится возможность создания работа-консультанта на основе ChatGPT. Указывается, что в тесте по финансовой грамотности он набрал 99% баллов. В работе [14] также говорится о том, что ChatGPT можно эффективно использовать в качестве финансового консультанта, а методы, основанные на генеративном искусственном интеллекте, могут быть использованы для эффективного анализа и обобщения инвестиционной информации.

Работа [8] посвящена изучению применения ChatGPT в научных экономических исследованиях, включая генерацию идей, обзор литературы, подготовку данных и тестирование результатов. Наилучшие результаты модель показала в части генерирования идеи и подготовки данных.

В исследовании [15] говорится о многообещающих возможностях ChatGPT для улучшения существующих финансовых приложений, в том числе с

помощью анализа настроений. Модель может более эффективно анализировать огромные объемы неструктурированных данных, такие как новостные статьи и заголовки, в то время как у инвестора может возникать сложность с анализом взаимосвязей на рынке вследствие перегруженности информацией. Это может помочь в принятии решений по разработке инвестиционных стратегий, управлению рисками и оптимизации инвестиционного портфеля. Кроме того, ChatGPT способна обосновывать результаты доступным языком, вследствие чего может быть использован как опытными, так и начинающими инвесторами.

В исследовании [16] утверждается, что ChatGPT способна успешно выявлять акции, которые принесут наибольшую прибыль в течение следующего месяца. Авторы связывают это со способностью оценивать новостную информацию и своевременной корректировкой рейтингов моделью.

В работе [17] отмечена эффективность ChatGPT в выборе классов активов для инвестирования в различных экономических условиях, в том числе за счет способности выявлять макроэкономические взаимосвязи между экономикой и финансовыми рынками.

Статья [18] посвящена исследованию способности ChatGPT осуществлять диверсификацию и выбирать активы из разных классов для построения портфеля. Отмечается, что модель обладает потенциалом для изучения аспектов рынка, которые могут оказаться сложными для понимания обычными инвесторами, что делает её ценным инструментом для управления портфелями. Согласно полученным результатам, ChatGPT демонстрирует статистически значимое улучшение индекса разнообразия по сравнению со случайной выборкой.

Все эти исследования свидетельствуют о том, что ChatGPT может улучшить эффективность принятия решений и выступать в качестве источника экспертной информации. В этой связи возникает потребность модификации существующего математического аппарата и исследования возможностей применения ChatGPT.

Для выполнения работы были выбраны следующие версии ChatGPT:

- ChatGPT-4o. Считается, что данная версия лучше всего подходит для решения общих задач;
- ChatGPT-o1. Предназначена для решения более сложных, узкоспециализированных и математических задач.

Российскими аналогами ChatGPT являются GigaChat, выпущенная в 2023 г. Сбербанком, и YandexGPT, разработанная компанией Яндекс. Данные модели также будут рассмотрены для решения задачи формирования весовых коэффициентов.

Применение текстовых генеративных моделей для формирования весовых коэффициентов относительной важности

Для исследования возможностей модели в части формирования весовых коэффициентов был использован следующий подход:

1. Поиск статей, в которых приводятся результаты экспертной оценки показателей.

2. Генерирование коэффициентов с помощью текстовых моделей.

3. Проверка соответствия сгенерированных коэффициентов представленным в литературе на основе модели рандомизации показателей.

Для сравнения весовых коэффициентов был использован следующий алгоритм:

Шаг 1. Преобразовать весовые коэффициенты (баллы), представленные в литературных источниках, в положительные весовые коэффициенты, удовлетворяющие условию $\sum_{i=1}^m p_i = 1$.

$$p_i = \frac{l_i}{\sum_{i=1}^m l_i},$$

где l_i – положительные весовые коэффициенты или баллы, представленные в литературе.

Шаг 2. Определить систему неравенств.

Сформировать линейную упорядоченную по убыванию последовательность весовых коэффициентов p_i . Задать уровень ошибки ϵ .

Для всех $i > j, i, j = 1 \dots m$:

Если $|p_i - p_j| \geq \epsilon$, то в систему неравенств включить $p_j > p_i$.

Шаг 3. Получить весовые коэффициенты p_i^* с помощью текстовой модели.

Шаг 4. Осуществить проверку соответствия полученным на шаге 2 неравенствам весовых коэффициентов p_i^* . Вычислить долю отклонений по формуле

$$d = \frac{N'}{N},$$

где d – доля отклонений; N' – число несоответствий коэффициентов неравенствам; N – общее число неравенств.

В табл. 1 представлены численные значения весовых коэффициентов из статьи [19], для получения которых были привлечены 10 экспертов в области организации строительства.

Выполним проверку соответствия весовых коэффициентов ChatGPT неравенствам $0,5 > 0,3; 0,5 > 0,2; 0,3 > 0,2$. Поскольку все неравенства выполняются, то $N' = 0$, следовательно, доля отклонений равна нулю.

Таблица 1

Значения весовых коэффициентов для оценки квалификации строительных рабочих

Критерий оценки квалификации	Весовой коэффициент по оценке экспертов	Весовой коэффициент ChatGPT-4o
Практические и теоретические знания	0,45	0,5
Стаж работы	0,35	0,3
Образование	0,2	0,2

Таким образом, упорядоченная последовательность коэффициентов: $p_1 = 0,45; p_2 = 0,35; p_3 = 0,2$.

С уровнем ошибки 0,05 будут сформированы неравенства $p_1 > p_2; p_1 > p_3; p_2 > p_3$.

Для получения оценок весовых коэффициентов с помощью ChatGPT-4o был использован следующий промпт: «Для оценки квалификации монтажника 2-го разряда используются следующие критерии: практические и теоретические знания, стаж работы, образование. Поставь цифровое значение от 0 до 1 каждому из трех критериев в зависимости от его влияния на оценку квалификации монтажника 2-го разряда. Сумма критериев должна быть равна 1».

Результаты приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены сведения об используемых тестовых наборах весовых коэффициентах. В табл. 3, 4 представлены доли отклонений экспертных оценок, полученных с помощью ChatGPT-o1 и GigaChat. Прочерком отмечены случаи, когда при данном уровне ошибки ни одно неравенство сформировано не будет.

Таблица 2

Описание тестовых наборов

Номер тестового набора	Признаки	Число весовых коэффициентов
1	Структурно-функциональные компоненты потенциально ненадежных действий летчика [20]	4
2	Показатели веб-сайтов [21]	6
3	Туристская привлекательность объектов сельского туризма [22]	3
4	Критерии компетентности экспертов [23]	5
5	Формы обслуживания потребителей [24]	4

Таблица 3

Доли отклонений при использовании ChatGPT-o1

Номер тестового набора	Доля отклонений			
	Уровень ошибки 0,01	Уровень ошибки 0,05	Уровень ошибки 0,1	Уровень ошибки 0,15
1	0	0	0	0
2	0,11	–	–	–
3	0,33	0,33	0	0
4	0,11	0	–	–
5	0	0	0	0

Таблица 4

Доли отклонений при использовании GigaChat

Номер тестового набора	Доля отклонений			
	Уровень ошибки 0,01	Уровень ошибки 0,05	Уровень ошибки 0,1	Уровень ошибки 0,15
1	0	0	0	0
2	0,11	–	–	–
3	0,67	0,67	0,5	0,5
4	0,56	0,5	–	–
5	0,17	0,17	0,2	0,25

На рис. 1 представлена средняя доля отклонений для каждой модели.

На рис. 2 показана гистограмма дисперсии средней доли отклонений для первого тестового набора данных при 10 переформулированиях запроса, который был представлен как в более краткой форме, так и в более подробной.

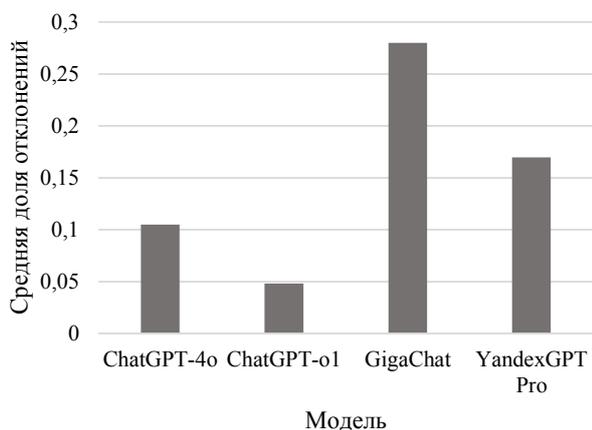


Рис. 1. Средняя доля отклонений

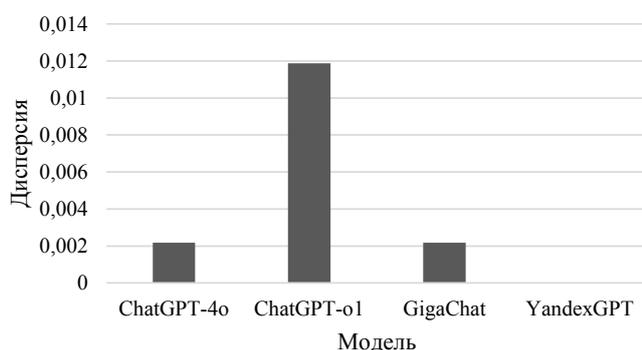


Рис. 2. Дисперсия средней доли отклонений

Кроме того, для моделей ChatGPT было рассмотрено формулирование запроса на английском языке. Согласно результатам, представленным на рис. 3, промпт на английском языке обеспечил меньшее значение средней доли отклонений.

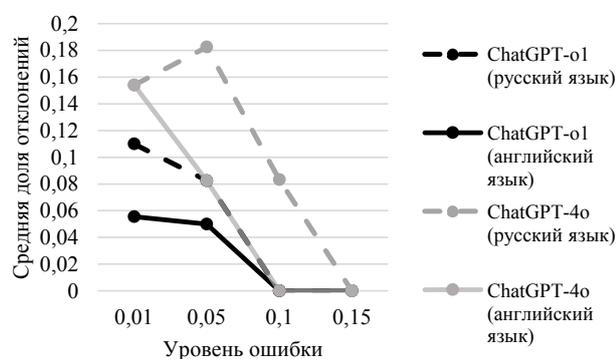


Рис. 3. Средняя доля отклонений при изменении языка запроса

Стоит отметить, что модели успешно справляются с ранжированием признаков со значительным отличием степени важности, однако могут генерировать разные значения для схожих по значимости признаков. Например, в [20] в качестве критериев оценки потенциальной ненадёжности действий летчика рассматриваются:

- профессиональное здоровье (вес 0,25);
- профессиональная подготовка (вес 0,4);
- условия жизни (вес 0,13);
- условия профессиональной деятельности (вес 0,22).

В некоторых экспериментах весовому коэффициенту профессионального здоровья было присвоено моделью более высокое значение, чем профессиональной подготовке, а условиям жизни – чем условиям деятельности, но во всех экспериментах профессиональное здоровье и профессиональная подготовка имели более высокое значение весового коэффициента по сравнению с условиями профессиональной деятельности и условиями жизни.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

По доле отклонений наилучшие результаты показала ChatGPT-o1, однако данная модель оказалась наиболее чувствительной к формату запроса и переформулированиям, что привело в итоге к самой большой дисперсии доли отклонений. Стоит также отметить, что указание контекста в ряде случаев приводит к уменьшению доли отклонений.

Так, все модели при оценке туристской привлекательности объектов сельского туризма указали, что эстетическая привлекательность является более важным показателем по сравнению с рекреационной привлекательностью. В то время как эксперты, привлекаемые к исследованию [22], посчитали рекреационную привлекательность более важной. Если к промпту добавить пояснение «Ты – человек, любящий активный отдых.», то рекреационная привлекательность будет отнесена к наиболее важному критерию и доля отклонений при использовании ChatGPT-o1 будет равна нулю.

Модели показали хорошие результаты в части ранжирования признаков, которые имеют значимые отличия. Вследствие этого при стабильном результате запроса весовые коэффициенты или их средние значения могут быть приняты для дальнейшего анализа.

В случае нестабильного результата для определения весовых коэффициентов может быть использован алгоритм формирования рандомизированных оценок комплексного показателя [1]. Данный алгоритм предполагает, что вероятность выполнения неравенства, отражающего соотношение между собой весовых коэффициентов, должна быть равна единице. Следовательно, в случае если неравенство не присутствует в разных результатах запроса, то такое неравенство исключается.

В результате будут использованы только те неравенства, которые фиксируют устойчивое отличие в важности весовых коэффициентов. Таким образом, алгоритм включает следующие шаги:

Шаг 1. Выполнить перезапуск запроса и для каждого варианта сформировать систему неравенств $P_j > P_i$. Неравенства могут быть как непосредственным результатом запроса, так и сформированы на основе полученных весовых коэффициентов.

В случае формирования неравенств осуществляется построение линейной упорядоченной по убыванию последовательности весовых коэффициентов p_i (ε – уровень ошибки).

Для всех $i > j, i, j = 1 \dots m$.

Если $|p_i - p_j| \geq \varepsilon$, то в систему неравенств включить $p_j > p_i$.

Шаг 2. Для каждого s -го неравенства вычислить долю запусков, в которых оно было установлено (вероятность его выполнения), v_s :

$$v_s = \frac{z^*}{z}$$

где z – общее количество запусков запроса; z^* – число запусков, в которых было установлено s -е неравенство.

Исключить неравенства, для которых доля v_s меньше 1.

Шаг 3. Использовать полученную систему неравенств для получения численных значений весовых коэффициентов.

В общем виде структуру промпта можно представить следующим образом (рис. 4):

1. Контекст, роль, данные: описание общего направления и специалиста, выполняющего оценку, а также имеющиеся данные, например финансовые показатели предприятия.

2. Действие, которое необходимо выполнить модели, например оценка важности.

3. Критерии и объект: названия и смысловая нагрузка критериев, для которых устанавливаются весовые коэффициенты важности и объекта.

4. Формат вывода: диапазон возможных значений, пример результата и т.д.



Рис. 4. Общая структура промпта

Для иллюстрации работы алгоритма рассмотрим критерии, представленные в [20], и модель ChatGPT-4o. В табл. 5 представлены значения вероятности исходя из 10 запросов (уровень ошибки равен 0,05). Следовательно, будет оставлено только 2–6 неравенств.

Таблица 5
Результат вычисления вероятности выполнения неравенства

Неравенство	Вероятность выполнения
$p_1 > p_2$	0,8
$p_1 > p_3$	1
$p_1 > p_4$	1
$p_2 > p_3$	1
$p_2 > p_4$	1
$p_3 > p_4$	1
$p_2 > p_1$	0,2

Для формирования значений весовых коэффициентов воспользуемся методом построения рандомизированных оценок с точностью 0,1. В этом случае возможны только две комбинации:

- 1) $p_1 = 0,3; p_2 = 0,4; p_3 = 0,2; p_4 = 0,1;$
- 2) $p_1 = 0,4; p_2 = 0,3; p_3 = 0,2; p_4 = 0,1.$

Вычислив среднее значение для каждого коэффициента, получим окончательный вариант: $p_1 = 0,35; p_2 = 0,35; p_3 = 0,2; p_4 = 0,1.$

При определении весовых коэффициентов следует иметь в виду, что использование моделей текстового генеративного искусственного интеллекта связано с рядом рисков: искажение или ошибки в ответах на запросы, а также вероятность получения устаревших данных. Кроме того, выходные данные могут быть недетерминированными. В этой связи необходим последующий анализ полученной информации.

Таким образом, текстовый генеративный искусственный интеллект может выступать в качестве вспомогательного инструмента при создании экспертных оценок с последующим анализом их обоснования и возможной корректировкой в ходе дискуссии. При этом ключевым аспектом является четкий и информативный промпт, содержащий всю необходимую информацию. Модели могут также выступать «вторым мнением», которое позволяет перепроверять информацию [25]. Кроме того, сгенерированная информация может являться отправной точкой во избежание «синдрома пустой страницы», когда начинать работу с некоторого готового каркаса проще, чем с самого начала.

Также были исследованы математические способности моделей в контексте генерации весовых коэффициентов методом их рандомизации, учитывающим установленные экспертами ограничения. Для этого был использован пример исходных данных, представленный в статье [1].

Промпт: «Имеется 9 показателей, которые принимают значения от 0,05 до 1: p_1-p_9 . Каждое значение показателя должно быть кратно 0,05 и не должно быть равно 0,00. Сумма показателей равна 1,00. Выполняются следующие неравенства: $p_3 > p_1; p_1 > p_2; p_6 > p_4; p_5 > p_4; p_2 > p_4; p_9 > p_8; p_9 > p_7$. Напиши численные значения комбинации показателей, чтобы неравенства были выполнены». GigaChat с данной задачей не справилась, результаты работы других моделей представлены в табл. 6.

Таблица 6
Результат работы моделей по генерации весовых коэффициентов

Переменная	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
CG-4o	0,2	0,1	0,25	0,05	0,15	0,2	0,05	0,05	0,1
CG-o1	0,15	0,1	0,25	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,15
Yandex GPT	0,1	0,05	0,15	0,05	0,1	0,2	0,05	0	0,3

Можно отметить, что наилучшие результаты показала модель ChatGPT-o1, при этом были сгенерированы разные значения весовых коэффициентов в каждом запуске. ChatGPT-4o сгенерировала коэффици-

енты с ошибкой: их сумма не равна 1. Весовые коэффициенты, сгенерированные Yandex GPT, принимают нулевые значения, что также не соответствует установленным ограничениям, а комбинации повторяются из запуска к запуску.

Решение оптимизационных задач с использованием весовых коэффициентов

Стоит отметить, что применение весовых коэффициентов относительной важности не ограничивается моделями формирования интегральных показателей, они могут быть использованы в других математических моделях. В частности, экспертные оценки могут быть интегрированы в оптимизационные модели, используемые для поддержки принятия решений. Рассмотрим модификацию моделей линейного и нелинейного программирования.

Задача линейного программирования

В задачах линейного программирования целевая функция и ограничения являются линейными.

$$g(x) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \rightarrow \max,$$

$$f_i(x) = w_i, \quad i = 1 \dots e,$$

$$r_j(x) \leq q_j, \quad j = 1 \dots u,$$

$$x_k \geq 0, \quad k = 1 \dots n,$$

где $g(x)$ – целевая функция; $f(x), r(x)$ – функции-ограничения; e – число ограничений-равенств; u – число ограничений-неравенств; n – число аргументов; x – искомые значения аргументов; a – числовые коэффициенты.

В этом случае выполняется преобразование целевой функции по следующему алгоритму:

Шаг 1. Формируется интегральный показатель, включающий коэффициенты целевой функции и весовые коэффициенты p .

Коэффициенты a целевой функции нормируются и приводятся к интервалу от 0 до 1. Так, при положительных значениях и предпочтительном максимальном значении аргументов формула будет иметь вид [26]

$$\tilde{a}_i = a_i / \max a_i .$$

Выполняется преобразование значений, чтобы их сумма была равна 1.

$$a_i^* = \frac{\tilde{a}_i}{\sum_{i=1}^m \tilde{a}_i} .$$

Формируется интегральный показатель

$$v_i = \mu a_i^* + (1 - \mu) p_i ,$$

где μ – весовой коэффициент от 0 до 1, чем меньше значение, тем в большей степени будет учтена экспертная информация.

Шаг 2. Строится новая целевая функция

$$g(x) = v_1x_1 + v_2x_2 + \dots + v_nx_n \rightarrow \max .$$

Далее решается полученная задача линейного программирования.

В качестве примера рассмотрим модель для определения способов продвижения образовательного продукта [27]

$$f(x) = x_1r_1 + x_2r_2 + x_3r_3 \rightarrow \max,$$

$$\sum_{i=1}^3 x_i = 1,$$

$$c1_i \leq x_i c \leq c1_2,$$

где x_i – доля средств, выделенных на i -метод продвижения продукта; c – общий бюджет затрат на методы $c1$ и $c2$ – нижняя и верхняя граница выделенных средств на каждый метод; r_i – рентабельность (прибыль с i -метода / затраты с i -метода) по результатам прошлого периода.

Исходные данные и результаты решения задачи при бюджете 350 000 на следующие 8 месяцев представлены в табл. 7.

Таблица 7

Исходные данные задачи

Метод	Рентабельность	Нижняя граница затрат, руб.	Верхняя граница затрат, руб.
SMM	1,907	80 000	110 000
SEO	1,274	120 000	140 000
SEA	1,121	120 000	140 000

Результат запроса к ChatGPT-4o свидетельствует о том, что SEO имеет долгосрочный эффект, что обеспечивает его более высокую значимость:

- SEO (вес 0,5): поисковая оптимизация часто рассматривается как наиболее эффективный метод, так как он позволяет привлечь органический трафик без постоянных затрат на рекламу. Хорошо оптимизированный сайт может долгое время занимать топовые позиции в поисковых системах.

- SMM (вес 0,3): маркетинг в социальных сетях позволяет непосредственно взаимодействовать с целевой аудиторией и строить лояльность к бренду. Это особенно важно для B2C-секторов, где визуальное восприятие имеет значение. Тем не менее его результаты могут быть менее предсказуемыми по сравнению с SEO.

- SEA (вес 0,2): реклама в поисковых системах обеспечивает быстрый, но часто более дорогой способ привлечения клиентов. Хотя она может быть очень эффективной для получения немедленных результатов, ее эффективность может зависеть от бюджета и конкуренции.

Результат решения задачи представлен в табл. 8 ($\mu = 0,5$). Таким образом, при использовании весовых коэффициентов была выполнена корректировка и для метода SEO был выделен больший бюджет.

Таблица 8

Решение задачи

Метод	Средства, выделенные на метод, руб.	
	Без использования весовых коэффициентов	С использованием весовых коэффициентов
SMM	110 000	90 000
SEO	120 000	140 000
SEA	120 000	120 000

Задача нелинейного программирования

Целевую функцию можно преобразовать к следующему виду:

$$c \rightarrow \min,$$

$$g(x) = c,$$

где c – минимальное значение целевой функции.

Возведем c в квадрат и добавим в целевую функцию регуляризацию искомым переменных с учетом весовых коэффициентов:

$$\lambda \sum_{k=1}^n p_k x_k^2 + (1-\lambda)c^2 \rightarrow \min,$$

$$g(x) = c,$$

$$f_i(x) = w_i, \quad i = 1..e,$$

$$r_j(x) \leq q_j, \quad j = 1..u,$$

$$x_k \geq 0, \quad k = 1..n,$$

где λ – множитель, который показывает, в какой степени будут учитываться весовые коэффициенты в модели (от 0 до 1).

Искомые значениями являются величины x и c . Величина c представляет собой наименьшее значение целевой функции.

Такое преобразование соответствует обратной одноточечной задаче по формированию показателя при минимизации суммы квадратов изменений аргументов [28, 29]. Решение задачи такого вида рассмотрено в [30].

Заключение

Статья посвящена исследованию проблемы повышения эффективности принятия решений с помощью генеративного текстового искусственного интеллекта. С использованием метода рандомизации оценок исследованы возможности существующих моделей (ChatGPT, GigaChat, YandexGPT) в части генерирования весовых коэффициентов относительной важности признаков. В результате сравнения с литературными данными было установлено, что модели способны эффективно классифицировать признаки по их степени важности. Однако в случаях, когда степень важности признаков незначительно различается, принятые решения могут оказаться неустойчивыми. Для оценки весовых коэффициентов в таком случае предложен алгоритм на основе формирования рандомизированных показателей. Кроме того, необходим последующий анализ полученных данных и их обоснования. Разработаны модификации моделей условной оптимизации с целью интеграции весовых коэффициентов относительной важности признаков, что позволяет корректировать полученное решение.

Литература

1. Тушавин В.А. Использование рандомизированных показателей для качественной оценки осуществимости ИТ-проектов // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер.: Экономика и экологический менеджмент» – 2014. – № 3. – С. 566–575.
2. Тушавин В.А. К вопросу об анализе рисков при оценивании комплексного показателя качества / В.А. Тушавин, Я.В. Тушавин, А.С. Тур // Компетентность. – 2024. – № 6. – С. 51–55.
3. Рожков Н.Н. Рандомизированный критерий сравнения качества сложных объектов // Экономика и математические методы. – 1991. – № 3. – С. 597–600.

4. Muhammad S.K. ChatGPT in finance: Applications, challenges, and solutions / S.K. Muhammad, U. Hamza // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, No. 2. – P. 1–8.
5. Integrating generative AI in management education: A mixed-methods study using social construction of technology theory / P. Gupta, R. Mahajan, U. Badhera, P.S. Kushwaha // The International Journal of Management Education. – 2024. – Vol. 22, No. 3. – P. 101017.
6. Rudolph J. ChatGPT: Bullshit spewer or the end of traditional assessments in higher education? / J. Rudolph, S. Tan, S. Tan // Journal of Applied Learning & Teaching. – 2023. – Vol. 6, No. 2. – P. 342–360.
7. The ChatGPT bot is causing panic now – but it'll soon be as mundane a tool as Excel: analysing topics, sentiment and emotions relating to ChatGPT on Twitter / D. Heaton, J. Clos, E. Nichele, J. Fisher // Personal and Ubiquitous Computing. – 2024. – P. 1–20.
8. Dowling M. ChatGPT for (Finance) research: The Bananarama Conjecture / M. Dowling, B. Lucey // Finance Research Letters. – 2023. – Vol. 53. – P. 103662.
9. Gautier M. From Data to Trade: A Machine Learning Approach to Quantitative Trading [Электронный ресурс]. – Режим доступа: dx.doi.org/10.2139/ssrn.4315362, свободный (дата обращения: 24.10.2024).
10. Niszczoła P. The credibility of dietary advice formulated by ChatGPT: Robo-diets for people with food allergies / P. Niszczoła, I. Rybicka // Nutrition. – 2023. – Vol. 112. – P. 112076.
11. Ray P.P. Re: The credibility of dietary advice formulated by ChatGPT: Robo-diets for people with food allergies? // Nutrition. – 2024. – Vol. 118. – P. 112285.
12. Lo A.W. From ELIZA to ChatGPT: The Evolution of Natural Language Processing and Financial Applications ChatGPT / A.W. Lo, S. Manish, // The Journal of Portfolio Management. – 2023. – Vol. 49, No. 7. – P. 201–235.
13. Niszczoła P. GPT has become financially literate: Insights from financial literacy tests of GPT and a preliminary test of how people use it as a source of advice / P. Niszczoła, S. Abbas // Finance Research Letters. – 2023. – Vol. 58. – P. 104333.
14. Oehler A. Does ChatGPT provide better advice than robo-advisors? / A. Oehler, H. Matthias // Finance Research Letters. – 2024. – Vol. 60. – P. 104898.
15. Transforming sentiment analysis in the financial domain with ChatGPT / G. Fatouros, J. Soldatos, K. Kouroumalis, G. Makridis, D. Kyriazis, M. Horn, S. Abbas, M. Singh // Machine Learning with Applications. – 2023. – Vol. 14. – P. 100508.
16. Pelster M. Can ChatGPT assist in picking stocks? / M. Pelster, J. Val // Finance Research Letters. – 2024. – Vol. 59. – P. 104786.
17. Kim J.K. What if ChatGPT were a quant asset manager // Finance Research Letters. – 2023. – Vol. 58. – P. 104580.
18. Ko H. Can ChatGPT improve investment decisions? From a portfolio management perspective / H. Ko, J. Lee // Finance Research Letters. – 2024. – Vol. 64. – P. 105433.
19. Романович М.А. Интегральная оценка рейтинга квалификации строительных рабочих / М.А. Романович, Т.Л. Симанкина, Д.П. Ильченко // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 5. – С. 49–53.
20. Методика оценивания потенциальной ненадежности действий летчика / Д.А. Никифоров, А.А. Ворона, А.В. Богомолов, Ю.А. Кукушкин // Безопасность жизнедеятельности. – 2015 – № 7. – С. 7–14.
21. Киреенко В.П. Рейтинг веб-сайтов крупнейших ризлтерских организаций Республики Беларусь / В.П. Киреенко, Т.В. Борздова // Инновационное развитие эконо-

мики: предпринимательство, образование, наука: сборник научных статей. – Минск: ГИУСТ БГУ, 2015. – С. 164–167.

22. Богомазова И.В. Оценка привлекательности объектов сельского туризма региона на основе метода анализа иерархии // Современные проблемы сервиса и туризма. – 2011. – № 2. – С. 50–57.

23. Петриченко Г.С. Методика оценки компетентности экспертов / Г.С. Петриченко, В.Г. Петриченко // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 109. – С. 1–12.

24. Крапива Т.В. Анализ факторов, влияющих на выбор ресторана в г. Кемерово / Т.В. Крапива, Н.И. Давыденко // Новая наука: от идеи к результату: труды междунар. науч.-практ. конф. – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2012. – Ч. 1. – С. 184–187.

25. ChatGPT for digital forensic investigation: The good, the bad, and the unknown / M. Scanlon, F. Breitingner, C. Hargreaves, J. Hilgert, J. Sheppard // Forensic Science International: Digital Investigation. – 2023. – Vol. 46. – P. 301609.

26. Грибанова Е.Б. Информационная система рейтинговой оценки объектов экономики / Е.Б. Грибанова, А.Н. Алимханова, П.Э. Тугар-оол // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 51–55.

27. Котовщикова Л.Ю. Выбор методов продвижения на основе ABC-анализа и решения оптимизационной задачи целочисленного программирования // Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий: сборник науч. статей. – М.: ООО «Конверт», 2020. – Ч. 1. – С. 60–62.

28. Griбанова Е.В. Development of iterative algorithms for solving the inverse problem using inverse calculations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 4, No. 3. – P. 27–34.

29. Грибанова Е.Б. Методы решения обратных задач экономического анализа с помощью минимизации приращений аргументов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 95–99.

30. Griбанова Е.В. Development of a price optimization algorithm using inverse calculations // Eastern-European journal of Enterprise technologies. – 2019. – Vol. 5, No. 4. – P. 18–25.

Грибанова Екатерина Борисовна

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-6499-5893
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: ekaterina.b.gribanova@tusur.ru

Леонов Дмитрий Викторович

Аспирант каф. АСУ ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: Invdmityr@outlook.com

Griбанова Е.В., Leonov D.V.

Development of conditional optimization models taking into account weighting factors of relative importance

The article examines the possibilities of generative textual artificial intelligence to determine the weighting coefficients of the relative importance of features. For the first time, the modification of conditional optimization models was performed in order

to take into account the weighting coefficients of relative importance obtained on the basis of the randomization model.

Keywords: text generative artificial intelligence, weighting factors, optimization model, conditional optimization, ChatGPT.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-100-108

References

1. Tushavin V.A. [The use of randomized indicators for qualitative assessment of the feasibility of IT projects]. *Scientific Journal of the ITMO Research Institute. The series Economics and Environmental Management*, 2014, no. 3, pp. 566–575 (in Russ.).

2. Tushavin V.A., Tushavin Ja.V., Tur A.S. [On the issue of risk analysis in assessing a comprehensive quality indicator]. *Competency*, 2024, no. 6, pp. 51–55 (in Russ.).

3. Rozhkov N.N. [A randomized criterion for comparing the quality of complex objects]. *Economics and Mathematical Methods*, 1991, no. 3, pp. 597–600 (in Russ.).

4. Muhammad S.K., Hamza U. ChatGPT in finance: Applications, challenges, and solutions. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 2, pp. 1–8.

5. Gupta P., Mahajan R., Badhera U., Kushwaha P.S. Integrating generative AI in management education: A mixed-methods study using social construction of technology theory. *The International Journal of Management Education*, 2024, vol. 22, no. 3, p. 101017.

6. Rudolph J., Tan S. ChatGPT: Bullshit spewer or the end of traditional assessments in higher education? *Journal of Applied Learning & Teaching*, 2023, vol. 6, no. 2, pp. 342–360.

7. Heaton D., Clos J., Nichele E., J. Fisher J. The ChatGPT bot is causing panic now – but it'll soon be as mundane a tool as Excel: analysing topics, sentiment and emotions relating to ChatGPT on Twitter. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2024, pp. 1–20.

8. Dowling M., Lucey B. ChatGPT for (Finance) research: The Bananarama Conjecture. *Finance Research Letters*, 2023, vol. 53, p. 103662.

9. Gautier M. From Data to Trade: A Machine Learning Approach to Quantitative Trading. Available at: dx.doi.org/10.2139/ssrn.4315362 (Accessed: October 24, 2024).

10. Niszczota P., Rybicka I. The credibility of dietary advice formulated by ChatGPT: Robo-diets for people with food allergies. *Nutrition*, 2023, vol. 112, p. 112076.

11. Ray P.P. Re: "The credibility of dietary advice formulated by ChatGPT: Robo-diets for people with food allergies?" *Nutrition*, 2024, vol. 118, p. 112285.

12. Lo A.W., Manish S. From ELIZA to ChatGPT: The Evolution of Natural Language Processing and Financial Applications ChatGPT. *The Journal of Portfolio Management*, 2023, vol. 49, no. 7, pp. 201–235.

13. Niszczota P., Abbas S. GPT has become financially literate: Insights from financial literacy tests of GPT and a preliminary test of how people use it as a source of advice. *Finance Research Letters*, 2023, vol. 58, p. 104333.

14. Oehler A., Matthias H. Does ChatGPT provide better advice than robo-advisors? *Finance Research Letters*, 2024, vol. 60, p. 104898.

15. Fatouros G., Soldatos J., Kouroumalis K., Makridakis G., Kyriazis D., Horn M., Abbas S., Singh M. Transforming sentiment analysis in the financial domain with ChatGPT. *Machine Learning with Applications*, 2023, vol. 14, p. 100508.

16. Pelster M., Val J. Can ChatGPT assist in picking stocks? *Finance Research Letters*, 2024, vol. 59, 104786.

17. Kim J.K. What if ChatGPT were a quant asset manager. *Finance Research Letters*, 2023, vol. 58, 104580.

18. Ko H., Lee J. Can ChatGPT improve investment decisions? From a portfolio management perspective. *Finance Research Letters*, 2024, vol. 64, p. 105433.

19. Romanovich M.A., Simankina T.L., Il'chenko D.P. [Integral assessment of the qualification rating of construction workers]. *Industrial and Civil Engineering*, 2015, no. 5, pp. 49–53 (in Russ.).

20. Nikiforov D.A., Vorona A.A., Bogomolov A.V., Kuskushkin Ju.A. [Methodology for assessing the potential unreliability of the pilot's actions]. *Life Safety*, 2015, no. 7, pp. 7–14 (in Russ.).

21. Kireenko V.P., Borzdova T.V. *Rejting veb-sajtov krupnejshih rijel'terskih organizacij respubliky Belarus'* [Rating of websites of the largest real estate organizations in the Republic of Belarus]. *Innovacionnoe razvitie jekonomiki: predprinimatel'stvo, obrazovanie, nauka: sbornik nauchnyh statej [Innovative Economic Development: Entrepreneurship, Education, Science]*. Collection of scientific articles]. Minsk, GIUST BSU Publ., 2015, pp. 164–167 (in Russ.).

22. Bogomazova I.V. [Assessment of the attractiveness of rural tourism facilities in the region based on the hierarchy analysis method]. *Modern Problems of Service and Tourism*, 2011, no. 2, pp. 50–57 (in Russ.).

23. Petrichenko G.S., Petrichenko V.G. [Methodology for assessing the competence of experts]. *Методика оценки компетентности экспертов. KubGAU Scientific Journal*, 2015, no. 109, pp. 1–12 (in Russ.).

24. Krapiva T.V., Davydenko N.I. *Analiz faktorov, vlijajushhikh na vybor restorana v g. Kemerovo* [Analysis of the factors influencing the choice of a restaurant in Kemerovo]. *Novaja nauka: ot idei k rezul'tatu: trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [New Science: from Idea to Result]*. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Sterlitamak, RIC AMI Publ., 2012, Part. 1, pp. 184–187 (in Russ.).

25. Scanlon M., Breitinger F., Har-greaves C., Hilgert J., Sheppard J. ChatGPT for digital forensic investigation: The good, the bad, and the unknown. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 2023, vol. 46, p. 301609.

26. Gribanova E. B. [Information system for ranking evaluation of economic entities]. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 51–55 (in Russ.).

27. Kotovshhikova L.Ju. *Vybor metodov prodvizhenija na osnove AVS-analiza i reshenija optimizacionnoj zadachi celochislennogo programmirovaniya* [The choice of promotion methods based on ABC analysis and solving the optimization problem of integer programming]. *Global'naja jekonomika v XXI veke: rol' biotekhnologij i cifrovyh tehnologij. Sbornik nauchnyh statej [The Global Economy in the 21st Century: the Role of Biotechnology and Digital Technologies]*. Collection of scientific articles]. Moscow, «Konvert» Publ., 2020, Part. 1, pp. 60–62 (in Russ.).

28. Gribanova, E. B. Development of iterative algorithms for solving the inverse problem using inverse calculations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 27–34.

29. Gribanova E. B. [Methods for solving inverse problems of economic analysis by minimizing argument increments]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 95–99 (in Russ.).

30. Gribanova E.B. Development of a price optimization algorithm using inverse calculations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 18–25.

Ekaterina B. Gribanova

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Automated Control System (ACS),
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-6499-5893
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: ekaterina.b.gribanova@tusur.ru

Dmitry V. Leonov

Postgraduate student, Department of ACS TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: lndmitry@outlook.com

УДК 004.91

А.М. Кузнецов

Информационная технология автоматизации социологических исследований: методы, технологии и преимущества

Проанализирована разработка информационно-аналитической системы (ИАС) для социологических исследований. Рассмотрены существующие программные решения для сбора, обработки и анализа данных, их преимущества и ограничения. Предложена интеграция различных функций в одной системе для обеспечения комплексного подхода к исследованиям, включая проактивное прогнозирование и анализ. Разработанная ИАС предоставляет широкие возможности для автоматизации ключевых этапов социологических исследований, улучшения качества данных и повышения точности аналитики. Интеграция онтологий в структуру ИАС позволила стандартизировать термины и понятия, установить семантические связи между ними, что уменьшило вероятность ошибок и сократило время на подготовку информации к ретроспективному анализу (сокращение времени на 20%), повысило качество аналитических выводов за счет более глубокой и комплексной обработки данных.

Ключевые слова: информационная технология, архитектура системы, социологические исследования, онтология, прогнозирование, система обработки данных (СОД), система поддержки принятия решений (СППР).

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-109-117

Глобальный рынок программного обеспечения для сбора данных (Data Collection Software Market) является одним из наиболее динамично развивающихся рынков в сфере информационных технологий. Согласно отчету компании GlobalData PLC (Великобритания), ожидается, что глобальный рынок программного обеспечения для сбора данных будет расти значительными темпами в течение прогнозируемого периода, с 2023 по 2031 г. [1]. По прогнозу компании Fact.MR (Дубай), объем мирового рынка сбора данных и их маркировки составит 2,57 млрд долл. США в 2024 г., а среднегодовой темп роста составит 18%. Таким образом, к концу 2034 г. объем этого рынка может увеличиться до 13,45 млрд долл. США [2]. Предполагается, что инструменты для сбора, обработки и анализа данных будут играть решающую роль в планировании и осуществлении цифровой

трансформации бизнес-процессов в ближайшее десятилетие. Поэтому разработка проактивной информационно-аналитической системы (ИАС) для социологических исследований является актуальной задачей.

Анализ известных ИАС для социологических исследований и их сравнительные характеристики

В эпоху больших данных информационно-аналитические системы (ИАС) становятся ключевым инструментом для социологических исследований. Правильный выбор ИАС определяет глубину анализа и то, как результаты будут представлены.

Разнообразии программ и инструментов требует четкой классификации, включающей цели исследования, тип данных, функциональность и уровень анализа (рис. 1).



Рис. 1. Классы ИАС социологических исследований по типам задач

На основе этой классификации разработана сравнительная таблица различных инструментов для сбора, анализа и визуализации результатов социологических исследований (табл. 1).

Анализ специализированных программных решений показал их ограниченную эффективность для

комплексного сопровождения социологических исследований. Методологические проблемы, такие как выбор подхода, качество и объем выборки, а также точность формулировок, часто приводят к значительным расхождениям в результатах исследований с аналогичными условиями. Это становится особенно важным при

сопровождении избирательных процессов, где социологические данные могут существенно влиять на стратегии избирательных кампаний и выбор избирателей. Ограниченная функциональная специализация про-

граммного обеспечения, сосредоточенная либо на аналитических задачах, либо на предварительной обработке данных, представляет собой значительную проблему, требующую интегрированного решения.

Таблица 1

Анализ программного обеспечения для социологических исследований

Категория	ПО (примеры)	Основные недостатки	Источники
Статистические пакеты	IBM SPSS Statistics, Stata	Высокая стоимость, ограниченная гибкость, недостаточная поддержка современных методов анализа	IBM SPSS, [3–5]. Stata, [6, 7]
Среды программирования для анализа данных	Python, R	Требуют глубоких знаний программирования, сложны для новичков, недостаток интегрированных инструментов для специфических задач социологических исследований	Python, [8–10]. R Project, [6, 11]
ПО для качественного анализа	NVivo, MaxQDA, TextAnalyst, PolyAnalyst	Высокая стоимость, сложность в освоении, ограниченные возможности интеграции с количественными данными, отсутствие комплексности	NVivo, [12, 13]. MaxQDA, [12, 14, 15]. TextAnalyst, [12, 16]. PolyAnalyst [12, 17]
Платформы Big Data	Apache Hadoop, Apache Spark, RapidMiner, Elasticsearch	Требуют значительных технических компетенций для настройки и использования. Ограниченно применимы для социологических исследований. Возникают сложности в управлении и практическом применении исследователями-социологами	Hadoop, [18, 19]. Spark, [16, 19, 20]. RapidMiner, [21, 22]. Elasticsearch, [19, 23]
Системы Business Intelligence	Microsoft Power BI, SAS Business Intelligence, Tableau, Форсайт, Polymatica	Высокая стоимость, ограниченные возможности настройки под специфические требования социологических исследований, недостаточная поддержка неструктурированных данных и интеграции с другими системами	Power BI, [24, 25]. SAS, [26, 27]. Tableau, [6]. Форсайт, [25, 28]. Polymatica, [25]
ПО для сбора данных	Google Forms, SurveyMonkey, Qualtrics, REDCap, Анкетолог	Ограничения возможности настройки аналитических функций, недостаток интеграции с инструментами для анализа больших объемов данных, недостаточная поддержка пользовательских интерфейсов	Google Forms, [29, 30]. SurveyMonkey, [31]. Qualtrics, [32]. REDCap, [33]. Анкетолог, [21]
Проактивные и предиктивные системы	TensorFlow, IBM Watson, Scikit-learn, Apache Mahout, RecommenderLab	Трудности в изучении, высокие требования к ресурсам, недостаточная поддержка узкоспециализированных задач, высокая стоимость, необходимость в постоянном интернет-соединении для работы с облачными системами	TensorFlow, IBM Watson, Scikit-learn, [6, 12, 27]

Архитектура ИАС

Этапы анализа данных в рамках использования информационно-аналитической системы (ИАС) охватывают следующие процедуры: определение исследовательских целей и задач, разработка структурированных анкет и отбор соответствующих респондентов, организация подготовки анкетных материалов, реализация процесса анкетирования с применением разнообразных методик, первоначальная обработка и анализ собранных данных. На заключительном этапе происходит выработка прогнозов относительно тенденций развития событий или изменений в общественных настроениях.

На первом этапе происходит разработка анкет, подготовка интервью и других инструментов сбора информации. Второй этап – анкетирование респондентов – проводится разнообразными методами (по месту проживания, на предприятиях, на улице, через почту, мобильные устройства и др.). Третий этап включает подготовительную работу с собранной информацией и её первичную обработку, что ранее осуществлялось вручную, а в рамках ИАС автоматизировано для обеспечения точного отображения процентного распределения изучаемых групп. На четвертом этапе проводится анализ данных, который может варьироваться от создания базовых графиков и диа-

грамм до комплексного изучения распределений ответов респондентов. В ИАС реализован компонент для оптимизации выбора аналитических методов разведочного анализа данных. На пятом этапе социолог-исследователь осуществляет теоретическую интерпретацию полученных данных, формулирует заключение и прогнозирует тенденции на основе проведённого анализа [34–36].

Разработанная архитектура ИАС предоставляет комплексное решение для проведения опросов с использованием различных методов сбора и обработки данных, обеспечивая эффективность и надежность процесса последующего исследования и прогнозирования [37, 38]. ИАС состоит из нескольких подсистем, каждая из которых решает свой подкласс задач и является логически изолированной и самостоятельной компонентой. Архитектура ИАС показана на рис. 2.

Основная цель создания информационно-аналитической системы (ИАС) социологических исследований заключается в обеспечении комплексного процесса сбора, обработки, анализа и толкования социологической информации, что, в свою очередь, помогает в выработке и принятии обоснованных управленческих решений.

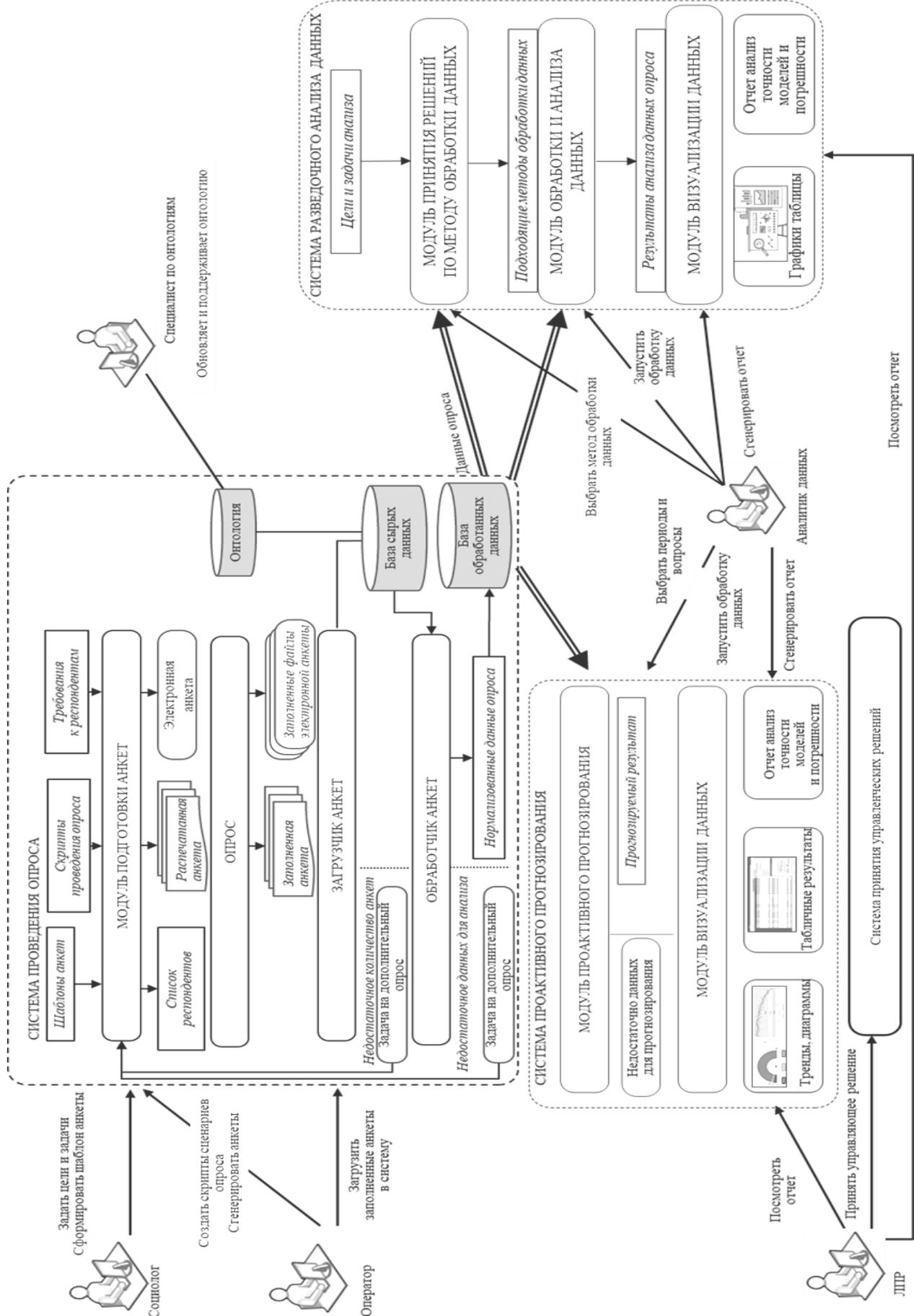


Рис. 2. Архитектура ИАС социологических исследований

ИАС позволяет автоматизировать и оптимизировать большинство этапов социологических исследований, увеличить эффективность и скорость обработки данных, а также улучшить точность предсказаний и рекомендаций для разработки стратегий развития и решения социальных вопросов.

ИАС социологических исследований состоит из следующих подсистем:

- подсистема проведения опроса (модуль подготовки анкет, загрузчик анкет, обработчик анкет);
- подсистема хранения (онтология, реляционная БД и база сырых данных);
- подсистема разведочного анализа данных (модуль принятия решений по методу обработки данных, модуль обработки и анализа данных, модуль визуализации данных);
- подсистема проактивного прогнозирования (модуль проактивного прогнозирования и модель визуализации данных);
- подсистема принятия управленческих решений.

В процессе функционирования системы основное внимание уделяется не только результативности процессов сбора и анализа данных, но и обеспечению высокого качества, надежного хранения и защиты приватных данных.

На стадии обработки и анализа данных ключевую роль играет подсистема выбора метода обработки, позволяющая аналитику данных выбрать наиболее подходящие под заданные исследовательские вопросы методы статистического анализа. Адаптивность системы к разнообразию задач позволяет использовать широкий спектр статистических и аналитических моделей, что делает возможным проведение как разведочного, так и предиктивного анализа. Разведочный и предиктивный анализы данных позволяют выявить основные тенденции и закономерности, а также сформировать прогнозы на будущее, на основании которых принимаются управленческие решения.

Важную роль в повышении эффективности работы ИАС социологических исследований играет интеграция онтологий, обеспечивающая более точный поиск и анализ данных за счет структурирования и классификации информации. Специалист по онтологиям регулярно обновляет и расширяет онтологическую базу, адаптируя её под текущие задачи исследования. Онтологии помогают обеспечить семантическую согласованность данных, что критически важно для точности аналитических выводов. Организация данных с помощью онтологий значительно улучшает возможности поиска необходимой информации и взаимосвязи между различными данными, что существенно повышает эффективность аналитического процесса. Разработана базовая онтология социологических исследований применительно к Тамбовской области и постоянно пополняется в течение последних пяти лет.

Онтология в ИАС обеспечивает семантическую согласованность данных, что особенно важно для поиска и выборки данных в файловом хранилище результатов опросов, где сохранялись необработанные

анкеты начиная с 2014 г. В этих анкетах использовались разные термины для обозначения одного и того же понятия (например, «дистанционная работа», «удаленная работа», «работа из дома»), а также нестандартизированные значения (например, возраст мог быть записан как числовое значение «25–30 лет» или категориальные данные «молодые специалисты»). Онтология позволила стандартизировать термины и понятия и установить семантические связи между ними, что уменьшило вероятность ошибок и сократило время на обработку. Благодаря этому исследователи могут объединять и анализировать данные из различных источников и периодов, даже если первоначально они были структурированы по-разному. В результате время, затрачиваемое на подготовку информации к ретроспективному анализу, сократилось на 20%, что ускоряет общий процесс исследования.

В ИАС применяется гибридная структура хранения данных социологических исследований, сочетающая реляционную базу данных и файловое хранилище, которая создает условия для эффективного сбора, хранения и анализа различных типов данных, что позволяет обеспечивать необходимую гибкость при их обработке и анализе.

Применение автоматизированных инструментов обработки данных позволяет значительно снизить процент ошибок (до 0,5%) за счёт исключения человеческого фактора на этапе первичной обработки анкет. Затраты на обслуживание снизились на 8,5%, подтверждая достижение целей по комплексному обеспечению автоматизации всех этапов процесса проведения и обработки социологических опросов.

Использование специализированного модуля для автоматического выбора методов обработки данных повышает качество анализа.

Информационная технология сопровождения социологического исследования

Как показал анализ программного обеспечения для социологических исследований (см. табл.1), на протяжении многих лет в социологических исследованиях для обработки данных широко использовались зарубежные программные продукты, такие как SPSS, Excel, Stata, NVivo, MaxQDA, Tableau и IBM Watson. Несмотря на их широкие аналитические возможности, они имеют ряд ограничений, таких как высокая стоимость, сложность настройки под специфические задачи и зависимость от зарубежных серверов и обновлений. В условиях экономических и политических санкций возникает необходимость разработки отечественных решений, способных не только предложить аналогичный функционал, но и обеспечивать безопасность данных и независимость от внешних поставщиков [39, 40].

Предложенная в данной работе информационно-аналитическая система (ИАС) позволяет решить эти проблемы за счёт интеграции всех этапов социологических исследований в единую структуру, начиная с этапа проектирования анкет и заканчивая анализом и прогнозированием. ИАС разработана с целью полного сопровождения социологических исследований

с минимальными затратами и высокой надёжностью, что делает её актуальным инструментом в современных условиях.

Ранее специализированные программные продукты применялись преимущественно на первом, третьем и частично на четвертом этапах социологических исследований. Их функциональность включала возможности распечатки анкет, ввода данных с опросных листов и простейший подсчет распределенных ответов на вопросы. Разработанная ИАС значительно расширяет сферу применения методов цифро-

визации при проведении социологических опросов. Применение этой системы позволяет социологам на подготовительном этапе анализа предмета исследования получать доступ к существующим данным, их распределениям и выявленным зависимостям, осуществляя вторичный анализ данных с использованием онтологий.

Сопоставление функциональности компонентов разработанной ИАС социологических исследований и этапов проведения социологических исследований представлено на рис. 3.

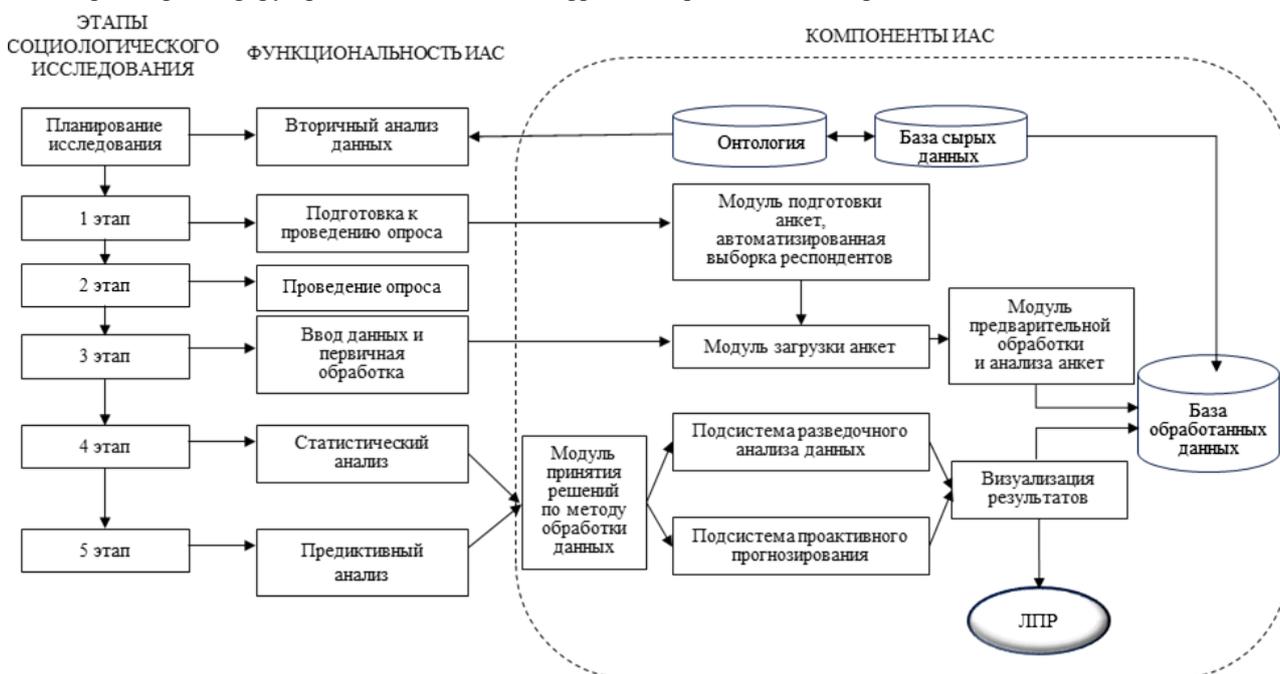


Рис. 3. Информационная технология сопровождения ИАС на этапах социологического исследования

Предлагаемая информационная технология проведения социологического исследования включает применение модулей ИАС практически на всех этапах социологического исследования, не связанных с непосредственным опросом респондентов.

Необходимо отметить, что ИАС для проведения социологических опросов должны обладать свойствами как систем поддержки принятия решений (СППР), так и систем обработки данных (СОД). В связи с этим информационная технология использования ИАС имеет двойной характер.

Для систем обработки данных (СОД) характерна начальная стадия ввода и обработки результатов социологических опросов. Эффективность этих процессов в ИАС значительно возросла благодаря внедрению дополнительных функций, которые повышают точность и скорость обработки социологической информации:

- поиск информации на основе онтологических запросов в хранилищах необработанных данных социологических исследований;
- автоматизированный ввод первичной информации с анкетных листов в ИАС (компонент «Загрузчик анкет»);
- предварительная обработка и загрузка данных в реляционную базу данных (компонент «Обработчик анкет»);

- применение инструментов подсистемы разведочного анализа данных для контроля критических параметров выборки, выбора метода обработки данных и построения распределений.

В процессе аналитических исследований реализуются важные функциональные возможности, которые необходимы специалистам в области социологии для анализа и толкования полученных результатов и прогнозирования будущих тенденций. Эти возможности являются характеристиками систем поддержки принятия решений (СППР) и включают следующее:

- поиск необходимой информации социологом-исследователем осуществляется через онтологические запросы к базам данных, содержащим как исходные данные предыдущих опросов, так и обработанную информацию;
- онтологии формализуют описание исследуемых объектов и процессов, обеспечивая единый формат данных, что улучшает взаимодействие между системами и качество аналитики, позволяя проводить более точные и комплексные исследования;
- фреймворк для модуля прогнозирования в ИАС позволяет интегрировать различные методологические подходы и аналитические инструменты для обработки и анализа социологических данных.

Можно утверждать, что разработанная ИАС социологических исследований обеспечивает ком-

плексный подход, интегрируя функции ввода, обработки и анализа данных. Это не только способствует повышению точности и надежности исследований, но и расширяет возможности для глубокой аналитики и прогнозирования. Благодаря использованию онтологий становится возможным проведение более точных и комплексных исследований, так как они позволяют учитывать и анализировать широкий спектр данных, структурированных по единому принципу.

Результаты опытной эксплуатации ИАС

В рамках опытной эксплуатации ИАС для социологических исследований была проведена апробация на базе нескольких реальных социологических опросов. Цель – оценить эффективность системы по ряду эксплуатационных показателей (скорость обработки запросов, точность прогнозов, уровень автоматизации и экономия затрат на обслуживание). В ходе апробации были собраны данные, подтверждающие, что предложенная ИАС значительно улучшает исследовательский процесс за счёт интеграции всех этапов исследования – от сбора данных до прогностического анализа.

Для прогнозирования результатов выборов различных уровней в Тамбовской области использовались данные ежеквартальных опросов с выборкой в 1 000 человек за период с 2017 по 2023 г. Часть этих данных была использована в качестве обучающей выборки для построения модели, а оставшиеся данные были выделены как тестовая выборка для проверки точности прогнозов. Модель SARIMAX была выбрана из-за её способности учитывать сезонные колебания и тренды. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) составила 3,61%, что является приемлемым результатом для моделей временных рядов и подтверждает пригодность модели для прогнозирования социологических показателей данного типа.

Экспериментальная апробация ИАС социологических исследований показала высокую производительность (обработка 650–700 запросов в минуту со средним временем ответа 1–3 с).

Основные результаты опытной эксплуатации представлены в табл. 2.

Заключение

Разработка информационно-аналитической системы (ИАС) для социологических исследований в условиях санкционного давления предоставляет отечественным социологам инструмент, который не только полностью удовлетворяет потребности в анализе данных, но и обеспечивает независимость и безопасность информационных процессов. В отличие от существующих программных продуктов, сосредоточенных на отдельных аспектах исследования, предложенная ИАС интегрирует все этапы – от создания анкет до прогностического анализа. Это позволяет не только повысить точность и надежность данных, но и обеспечить более глубокий и всесторонний анализ. Использование онтологий в ИАС обеспечивает семантическую согласованность и структурированность данных, что важно для точности анализа и прогноза. Онтологии упрощают поиск и интерпретацию информации, а также способствуют улучшению взаимодействия между различными подсистемами.

Это позволяет не только ускорить процесс анализа, но и повысить качество выводов за счёт более точной интерпретации данных.

Таблица 2

Результаты опытной эксплуатации ИАС

Критерий	Традиционные методы	ИАС	Преимущество ИАС
Время обработки данных	10–12 ч	1–2 ч	Сокращение времени обработки на 80%
Процент ошибок при обработке анкет	2–7%	Менее 0,5%	Снижение ошибок за счет автоматизации
Точность прогнозов	75–85%	90–95%	Увеличение точности прогнозов (применение моделей SARIMAX и LSTM)
Интеграция этапов исследования	Отсутствует	Полная интеграция	Полный цикл исследований в одной системе
Использование онтологий	Нет	Да	Повышение согласованности и точности данных, сокращение времени на поиск релевантной информации на 20%
Стоимость внедрения	Высокая (различные решения на каждом этапе)	Средняя (единое решение)	Снижение затрат на 8,5% за счет комплексного решения на всех этапах
Время подготовки отчета	5–7 дней	1 день	Ускорение подготовки отчета

Опытная эксплуатация ИАС показала, что её применение позволяет сократить время обработки данных на 80%, снизить процент ошибок на менее 0,5%, увеличить точность прогнозирования до 10%, а также уменьшить затраты на обслуживание на 8,5%. Таким образом, информационная технология социологических исследований на основе ИАС обеспечивает высокую эффективность и скорость обработки социологической информации, а также позволяет усовершенствовать исследовательский процесс.

Литература

1. Data Collection and Labelling Market Size, Share, Trends and Analysis by Region, Type, Vertical, and Segment Forecast to 2030 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.globaldata.com/store/report/data-collection-and-labelling-market-analysis>, свободный (дата обращения: 30.07.2024).
2. Data Collection and Labeling Market [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.factmr.com/report/4726/data-collection-and-labelling-market>, свободный (дата обращения: 31.07.2024).
3. Обзор перечня и особенностей программного обеспечения, применяемого для статистической обработки данных при выполнении экспертной работы / К.А. Кошечкин, А.В. Козлов, В.Н. Котиков, А.Н. Миронов // Ведомости научного центра экспертизы средств медицинского применения. – 2014. – № 3. – С. 46–51.

4. Андреева А.А. Возможности использования профессионального статистического пакета для социальных наук SPSS Statistics для анализа и обработки данных исследования общественного мнения // Теория и практика современной науки. – 2020. – № 1(67). – С. 30–43.
5. Орестова В.Р., Бастрон А.А. Применение статистического пакета анализа данных SPSS Statistics в психологических исследованиях на примере факторного анализа // История и архивы. – 2017. – № 2(8). – С. 38–51.
6. Демаков В.И. Сравнительный обзор статистических пакетов для анализа данных / В.И. Демаков, Е.Ю. Ларионова, Ю.Э. Голодков, В.И. Рерке // Вестник БГУ. Математика, информатика. – 2023. – № 3. – С. 78–89.
7. Унгуряну Т.Н. Однофакторный дисперсионный анализ с использованием пакета статистических программ Stata / Т.Н. Унгуряну, А.М. Гржибовский // Экология человека. – 2014. – № 5. – С. 60–64.
8. Смирнов В.А. Новые компетенции социолога в эпоху «Больших данных» // Мониторинг. – 2015. – № 2 (125). – С. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.14515/monitoring.2015.2.04>.
9. Андreyok Д.С. Семантический анализ структуры ценностей группы с помощью тезауруса Роже: автоматизированный алгоритм / Д.С. Андreyok, А.С. Ливитина, Н.С. Сушко // Государственное управление. Электронный вестник. – 2022. – № 91. – С. 148–161.
10. Использование машинного обучения для изучения качества жизни населения: методологические аспекты / Е.В. Щекотин, В.Л. Гойко, П.А. Басина, В.В. Бакулин // Цифровая социология. – 2022. – № 1. – С. 87–97.
11. Рагимова Н.А. Применение технологий больших данных для мониторинга социальных процессов в университете / Н.А. Рагимова, В.Г. Абдуллаев, М.Э. Халилов // Science Rise. – 2019. – № 8 (61). – С. 17–23.
12. Гегер А.Э. Компьютерные программы для анализа качественных и смешанных данных / А.Э. Гегер, Ю.А. Чупахина, С.А. Гегер // Петербургская социология сегодня. – 2015. – № 6. – С. 374–383.
13. Каныгин Г.В. Аналитическое кодирование / Г.В. Каныгин, В.С. Корецкая // Петербургская социология сегодня. – 2018. – № 10. – С. 99–121.
14. Хуажев А.А. Технологические средства анализа имиджформирующих политических медиатекстов: возможности и ограничения // Изв. Саратов. ун-та. Сер.: Социология. Политология. – 2022. – № 2. – С. 232–236.
15. Чудновская И.Н. Модель коммуникации в цифровом образовательном пространстве в рефлексии студентов / И.Н. Чудновская, И.Н. Бухтиярова, М.Е. Липатова // Социология. – 2022. – № 1. – С. 173–183.
16. Харламов А.А. Инструментарий для информационно-аналитической экспертной оценки научной продукции с целью выявления приоритетных научных направлений и коллективов / А.А. Харламов, Б.И. Васин // Вестник Моск. гос. лингвистического ун-та. Гуманитарные науки. – 2018. – № 6 (797). – С. 164–174.
17. Ученые ТГУ с помощью платформы PolyAnalyst измерили настроения россиян [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.megaputer.ru/uchenye-izmerilischaste-gossijan/>, свободный (дата обращения: 30.07.2024).
18. Василенко Л.А. Социология цифрового общества: монография / Л.А. Василенко, Н.Н. Мещерякова. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2021. – 226 с.
19. Утепбергенов А.О. Большие данные в управлении человеческими ресурсами // Экономика и социум. – 2022. – № 4–3(95). – С. 513–519.
20. Анализ социальных сетей: методы и приложения / А. Коршунов, И. Белобородов, Н. Бузун, В. Аванесов, Р. Пастухов, К. Чихрадзе, И. Козлов, А. Гомзин, И. Андрианов, А. Сысоев, С. Ипатов, И. Филоненко, К. Чуприна, Д. Турдаков, С. Кузнецов // Труды ИСП РАН. – 2014. – № 26 (1). – С. 439–456.
21. Груданова А.А. Обзор инструментов онлайн-опросов для информационного обеспечения маркетинговых исследований / А.А. Груданова, Н.А. Груданов // StudNet. – 2021. – № 7. – С. 1814–1829.
22. Никонова М.Л. Компьютерная модель решения задач классификации в программной среде Rapid Miner // Медицинское образование и профессиональное развитие. – 2017. – № 2–3. – С. 28–29.
23. Василькова В.В. Боты на публичных аренах социальных сетей / В.В. Василькова, Н.И. Легостаева // Социологический журнал. – 2021. – № 4. – С. 99–117.
24. Гончарова И.В. Технология больших данных как инструмент решения задач устойчивого развития общества / И.В. Гончарова, Г.Б. Прончев // Право и управление. – 2023. – № 5. – С. 215–226.
25. Рогожа А.И. Сравнительный анализ российских систем Business Intelligence // Скиф. – 2022. – № 8 (72). – С. 282–287.
26. Хасанов А.Р. Влияние предиктивной аналитики на деятельность компаний // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2018. – № 3. – С. 108–113. <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-3-108-113>.
27. Цыпин А.П. Статистические пакеты программ в социально-экономических исследованиях / А.П. Цыпин, А.С. Сорокин // АНИ: экономика и управление. – 2016. – № 4 (17). – С. 379–384.
28. Шимановский К.В. Импортзамещение в области программного обеспечения бизнес-аналитики // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2022. – № 2. – С. 527–537.
29. Борханова А.Д. Применение анкеты Google Forms для изучения педагогических условий реализации инновационных проектов в школе // КПО. – 2021. – № 3 (27). – С. 32–36.
30. The Google Forms Online Service is Used to Assess the Socio-psychological Qualities of a Person and the Level of Professional Competence of Average Medical Professionals / A. Syzdykova, L. Orakbay, A. Mansharipova, B. Shuzheev, M. Kushniyazova // Актуальные проблемы теоретической и клинической медицины. – 2021. – № 2. – С. 35–40.
31. Кед А.П. Интернет-опрос как метод социологического исследования / А.П. Кед, П.М. Агаева // Проблемы современной экономики (Новосибирск). – 2015. – № 27. – С. 112–116.
32. Пантелеев Д.Н. Исследование и характеристика маркетингового атрибута инноваций // Вестник Академии знаний. – 2022. – № 6 (53). – С. 453–456.
33. Информационная система REDCap для сбора и хранения данных популяционных биомедицинских исследований / А.В. Аталян, Л.И. Колесникова, С.И. Колесников, А.М. Гржибовский, Л.В. Сутурина // Экология человека. – 2019. – № 2. – С. 52–59.
34. Кузнецов А.М. Структура модели информационно-аналитической системы обработки социологических данных // Нанобиотехнологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование: сборник статей междунар. науч.-практ. конф., Липецк, 27–28 февраля 2023 г. – Липецк: Липецкий гос. техн. ун-т, 2023. – С. 258–262.
35. Саклаков В.М. Методология цифрового социологического исследования: общественная система как базовый инструмент моделирования // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 61–77. DOI: [10.21293/1818-0442-2023-26-4-61-77](https://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-4-61-77).
36. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024617985 / А.М. Кузнецов. – Заявка № 202461581. Дата поступ.: 22 марта 2024 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ: 08 апреля 2024 г.

37. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024666569 / А.М. Кузнецов. – Заявка № 2024665224. Дата поступ.: 3 июля 2024 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ: 15 июля 2024 г.

38. Кузнецов А.М. Выбор модели и алгоритма прогнозирования событий на основе результатов обработки данных социологических исследований // Нейрокомпьютеры и их применение: сборник тезисов XXI Всерос. науч. конф., Москва, 28 марта 2023 г. – М.: Моск. гос. психолого-педагогический ун-т, 2023. – С. 93–94.

39. Курбатова А.С. Перспективы импортозамещения в российском секторе информационных технологий в условиях санкционного давления // Современная мировая экономика. – 2023. – Т. 1, № 4 (4). – С. 108–128. DOI: 10.17323/2949-5776-2023-1-4-108-128.

40. Злобина О.В. Перспективы автоматизации и цифровизации производства в условиях введения санкций / О.В. Злобина, Г.Ю. Пешкова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 8-1. – С. 66–73.

Кузнецов Александр Михайлович

Аспирант каф. информационных систем

и защиты информации (ИСЗИ)

Тамбовского гос. технического ун-та (ГГТУ)

Советская ул., 106/5, г. Тамбов, Россия, 392000

ORCID: 0000-0003-2640-3417

Тел.: +7 (475-2) 63-00-54

Эл. почта: 068t@mail.ru

Kuznetsov A.M.

Information technology for automation of sociological research: methods, technologies and advantages

The article is devoted to the analysis and development of an information-analytical system (IAS) for sociological research. It reviews existing software solutions for data collection, processing, and analysis, outlining their advantages and limitations. The article proposes integrating various functions into a single system to provide a comprehensive approach to research, including proactive forecasting and analysis. The developed IAS offers extensive capabilities for automating key stages of sociological research, improving data quality, and enhancing analytical accuracy. The integration of ontologies into the IAS structure has standardized terms and concepts, established semantic relationships between them, which reduced the likelihood of errors and shortened the preparation time for retrospective analysis (by 20%), while improving the quality of analytical conclusions through more in-depth and comprehensive data processing.

Keywords: information technology, system architecture, sociological research, ontologies, forecasting, data processing system (DPS), decision support system (DSS).

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-109-117

References

1. Data Collection and Labelling Market Size, Share, Trends and Analysis by Region, Type, Vertical, and Segment Forecast to 2030. Available at: <https://www.global-data.com/store/report/data-collection-and-labelling-market-analysis>, free (Accessed: July 30, 2024).

2. Data Collection and Labeling Market. Available at: <https://www.factmr.com/report/4726/data-collection-and-labelling-market>, free (Accessed: July 31, 2024).

3. Koshechkin K.A., Kozlovich A.V., Kotikov V.N., Mironov A.N. Obzor perechnya i osobennostey programmnovo obespecheniya, primenyaemogo dlya statisticheskoy obrabotki dannykh pri vypolnenii ekspertnoy raboty [Review of the list and the features of the software used for data processing in statistics when carrying out the expert evaluation], *The Journal Regulatory Research and Medicine Evaluation*, 2014, no. 3, pp. 46–51 (in Russ.).

4. Andreeva A.A. Vozможности ispolzovaniya professionalnogo statisticheskogo paketa dlya sotsialnykh nauk SPSS Statistics dlya analiza i obrabotki dannykh issledovaniya obshchestvennogo mneniya [The advantages of using a professional software package SPSS Statistics in social sciences to process the data collected from public views], *Theory and Practice of Modern Science*. 2020, no. 1(67), pp. 30–43 (in Russ.).

5. Orestova V.R., Bastron A.A. Primeneniye statisticheskogo paketa analiza dannykh SPSS Statistics v psikhologicheskikh issledovaniyakh na primere faktornogo analiza [The use of the SPSS Statistics for psychological research illustrated by factor analysis], *History and Archives*, 2017, no. 2(8), pp. 38–51 (in Russ.).

6. Demakov V.I., Larionova E.Yu., Golodkov Yu.E., Rerke V.I. Sravnitelnyy obzor statisticheskikh paketov dlya analiza dannykh [Comparative study of statistical packages for data processing], *Vestnik BGU. Mathematics, Informatics*, 2023, no. 3, pp. 78–89 (in Russ.).

7. Unguryanu T.N., Grzhibovskiy A.M. Odnofaktornyy dispersionnyy analiz s ispolzovaniem paketa statisticheskikh program [Single-factor analysis of variance using statistical package], *Stata // Human Ecology*, 2014, no. 5, pp. 60–64 (in Russ.).

8. Smirnov V.A. Novye kompetentsii sotsiologa v epokhu «Bolshikh dannykh» [Sociologist new competences in the Big Data Age], *Monitoring*, 2015, no. 2(125), pp.44–54 (in Russ.).

9. Andreyuk D.S., Livitina A.S., Sushko N.S. Semanticheskyy analiz struktury tsennostey gruppy s pomoshchyu tezavra Rozhe: avtomatizirovannyy algoritm [Semantic analysis of the group values structure using the Roget's Thesaurus: an automated algorithm], *Public Administration. E-journal (Russia)*, 2022, no. 91, pp. 148–161 (in Russ.).

10. Shchekotin E.V., Goyko V.L., Basina P.A., Bakulin V.V. Ispolzovanie mashinnogo obucheniya dlya izucheniya kachestva zhizni naseleniya: metodologicheskie aspekty [Using Machine Learning to evaluate the quality of life: methodological aspects], *Digital Sociology*, 2022, № 1, pp. 87–97 (in Russ.).

11. Ragimova N.A., Abdullaev V.G., Khalilov M.E. Primeneniye tekhnologiy bolshikh dannykh dlya monitoringa sotsialnykh protsessov v universitete [The use of Big Data technologies to monitor social processes at university], *ScienceRise*, 2019, no. 8(61), pp. 17–23 (in Russ.).

12. Geger A.E., Chupakhina Yu.A., Geger S.A. Kompyuternye programmy dlya analiza kachestvennykh i smeshannykh dannykh [Computer programs to analyze quality and mixed data], *St. Petersburg Sociology Today*, 2015, no. 6, pp. 374–383 (in Russ.).

13. Kanygin G.V., Koretskaya V.S. Analiticheskoe kodirovanie [Analytical coding], *St. Petersburg Sociology Today*, 2018, no. 10, pp. 99–121 (in Russ.).

14. Khuazhev A.A. Tekhnologicheskie sredstva analiza imidzhformiruyushchikh politicheskikh mediatekstov: vozможности i ogranicheniya [Tools to analyze the image making political media texts], *Izvestiya of Saratov University. Sociology. Politology*, 2022, no. 2, pp. 232–236 (in Russ.).

15. Chudnovskaya I.N., Bukhtiyarova I.N., Lipatova M.E. Model kommunikatsii v tsifrovom obrazovatelnom prostanstve v refleksii studentov [Communication model in digital education environment based on students opinions], *Sociology*, 2022, no. 1, pp. 173–183 (in Russ.).

16. Kharlamov A.A., Vasin B.I. Instrumentariy dlya informatsionno-analiticheskoy ekspertnoi otsenki nauchnoy produktssii s tsel'yu vyavleniya prioritnykh nauchnykh napravleniy i kollektivov [Tools for analytical expert evaluation of a research products aimed at determining the priority research directions and teams], *Vestnik of Moscow State Linguistic University. Humanities*, 2018, no. 6(797), pp. 164–174 (in Russ.).
17. Uchenye TGU s pomoshchyu platformy PolyAnalyst izmerili nastroyeniya rossiyan [TSU researchers evaluated the mood of the Russian citizens using PolyAnalyst platform], Available at: <https://www.megaputer.ru/uchenye-izmerilishchaste-rossijan/>, free (Accessed: July 30, 2024) (in Russ.).
18. Vasilenko L.A., Meshcheryakova N.N. Sotsiologiya tsifrovogo obshchestva: monografiya [Digital Society Sociology: Monograph]. Tomsk: Publ. office of Tomsk Polytechnic University, 2021, 226 p. (in Russ.).
19. Utepbergenov A. O. Bolshie dannye v upravlenii che-lovecheskimi resursami [Big Data in Human Resources Management], *Economics and Socium*, 2022, no. 4–3 (95), pp. 439–456 (in Russ.).
20. Korshunov A., Beloborodov I., Buzun N., Avanesov V., Pastukhov R., Chikhhradze K., Kozlov I., Gomzin A., Andrianov I., Sysoev A., Ipatov S., Filonenko I., Chuprina K., Turdakov D., Kuznetsov S. Analiz sotsialnykh setey: metody i prilozheniya [Social Networks analysis: techniques and applications], *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 2014, no. 1, pp. 439–456 (in Russ.).
21. Grudanov A.A., Grudanov N.A. Obzor instrumentov onlayn-oprosov dlya informatsionnogo obespecheniya marketingovykh issledovaniy [Overview of computer-assisted web interviewing tools used in market research], *StudNet*, 2021, no. 7, pp. 1814–1829 (in Russ.).
22. Nikonorova M.L. Kompyuternaya model resheniya zadach klassifikatsii v programmnoy srede Rapid Miner [Computer model to solve classification tasks in programming environment Rapid Miner], *Medical Education and Professional Development*, 2017, no. 2–3, pp. 28–29 (in Russ.).
23. Vasilkova V.V., Legostaeva N.I. Boty na publichnykh arenakh sotsialnykh setey [Bots in social networks], *Sociological Journal*, 2021, no. 4, pp. 99–117 (in Russ.).
24. Goncharova I.V., Pronchev G.B. Tekhnologii bolshikh dannykh kak instrument resheniya zadach ustoychivogo razvitiya obshchestva [Big data technologies as a tool for solving the problems of sustainable development of the society], *Law and Management*, 2023, no. 5, pp. 215–226 (in Russ.).
25. Rogoza A.I. Sravnitelnyy analiz rossiyskikh sistem Business Intelligence [Comparative analysis of a Russian systems «Business Intelligence»], *Skif*, 2022, no. 8(72), pp. 282–287 (in Russ.).
26. Khasanov A.R. Vliyanie prediktivnoy analitiki na deyatelnost kompaniy [Impact of predictive analytics to the company operation], *Strategic Decisions and Risk Management*, 2018, no. 3, pp. 108–113 (in Russ.). DOI: 17747/2078-8886-2018-3-108-113.
27. Tsypin A.P., Sorokin A.S. Statisticheskie pakety programm v sotsialno-ekonomicheskikh issledovaniyakh [Statistical packages in socio-economic studies], *ASR: Economics and Management*, 2016, no. 4 (17), pp. 379–384 (in Russ.).
28. Shimanovskiy K. V. Importozameshchenie v oblasti programmno obespecheniya biznes-analitiki [Import-substituting in software for business analytics], *International Journal of Applied Sciences and Technology «Integral»*, 2022, no. 2, pp. 52–537 (in Russ.).
29. Borkhanova A.D. Primeneniye ankety Google Forms dlya izucheniya pedagogicheskikh usloviy realizatsii innovatsionnykh projektov v shkole [Using Google Forms to study the pedagogical conditions of the implementation of innovative projects at schools], *Pedagogic Correction Education Journal*, 2021, no. 3(27), pp. 32–36 (in Russ.).
30. Syzdykova A., Orakbay L., Mansharipova A., Shuzheev B., Kushniyazova M. The Google Forms Online Service is Used to Assess the Socio-psychological Qualities of a Person and the Level of Professional Competence of Average Medical Professionals. *Actual Problems of Theoretical and Clinical Medicine*, 2021, no. 2, pp. 35–40
31. Ked A.P., Agaeva P.M. Internet-opros kak metod sotsiologicheskogo issledovaniya [Computer-aided interview as a tolls used for sociological study], *Problems of Modern Economy (Novossibirsk)*, 2015, no. 27, pp. 112–116 (in Russ.).
32. Pantelev D.N. Issledovanie i kharakteristika marketingovogo atributa innovatsiy [Study and characteristics of marketing aspects in innovation], *Bulletin of the Academy of Knowledge*, 2022, no. 6(53), pp. 453–456 (in Russ.).
33. Atalyan A.V., Kolesnikova L.I., Kolesnikov S.I., Grzhibovskiy A.M., Suturina L.V. Informatsionnaya sistema REDCap dlya sbora i khraneniya dannykh populatsionnykh biomeditsinskikh issledovaniy [REDCap information system to collect and store the data collected from population and biomedical studies], *Human Ecology*, 2019, no. 2, p. 52–59 (in Russ.).
34. Kuznetsov A.M. Struktura modeli informatsionno-analiticheskoy sistemy obrabotki sotsiologicheskikh dannykh [Model structure for information analytical system used for sociological data processing], *Nano-biotechnologies, Heat and Power Engineering, Mathematical Modeling Proceedings of the International Conference*, Lipetsk, 2023, p. 258–262 (in Russ.).
35. Saklakov V.M. Metodologiya tsifrovogo sotsiologicheskogo issledovaniya: obshchestvennaya sistema kak bazovyy instrument modelirovaniya [Methodology of digital sociological research: The social system as a basic modeling tool], *Proceedings of TUSUR University*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 61–77. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-61-77 (in Russ.).
36. Certificate of state registration of computer program No. 2024617985. / A.M. Kuznetsov. – Application No. 202461581. Date of receipt: March 22, 2024. Registered in the Register of computer programs: April 08, 2024. (in Russ.).
37. Certificate of state registration of computer program No. 2024666569. A.M. Kuznetsov. Application No. 2024665224. Date of receipt: July 3, 2024. Registered in the Register of computer programs: July 15, 2024 (in Russ.).
38. Kuznetsov A.M. Vybor modeli i algoritma prognozirovaniya sobytii na osnove rezul'tatov obrabotki dannykh sotsiologicheskikh issledovaniy [Choosing a model and an algorithm to predict an event based on the results of sociological data processing], *Neuro-Computers and their Application: proceedings of the XXI All-Russian Research Conference*, Moskva: MGPPU, 2023. p. 93–94 (in Russ.).
39. Kurbatova A.S. Perspektivy importozameshcheniya v rossiyskom sektore informatsionnykh tekhnologiy v usloviyakh sanktsionnogo davleniya [Import-substituting prospects in Russian information technologies in sanctions pressure conditions], *Modern World Economy*, 2023, vol. 1, no. 4(4). DOI: 10.17323/2949-5776-2023-1-4-108-128 (in Russ.).
40. Zlobina O. V., Peshkova G. Yu. Perspektivy avtomatizatsii i tsifrovizatsii proizvodstva v usloviyakh vvedeniya sanktsiy [Automation and Digitalization prospects under sanctions], *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*, 2022, no. 8–1, pp. 66–73 (in Russ.).

Alexander M. Kuznetsov

Postgraduate student, Department of Information Systems and Information Security, Tambov State Technical University (TSTU) 106, Sovetskaya st., bldg. 5 Tambov, Russia, 392000
ORCID: 0000-0003-2640-3417
Phone: +7 (475-2) 63-00-54
Email: 068t@mail.ru

УДК 004.056.52

Н.С. Афанасьева, П.С. Ложников

Наборы данных, используемые для определения ботов на основании движения компьютерной мыши

Рассматриваются обнаружения ботов на основании динамических характеристик движения курсора компьютерной мыши, а также базовые динамические характеристики и полученные на их основании 150 добавочных. Приведены общедоступные наборы данных, которые используются для нахождения ботов по особенностям перемещения курсора компьютерной мыши. Представлены самостоятельно созданные датасеты BOT1, используемые для обучения системы. Для подтверждения применимости этих датасетов проведено снижение размерности и сравнение распределения ключевых динамических характеристик наборов.

Ключевые слова: бот, вредоносный бот, движение курсора компьютерной мыши, трек, наборы данных динамики мыши.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-118-124

В настоящее время боты (программы, автоматически выполняющие заранее настроенные повторяющиеся задачи с использованием интерфейсов, предназначенных для людей [1]) стали неотъемлемой частью повседневной жизни человека.

Продуктивные боты помогают улучшить индексацию в браузерах, обеспечить вовлеченность клиентов, масштабировать операции.

Вредоносные боты представляют собой автономные интеллектуальные продукты, разработанные с целью мошенничества, причинения вреда конечным пользователям или организациям в целом (парсинг веб-страниц, конкурентный анализ данных, скалпинг, скрейпинг личных и финансовых данных, попытки грубого входа в систему, атаки типа «отказ в обслуживании», мошенничество с цифровой рекламой, рассылка спама, мошенничество с транзакциями и другие подобные действия) [3].

Существует несколько схожих терминов, встречающихся в работах, посвященных вредоносным ботам, среди них – Bad bot [4, 5], плохие боты [6], злонамеренные боты [7], malicious bot [1, 8, 9], деструктивные боты [10]. В данном исследовании понятие вредоносного бота используется как синоним вышеперечисленных.

Вредоносные боты развили свои эффективные методы уклонения от традиционных решений безопасности, таких как брандмауэр веб-приложений (WAF) и CAPTCHA на основе имитации действий реальных пользователей.

Согласно последним отраслевым отчетам [10], трафик вредоносных ботов растет пятый год подряд. В 2023 г. их доля составила 32% от всего трафика, что на 1,8% больше, чем годом ранее. Доля продуктивных ботов также выросла – с 17,3 до 17,6%. В совокупности за 2023 г. доля интернет-трафика, сгенерированного ботами, составляет 49,6% от общего мирового трафика.

Борьба с ботами является комплексной проблемой, затрагивающей различные сферы и функции. Возможность ботов выполнять действия с гораздо большей скоростью и частотой, чем обычными поль-

зователями, делает их эффективным инструментом для совершения вредоносных действий и атак.

Open Web Application Security Project (OWASP) – сообщество, включающее в себя ИТ-корпорации, образовательные организации, ИТ-специалистов, ориентированное на улучшение защищенности веб-приложений, выделило автоматизированные угрозы веб-приложениям с помощью ботов в отдельный класс, вне широко известного и применяемого проекта Top-10 OWASP [11].

Веб-приложения подвергаются нежелательному автоматическому использованию каждый день. Эти события зачастую связаны с излишним использованием допустимой функциональности, а не с попыткой эксплуатации неустранимых уязвимостей.

В качестве дополнительного инструмента для борьбы с автоматизированными угрозами, инициируемыми ботами, можно рассмотреть детектирование ботов на основании движения мыши. В отличие от динамики нажатия клавиш, анализ перемещения курсора мыши не относится к категории персональных данных пользователя, т.е. нет возможности зафиксировать, например, логин и пароль, вводимые с клавиатуры. Также в веб-средах использование мыши происходит чаще, чем клавиатуры [12].

Хотя некоторые исследования уже были проведены в вопросах детектирования ботов, не существует продукта, который позволял бы полностью решить эту проблему, поэтому разработка новых подходов к анализу динамики мышей остается областью, требующей дальнейших исследований. Важным ограничением для развития работ в области распознавания ботов по двигательной активности курсора компьютерной мыши является недоступность наборов данных. Общедоступные наборы данных движения мыши позволяют объективно сравнивать различные методы решения конкретных проблем.

Определение ботов на основе динамики мыши

В этой статье представлены характеристики, полученные на основании действий компьютерной мыши, а также наборы данных, используемые для обучения модели распознавания ботов.

Движение мыши пользователем представлено как набор сессий. Каждая сессия – это комплект треков. Трек представляет собой действия пользователя: перемещение мыши и нажатие клавиш. Причем каж-

дый новый трек начинается, когда пользователь сделал паузу между своими действиями не менее чем на 3 с. Процесс анализа движения компьютерной мыши пользователем на треки представлен на рис. 1.

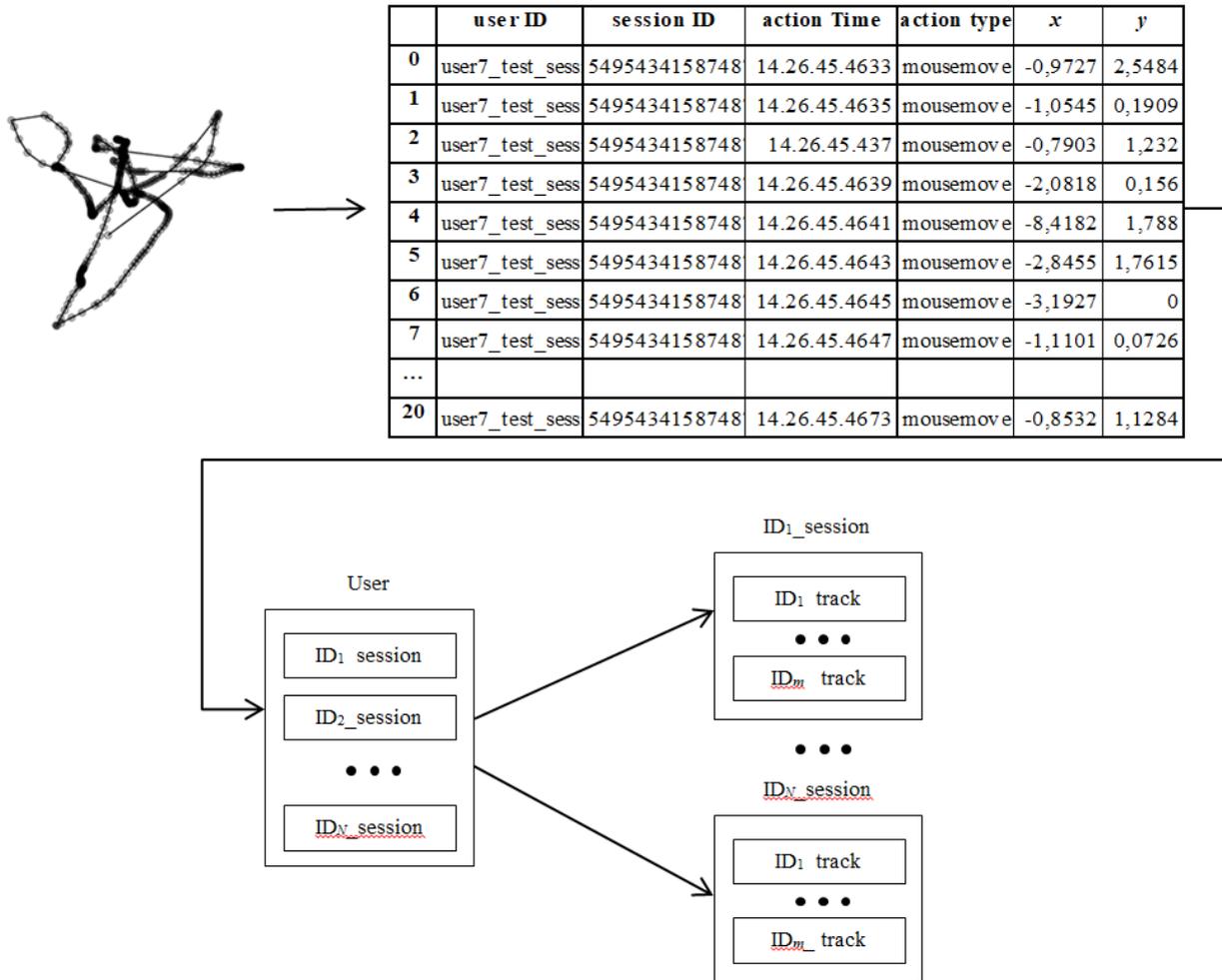


Рис. 1. Процесс создания пользовательской модели

Характеристики мыши

В качестве динамических характеристик компьютерной мыши будем рассматривать x- и y-координаты точек трека, значения времени для каждого события мыши, набор базовых характеристик и набор добавочных характеристик.

К базовым характеристикам относятся длина пройденной траектории (s), угол между касательной траектории и осью x (θ_i) горизонтальная (v_x), вертикальная (v_y) и общая скорость (v), угловая скорость (ω), ускорение (α) и рывок (j), рассчитанные аналогично подходу Гамбоа [13].

Угол между касательной траектории и осью x является арктангенсом сегмента в момент времени и принадлежит $(-\pi, \pi)$

$$\theta_i = \text{atan2} \left(\frac{\partial x_i}{\partial y_i} \right), i = 2, \dots, n, \quad (1)$$

где $\partial x_i = x_i - x_{i-1}$, $\partial y_i = y_i - y_{i-1}$, $i = 2, \dots, n$, n – количество событий в треке; $\theta_1 = 0$.

Остальные параметры рассчитываются по формулам:

$$v_{x_i} = \frac{\partial x_i}{\partial t_i}, \quad (2)$$

$$v_{y_i} = \frac{\partial y_i}{\partial t_i}, \quad (3)$$

$$v_i = \sqrt{v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2}, \quad (4)$$

$$\omega_i = \frac{\partial \theta_i}{\partial t_i}, \quad (5)$$

$$\alpha_i = \frac{\partial v_i}{\partial t_i}, \quad (6)$$

$$j_i = \frac{\partial \alpha_i}{\partial t_i}, \quad (7)$$

где $\partial t_i = t_i - t_{i-1}$, $\partial \theta_i = \theta_i - \theta_{i-1}$, $\partial v_i = v_i - v_{i-1}$, $\partial \alpha_i = \alpha_i - \alpha_{i-1}$, $i = 2, \dots, n$; n – количество событий в треке; $t_1 = 0$, $v_{x1} = 0$, $v_{y1} = 0$, $v_1 = 0$, $\omega_1 = 0$, $\alpha_1 = 0$, $j_1 = 0$.

Для каждого из параметров сессии $v_x, v_y, v, \alpha, j, \omega, \theta_i$ посчитано среднее, минимальное и максимальное значения, стандартное отклонение.

Кривизна между двумя соседними точками определяется как отношение изменения угла наклона и пройденного расстояния

$$c_i = \frac{\partial \theta_i}{\partial s_i}, \quad (8)$$

где $s_i = \sum_{m=1}^i \sqrt{\partial x_m^2 + \partial y_m^2}$; $\partial s_i = s_i - s_{i-1}$; $i = 2, \dots, n$;

n – количество событий в треке; $s_1 = 0$.

Набор базовых характеристик включает в себя в общей сложности 50 значений.

На основании полученного вектора были рассчитаны добавочные характеристики: для каждой базовой характеристики были добавлены квантили и интерквантильный размах, доля точек, являющихся выбросами, количество изменений направления трека, энтропия и её отклонение от максимальной для ∂x_i и ∂y_i , значения суммы всех перемещений по O_x и O_y , доля точек в треке, имеющих одинаковое значение по O_x и O_y , доля углов около $0, \pm 45, \pm 90, \pm 135, \pm 180^\circ$. Всего рассчитано 150 добавочных характеристик.

В общей сложности эти 200 значений составляют входной вектор, который вычисляется для каждого трека движения мыши. Определение того, осуществляется ли движение мыши человеком, основывается на признаках, описанных выше.

Наборы данных

Для обучения и оценки разрабатываемого подхода к обнаружению ботов нужен набор данных движений мыши пользователя. Существует ограниченный перечень датасетов, включающих в себя такие данные [14], но большинство из этих наборов являются закрытыми. Проанализировав большой перечень работ и ресурсов, готовых размеченных датасетов с ботами не было найдено. Эта проблема также озвучена в работах [15–17]. Поэтому для обучения системы было решено использовать известные датасеты VALABIT и Bogazici, включающие в себя размеченные данные реальных пользователей, а также созданный самостоятельно датасет BOT1, включающие в себя данные ботов. Для тестирования используются вышеназванные датасеты и датасет UB.

Набор данных Valabit опубликован в 2016 г. [18] и относится к категории наборов неуправляемой среды, когда пользователи самостоятельно передвигают мышью без заранее полученного задания. Данный датасет включает в себя информацию о положении курсора и времени трека для 10 пользователей, работающих через клиентов удаленного рабочего стола, подключенных к серверам.

Каждое записанное событие мыши содержит шесть полей: (r_{time}, c_{time} , кнопка, состояние, x, y); r_{time} – время в секундах с момента начала сеанса, зафиксированное устройством мониторинга сети; c_{time} – это также прошедшее время, но зафиксированное клиентским устройством. Поле кнопки отобра-

жает текущее состояние кнопок мыши (левая, правая, нет кнопки), поле состояние содержит дополнительную информацию о кнопке (нажатие, отпускание, перетаскивание, движение). Поля x и y представляют собой координаты курсора на экране по осям x и y соответственно.

В табл. 1 приведен пример трека пользователя 16 наборов данных Valabit. В данном датасете представлены данные для обучения и тестирования; однако тестовые сеансы намного короче обучающих.

Таблица 1

Характеристики трека пользователя
16 наборов данных Valabit

r_{time}	c_{time}	Кнопка	Состояние	x	y
0	0	Left	Pressed	781	56
0,09045	0,09572	No button	Move	804	62
0,16318	0,16966	No button	Move	819	80
0,16897	0,17214	No button	Move	826	87
0,20479	0,20936	No button	Move	842	99
0,20479	0,20936	Left	Released	842	99
0,28075	0,29974	Left	Pressed	840	99
0,30012	0,30201	Left	Released	842	99

В табл. 2 приведен пример трека набора данных Bogazici. Для каждого пользователя есть собственный каталог для файлов сеансов, включающий в себя три каталога – обучающие данные, данные для внешнего и внутреннего тестирования.

Поведение пользователей разделено на пять основных действий: перемещение мыши (MM), перетаскивание (DD), одиночный щелчок левой кнопкой мыши (LC), одиночный щелчок правой кнопкой мыши (RC), двойной щелчок (DC).

Таблица 2

Характеристики трека набора данных Bogazici

Тип действия	Время	x	y	Кнопка	Состояние	Приложение
Перемещение	0	943	268	–	Перемещение	MS Word
Перемещение	0,107	992	175	–	Перемещение	MS Word
Нажатие	0,213	955	152	Правая	Нажатие	MS Word
Нажатие	0,298	955	152	Правая	Отпускание	MS Word
Перемещение	0,366	945	137	–	Перемещение	MS Word
Нажатие	0,428	912	129	Левая	Нажатие	MS Word

Датасет BOT1 представляет собой набор данных перемещения ботов, состоящий из 23 сессий различной длины.

Сбор данных включал в себя два этапа. Первый из них – получение данных с десктопных приложений. Второй – извлечение данных с веб-приложений. Датасет был создан с помощью различных параметризованных версий кривых Безье, сверточного автокодировщика и генеративно-состязательной сети, специализирующейся на временных рядах (TimeGAN), с использованием инструментов Selenium, Katalon,

LambdaTest, дополненных адаптированным алгоритмом WindMouse.

Данный датасет включает в себя следующие данные: тип действия (перемещение или нажатие), координаты курсора мыши по осям x и y , время, раз-

решение экрана, идентификаторы пользователя и сессии. Структура датасета BOT1 и пример полученного трека представлены в табл. 3. Примеры треков, созданных ботами, представлены на рис. 2.

Таблица 3

Структура датасета BOT1 и пример полученного трека

Наименование поля	Тип данных	Комментарий	Характеристики трека BOT1
actionType	Enum8	Тип действия компьютерной мыши: перемещение мыши, нажатие левой/средней (колеса)/правой/боковой кнопки, отпускание левой/средней (колеса)/правой/боковой кнопки, вращение кнопки колеса. (<code>'MOUSE_ACTION_UNKNOWN'</code> = -1, <code>'MOUSE_ACTION_MOUSEMOVE'</code> = 0, <code>'MOUSE_ACTION_LBUTTONDOWN'</code> = 1, <code>'MOUSE_ACTION_LBUTTONUP'</code> = 2, <code>'MOUSE_ACTION_MOUSEWHEEL'</code> = 3, <code>'MOUSE_ACTION_RBUTTONDOWN'</code> = 4, <code>'MOUSE_ACTION_RBUTTONUP'</code> = 5, <code>'MOUSE_ACTION_MBUTTONDOWN'</code> = 6, <code>'MOUSE_ACTION_MBUTTONUP'</code> = 7, <code>'MOUSE_ACTION_XBUTTONDOWN'</code> = 8, <code>'MOUSE_ACTION_XBUTTONUP'</code> = 9)	MOUSE_ACTION_MOUSEMOVE
actionParamX	Int32	Координата x в пикселях	807
actionParamY	Int32	Координата y в пикселях	789
actionTime	DateTime64(9)	Временная метка совершения действия	2024-08-14 11:50:26.127972000
screenScale	Float32	Масштаб отображения экрана в процентах	100.0
screenResolutionX	Int16	Разрешение экрана по горизонтали	2560
screenResolutionY	Int16	Разрешение экрана по вертикали	1400
userId	String	Идентификатор пользователя	Cross
Session ID	String	Идентификатор сессии	sxPGZ12YFkuY8g7ihmfEKQ
ActionDeviceType	Enum8	Тип устройства, совершающий действие	MOUSE

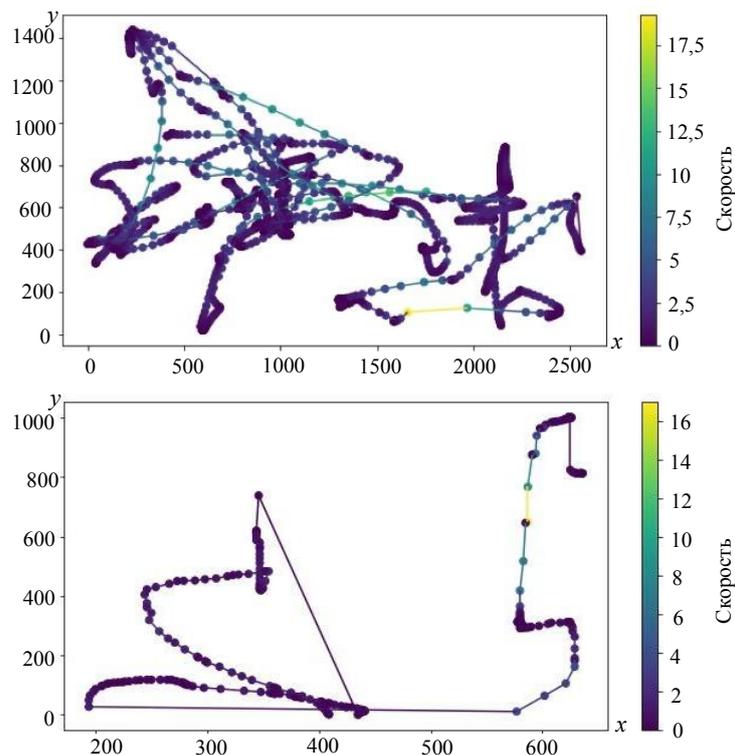


Рис. 2. Примеры движения курсора мыши ботов

Для упрощения обработки вышеназванных наборов данных необходимо уменьшить их размерности данных. По мере увеличения объема и сложности данных становится все труднее извлекать из них полезную информацию, визуализация данных становится более затратной. Методы уменьшения размерности данных решают эту проблему, позволяя представить данные в меньшем количестве измерений, оставляя наиболее важную информацию. То есть методы снижения размерности данных помогают упростить и сжать большие и сложные наборы данных, сохраняя при этом ключевую информацию. Это позволяет более эффективно работать с данными, анализировать их и визуализировать.

Для визуализации использованных наборов данных применяется метод главных компонент (PCA, principal component analysis) [20]. Основная идея PCA заключается в поиске новых признаков, называемых главными компонентами, которые имеют максималь-

ную корреляцию с исходными данными, оставаясь при этом ортогональными друг другу. Эти главные компоненты создают новый базис в пространстве признаков, устраняя избыточную информацию и уменьшая размерность данных. Снижение размерности позволяет представить данные в двухмерном или трехмерном пространстве, что упрощает их визуальный анализ и исследование.

Согласно получившейся проекции (рис. 3), можно сделать вывод, что разработанные боты успешно имитируют поведение мыши реальными пользователями, так как все наборы данных расположены в непосредственной близости друг к другу и пересекаются.

Распределение различных признаков в применяемых наборах данных показано на рис. 4. Представленные гистограммы имеют схожий характер распределения параметров как у реальных пользователей, так и у ботов.

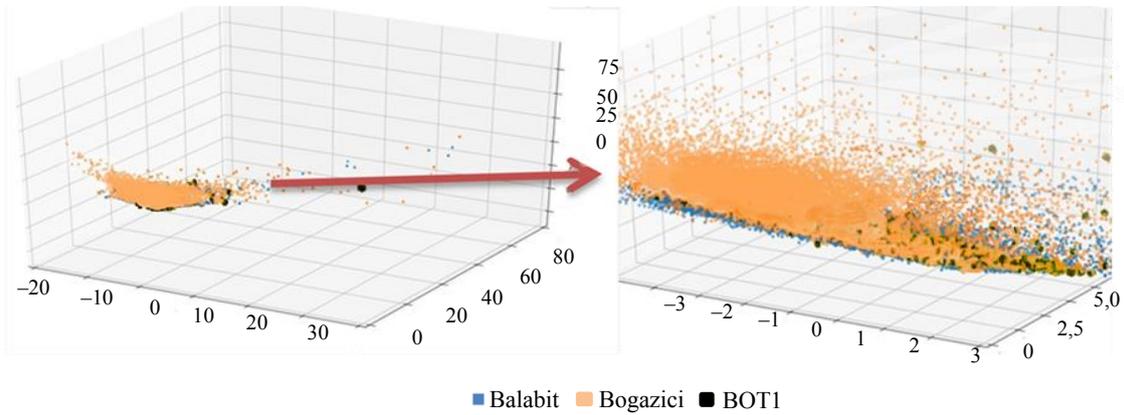


Рис. 3. Визуализация датасетов Balabit, Bogazici, BOT1, используя метод главных компонент

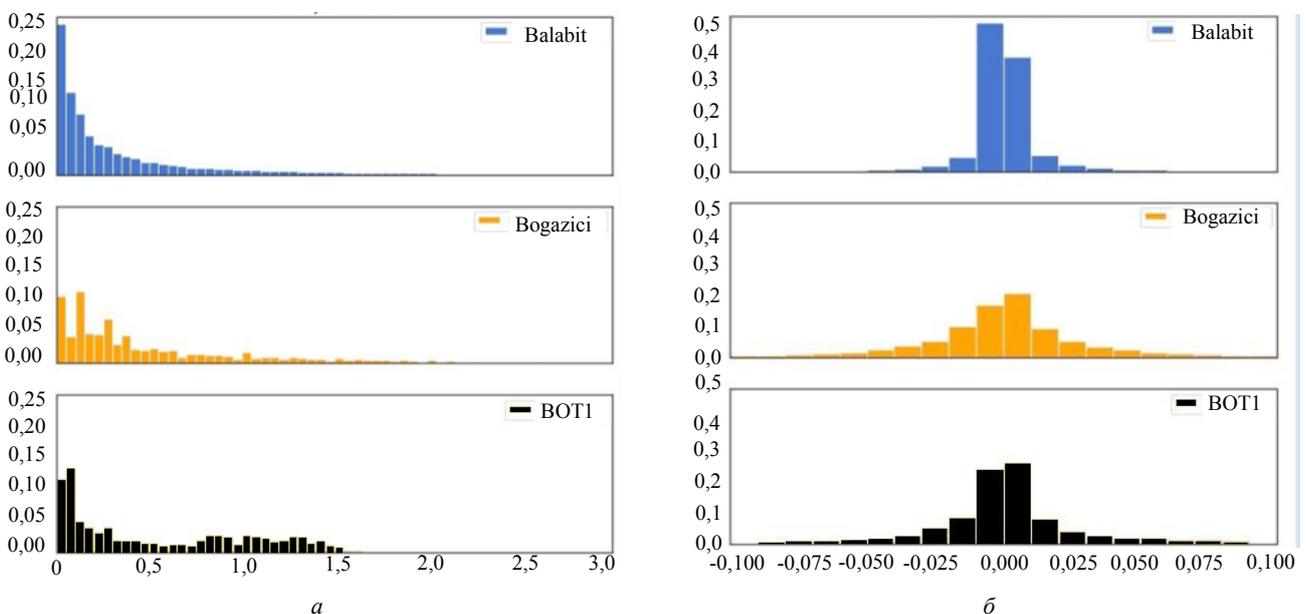


Рис. 4. Распределение различных признаков в датасетах Balabit, Bogazici, BOT1: a – скорости, b – ускорения

Гистограммы распределения скорости показывают, что пользователи предпочитают перемещения курсора мыши с низкой скоростью. Причем более высокие скорости у ботов встречаются чаще, чем у реальных пользователей. Гистограммы ускорения показывают тенденцию пользователей совершать достаточно плавные движения без резких скачков скорости. Распределение рывков, т.е. скорости изменения ускорения между соседними точками, свидетельствует о преобладании небольших рывков в движении пользователей и ботов.

Заключение

Широкое распространение ботов представляет существенные риски для конфиденциальных данных, конкурентоспособности различных компаний и сервисов, формирования общественного мнения и экономической среды. Требуется комплексные меры противодействия ботам на межотраслевом и междисциплинарном уровнях.

Динамику мыши можно учитывать при детектировании ботов наряду с другими подходами, например, такими, как CAPTCHA и проверка HTTP-заголовков.

Тем не менее необходимо иметь достаточно тестовых данных, чтобы выполнить обнаружение на основании динамики мыши с хорошей точностью. Именно поэтому были выбраны общедоступные датасеты Valabit и Bogazici, а также создан собственный набор данных, описывающий перемещение мыши ботами BOT1 и включающий в себя 23 сессии.

Для дальнейших исследований было необходимо спроектировать признаковое пространство. Для этого использовались уже известные параметры в качестве базовых характеристик и в дополнение к ним предложены добавочные характеристики.

На основании этих характеристик будет приниматься решение о принадлежности сессии боту или реальному пользователю. Для этого будут применены проверка статистических гипотез и классификация данных. Также планируется использование кластеризации данных для определения принадлежности трека боту.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации (Минцифры России), соглашение № 40469-07/23-К от 30.06.2023.

Литература

1. Dunham K. Malicious bots: an inside look into the cyber-criminal underground of the internet / K. Dunham, J. Melnick. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 168 p.
2. Suchacka G. Identifying legitimate Web users and bots with different traffic profiles – an Information Bottleneck approach / G. Suchacka, J. Iwański // Knowledge-Based Systems. – 2020. – No. 197. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.105875> (дата обращения: 10.06.2024).
3. Что такое боты – определение и описание [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-are-bots>, свободный (дата обращения: 02.07.2024).
4. Xiao G. Bad bots: regulating the scraping of public personal information. – Cambridge: Harv. JL & Tech, 2020. – 701 p.

5. Bondy M. Bad Bots // The Project on International Peace and Security // Institute for the Theory and Practice of International Relations. – 2017. – No. 1. – P. 2016–2017.

6. Логинова А.О. Анализ существующих подходов к классификации и типологии ботов // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2020. – Т. 1. – С. 462–467.

7. Логинова А.О. Определение атрибутов событий информационной безопасности, связанных с активностью интернет-ботов // Электронные системы и технологии: сборник матер. 58-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 2022. – С. 105–110.

8. Geer D. Malicious bots threaten network security // Computer. – 2005. – Vol. 38, No. 1. – P. 18–20.

9. Kolomeets M. Analysis of the malicious bots market / M. Kolomeets, A. Chechulin // IEEE 29th conference of open innovations association (FRUCT). – 2021. – P. 199–205. – URL: https://www.researchgate.net/publication/351855704_Analysis_of_the_Malicious_Bots_Market, свободный (дата обращения: 13.06.2024).

10. 2023 Imperva Bad Bot Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.imperva.com/resources/resource-library/reports/2023-imperva-bad-bot-report/>, свободный (дата обращения: 12.06.2024).

11. OWASP Automated Threats to Web Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://owasp.org/www-project-automated-threats-to-web-applications/>, свободный (дата обращения: 20.06.2024).

12. Efficient on-the-fly Web bot detection / G. Suchacka, A. Cabri, S. Rovetta, F. Masulli // Knowledge-Based Systems. – 2021. – Vol. 223. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705121003373>, свободный (дата обращения: 20.06.2024).

13. Gamboa H. A behavioral biometric system based on human-computer interaction / H. Gamboa, A. Fred // Biometric Technology for Human Identification. – 2004. – Vol. 5404. – P. 381–392.

14. Afanaseva N.S. Bot Detection Using Mouse Movements / N.S. Afanaseva, P.S. Lozhnikov // 2023 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – IEEE, 2023. – P. 1–4.

15. Detecting Web Bots via Mouse Dynamics and Communication Metadata / A. See, T. Wingarz, M. Radloff, M. Fischer // IFIP International Conference on ICT Systems Security and Privacy Protection. – 2023. – P. 73–86.

16. Antal M. Intrusion detection using mouse dynamics / M. Antal, E. Egyed-Zsigmond // IET Biometrics. – 2019. – Vol. 8, No. 5. – P. 285–294.

17. Mouse dynamics behavioral biometrics: A survey / S. Khan, C. Devlen, M. Manno, D. Hou // ACM Computing Surveys. – 2024. – Vol. 56, No. 6. – P. 1–33.

18. Antal M. Mouse dynamics based user recognition using deep learning / M. Antal, N. Fejér // Acta Universitatis Sapientiae, Informatica. – 2020. – Vol. 12, No. 1. – P. 39–50.

19. Kılıç A.A. Bogazici mouse dynamics dataset / A.A. Kılıç, M. Yıldırım, E. Anarım // Data in Brief. – 2021. – Vol. 36. – P. 107094.

20. Maćkiewicz A. Principal components analysis (PCA) / A. Maćkiewicz, R. Waldemar // Computers & Geosciences. – 1993. – Vol. 19, No. 3. – P. 303–342.

Афанасьева Наталья Сергеевна

Ст. преп. кафедры информационной безопасности Омского гос. ун-та путей сообщения (ОмГУПС)
Маркса пр-т, 35, г. Омск, Россия, 644046
ORCID: 0009-0003-7591-486X
Тел.: +7-904-324-06-66
Эл. почта: nati_dik@mail.ru

Ложников Павел Сергеевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. комплексной защиты информации ОмГТУ
 Мира пр-т, 11, г. Омск, Россия, 644050
 ORCID: 0000-0001-7878-1976
 Тел.: +7-913-605-33-33
 Эл. почта: lozhnikov@mail.ru

Afanaseva N.S., Lozhnikov P.S.

Datasets for bot detection using mouse behavior

Bot detection based on the dynamic characteristics of computer mouse cursor movement is considered. The basic dynamic characteristics and 150 additional ones obtained on their basis are presented. Publicly available datasets used to detect bots based on mouse cursor movement characteristics are studied. Self-created BOT1 and BOT2 datasets used for system training are described. To confirm the applicability of these data sets, the dimensionality reduction and the distribution comparison of key dynamic characteristics of the sets are performed.

Keywords: bot; malicious bot; mouse movement; track; mouse dynamics datasets.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-118-124

References

- Dunham K., Melnick, J. *Malicious bots: an inside look into the cyber-criminal underground of the internet*. Boca Raton, CRC Press, 2008, 168 p.
- Suchacka G., Iwański J. Identifying legitimate Web users and bots with different traffic profiles – an Information Bottleneck approach. *Knowledge-Based Systems*, 2020, no. 197. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2020.105875>, free (Accessed: June 10, 2024).
- What are bots. Available at: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-are-bots>, free (Accessed 2 July 2024).
- Xiao G. *Bad Bots: Regulating the Scraping of Public Personal Information*. Cambridge, Harv. JL & Tech, 2020, 701 p.
- Bondy M. Bad Bots. The Project on International Peace and Security, Institute for the. *Theory and Practice of International Relations*, 2017, pp. 2016–2017.
- Loginova A.O. *Analiz sushchestvuyushchih podhodov k klassifikacii i tipologii botov* [The analysis of existing approaches to bots classification and typology]. *Innovative Technologies: Theory, Tools, Practice*, 2020, vol. 1, pp. 462–467 (in Russ.).
- Loginova A.O. *Opredelenie atributov sobytij informacionnoj bezopasnosti svyazannyh s aktivnostyu internet botov* [Defining information security events attributes related to the activity of internet bots]. *Electronic Systems and Technologies. Proceedings of the 58th Scientific Conference of Postgraduate, Graduate and Undergraduate Students of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, 2022, pp. 105–110 (in Russ.).
- Geer D. Malicious bots threaten network security. *Computer*, 2005, vol. 38, no. 1, pp. 18–20.
- Kolomeets M., Chechulin A. Analysis of the malicious bots market. *IEEE 29th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2021, pp. 199–205. Available at: https://www.researchgate.net/publication/351855704_Analysis_of_the_Malicious_Bots_Market, free (Accessed: June 13, 2024).
- 2023 Imperva Bad Bot Report. Available at: <https://www.imperva.com/resources/resource-library/reports/2023-imperva-bad-bot-report/>, free (Accessed: June 12, 2024).
- OWASP Automated Threats to Web Applications. Available at: <https://owasp.org/www-project-automated-threats-to-web-applications/>, free (Accessed: June 20, 2024).
- Suchacka G., Cabri A., Rovetta S., Masulli F. Efficient on-the-fly Web bot detection. *Knowledge-Based Systems*, 2021, vol. 223. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705121003373>, free (Accessed: June 20, 2024).
- Gamboa H., Fred A. A behavioral biometric system based on human-computer interaction. *Biometric Technology for Human Identification*, SPIE, 2004, vol. 5404, pp. 381–392.
- Afanaseva N.S., Lozhnikov P.S. Bot Detection Using Mouse Movements. *2023 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, IEEE, 2023, pp. 1–4.
- See A., Wingarz T., Radloff M., Fischer M. Detecting Web Bots via Mouse Dynamics and Communication Metadata. *IFIP International Conference on ICT Systems Security and Privacy Protection*, 2023, pp. 73–86.
- Antal M., Egyed-Zsigmond E. Intrusion detection using mouse dynamics. *IET Biometrics*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 285–294.
- Khan S., Devlen C., Manno M., Hou D. Mouse dynamics behavioral biometrics: A survey. *ACM Computing Surveys*, 2024, vol. 56, no. 6, pp. 1–33.
- Antal M., Fejér N. Mouse dynamics based user recognition using deep learning. *Acta Universitatis Sapientiae, Informatica*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 39–50.
- Kılıç A.A., Yıldırım M., Anarım E. Bogazici mouse dynamics dataset. *Data in Brief*, 2021, vol. 36, p. 107094.
- Maćkiewicz, A., Waldemar R. Principal components analysis (PCA). *Computers & Geosciences*, 1993, vol. 19, no. 3, pp. 303–342.

Natalia S. Afanaseva

Lecturer, Department Information Security
 Omsk State Transport University
 35, Marx st., Omsk, Russian Federation, 644046
 ORCID: 0009-0003-7591-486X
 Phone: +7-904-324-06-66
 Email: nati_dik@mail.ru

Pavel S. Lozhnikov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
 Department of Comprehensive Information Protection
 11, Mira st., Omsk, Russian Federation, 644050
 ORCID: 0000-0001-7878-1976
 Phone: +7-913-605-33-33
 Email: lozhnikov@mail.ru

УДК 633.1:633

B.B. Mekecha, A.V. Gorbatov

Crop yield prediction in Ethiopia using gradient boosting regression

Nowadays, machine learning algorithms and methods are used in multiple areas of studies to achieve practical and productive solutions. Agriculture is one of the industries where the impact is significant, especially in the area of crop yield prediction and crop selection which is crucial for ensuring food security and improving agricultural practices. In a country like Ethiopia, where the economy is highly dependent on agriculture, and farming in particular, leveraging the powers of AI and machine learning is crucial. However, the use of these technologies in Ethiopian agriculture remains limited, mainly due to the lack of well-organized and digital datasets and lack of technological advancements.

The aim of this study is to increase the accuracy of crop yield prediction in Ethiopia and provide information that can help farmers and policymakers improve crop productivity. In this study, a crop yield prediction model was developed based on historical data that includes factors such as crop type, rainfall, temperature, Area cultivated, production, and pesticides.

Among the algorithms considered in this study, GradientBoostingRegressor achieved the highest value of the R-square – 90% compared to others which indicates its best predictive ability. However, the study also acknowledges the contextual advantages of other algorithms, highlighting the importance of selecting models that are appropriate for specific data sets and purposes. The accuracy and efficiency of agricultural planning and resource allocation in Ethiopia can be greatly improved by using machine learning techniques for crop production prediction.

Keywords: Crop yield, machine learning algorithms, food security, Ethiopia.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-125-129

Ethiopia's agricultural sector plays a vital role in its economy, accounting for 40% of the country's gross domestic product (GDP), 80% of exports, and an estimated 75% of the country's workforce (employment) [1]. «Ethiopia's crop agriculture, mainly driven by small farms that cultivate cereals such as teff, wheat, maize, sorghum, and barley, and oats has significantly contributed to the total value added. Smallholders, who make up 96% of the total farmed land, primarily produce cereals for both consumption and sales. Due to the limited amount of land available for cultivation, especially in the highlands, future growth in cereal production will largely depend on yield improvements» [2].

Studies also showed that there is a significant annual fluctuation in cereal crop yield from 1994 to 2021, which underlines the significance of understanding these trends for sustainable agricultural planning and food security [3]. crop yield prediction using machine learning techniques is essential for effective agricultural planning and resource allocation in Ethiopia [4].

Traditional methods often lack accuracy and timeliness, prompting the exploration of advanced techniques such as machine learning (ML) [5]. Robots, sensors, drones, and algorithms can execute traditional agricultural tasks more quickly, such as weeding, pesticide application, irrigation, fertilizer recommendation, and soil nutrition and moisture status monitoring [6–8].

Our research builds on using machine learning algorithms and domain-specific data. By integrating support vector models (SVM), long short-term memory (LSTM), and recurrent neural networks (RNN), previous studies have shown promising results in predicting crop yield based on various factors such as water availability and fertilizer use [9]. In addition, the integration of geospatial technologies and the Internet of Things with machine learning algorithms has opened up new

opportunities for real-time monitoring and decision making in agriculture [10]. Furthermore, recent studies have shown the potential of new crop yield forecasting methods specific to Ethiopian agriculture. An analogue approach to crop yield forecasting in the Upper Blue Nile Basin of Ethiopia, for example, uses historical soil moisture and crop yield data to achieve high forecast accuracy, addressing the limitations of traditional forecasting methods and providing valuable information for real-time seasonal forecasts [11].

Moreover, advances in the use of remote sensing data and machine learning algorithms have enabled accurate prediction of agricultural losses due to drought in Ethiopia, offering important information for early intervention planning and improvement of existing early warning systems [12]. These developments highlight the importance of innovative approaches to crop yield forecasting and their potential to revolutionize agricultural management practices in Ethiopia and similar regions. This paper presents a customized approach to yield prediction focusing on seven major crops namely teff, barely, wheat, maize, sorghum, millet and oats in the national regional states of Ethiopia.

Material and methods

Historical crop yield data for the period 1996 to 2022 for nine regions and one federal level city administration (Dire Dawa) is collected from the Central Statistics Agency of Ethiopia (CSA) [13]. Climate data and pesticide information are from FAO and World Bank, respectively [14, 15]. The dataset is composed of 1,820 samples each with nine unique attributes. Using Jupyter Notebook as the platform. Figure 1 below shows an example of the dataset before preprocessing.

The initial data undergoes preprocessing to handle Null values, removing outliers, applying OneHotEncoder to categorical features, and normalizing features. Af-

ter preprocessing, our dataset is reduced to 1,132 samples. To make model training and evaluation easier, the dataset is divided into training and testing subsets. The dataset is then subjected to a variety of Regression models. Gradient Boosting Regression, Random Forest Regression, Decision Tree Regression, Gaussian Process Regressor, KNeighbors Regressor and Linear Regression models are trained on a pre-processed dataset, taking into account factors specific to the Ethiopian agricultural context.

For effective training and testing of our model, we used an 80/20 ratio. In particular, 905 samples, or 80% of the dataset, were allocated for training the model, and 227 samples, or 20% of the dataset, were randomly selected for testing its performance. Each region crop combination was considered as a separate time series to ensure model training and testing reflected real-world conditions. Finally, the most accurate model is chosen by carefully assessing its ability to predict crop yields using the testing dataset. Figure 2 below clearly shows how the system components interact with each other,

starting with preprocessing the data and ending with analyzing the results and choosing the best model. The proposed system is capable of determining crop yields.

Region	crop type	Year	Rainfall(mm)	Temprature(C)	Pesticides(kg)	
0	Tigray	Teff	1996	872.01	23.14	383000
1	Tigray	Barely	1996	872.01	23.14	383000
2	Tigray	Wheat	1996	872.01	23.14	383000
3	Tigray	Maize	1996	872.01	23.14	383000
4	Tigray	Sorghum	1996	872.01	23.14	383000

Area cultivated(Ha)	Production(kg)	Yeild (kg/ha)	
0	87880.0	60827000	692
1	87350.0	81711000	935
2	84550.0	84653000	1001
3	45050.0	67963000	1509
4	96140.0	172968000	1799

Dataset size: (1820, 9)

Fig. 1. Sample Dataset

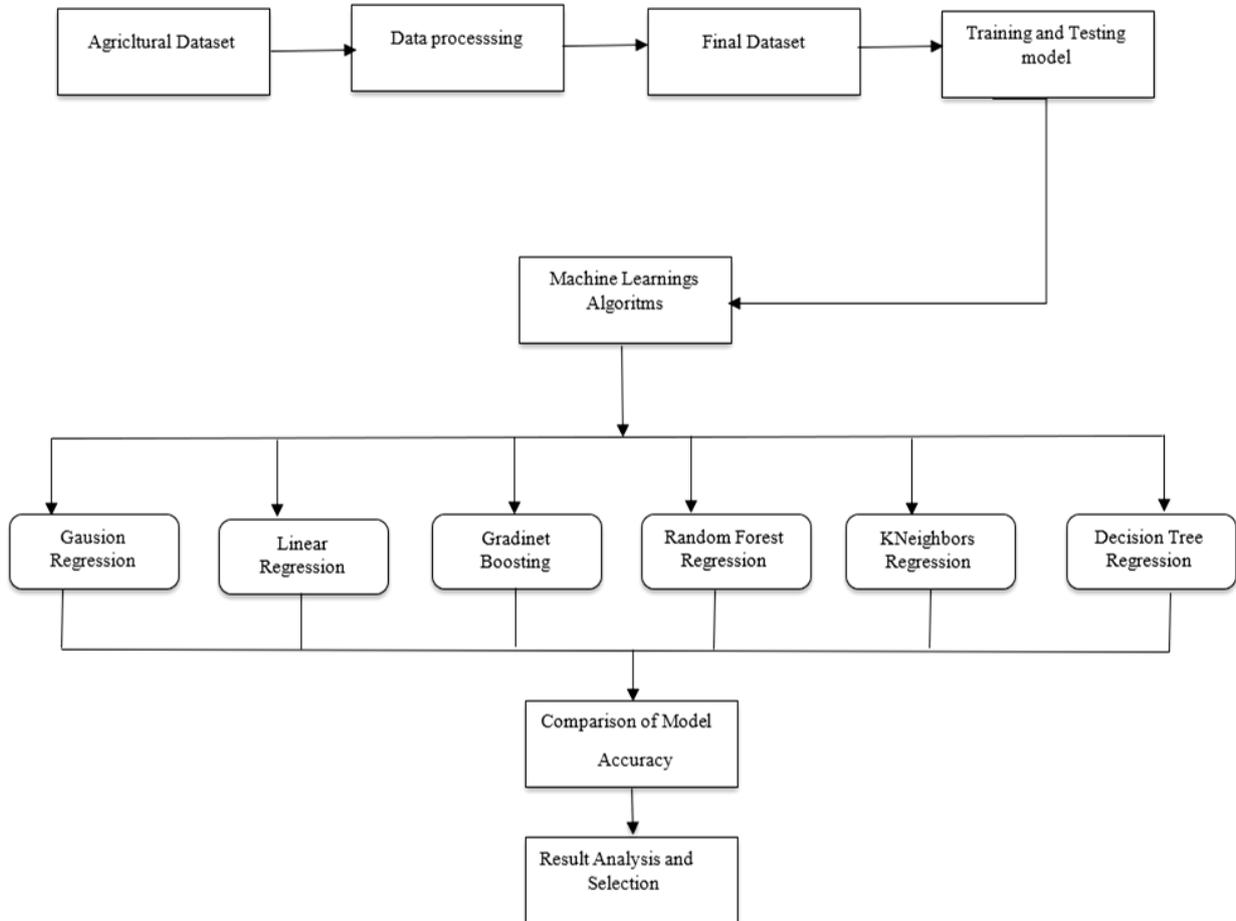


Fig. 2. Block Diagram of Proposed system

Results and Discussion

The effectiveness of each model is evaluated based on Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and the coefficient of determination (R-squared index) Values. As described in Table 1 among the evaluated models, GradientBoostingRegres-

sor and DecisionTreeregressor demonstrate relatively higher R2 values compared to others, indicating higher prediction accuracy. In addition, both Gradient Boosting Regression and Decision Tree regression exhibit lower RMSE and MAE values, which on average indicate lower prediction errors.

While GradientBoostingRegressor achieves the highest R-squared score of 90%, indicating a best fit to the data compared to other models. DecisionTreeRegressor follows with an R-squared score of 85%, which makes it the second best model. Linear Regression indicates a relatively high R-squared scores of 75%, outperforming the RandomForestRegressor with 68%. Meanwhile, the KNeighborsRegressor and GaussianProcessRegressor achieve R-squared scores of 66% and 51%, respectively, showing that they also perform reasonably well, though less effectively than the other models.

Table 1

Model Performance Comparison

Models	RMSE	MAE	(R ²) score(%)
GradientBoostingRegressor	0.04	0.03	0.90
RandomForestRegressor	0.08	0.06	0.68
DecisionTreeRegressor	0.05	0.03	0.85
GaussianProcessRegressor	0.09	0.06	0.51
KNeighborsRegressor	0.08	0.05	0.66
Linear Regression	0.07	0.05	0.75

These results provide valuable information on the comparative effectiveness of various regression models, allowing stakeholders to select the most appropriate model for predicting crop yields based on specific requirements and preferences.

Table 2 summarizes the hyperparameters chosen for the GradientBoostingRegressor model. The chosen configurations, such as 0.1 learning_rate and 200 n_estimators, were carefully chosen to strike a balance between model complexity and performance. Overfitting is reduced by setting a max_depth of 3 and a subsample rate of 0.8, which limits tree complexity and introduces randomization into data sampling. Using a min_sample_split value of 2 and a min_sample_leaf

value of 1, the model performs well in generalization while capturing detailed patterns. By reducing variance, the usage of max_features set to 'sqrt' ensures that a subset of features is considered for each split, increasing model robustness. In order to achieve the best possible balance between generalization and accuracy, these hyperparameters were selected using domain expertise and the model's performance on the validation set.

Table 2

GradientBoostingRegressor parameters used for prediction

Parameters	Values
Learning Rate	0.1
N Estimators	200
Max Depth	3
Min Samples Split	2
Min Samples Leaf	1
Subsamples	0.8
Max Features	sqrt

The scatter plot in Fig. 3 clearly shows that there is a good correlation between actual and predicted Yield, with the majority of the data points closely following a predicted straight line. Even though there is a wide range of data points between 500 and 3,000 kg/ha, where the models showed higher reliability, for yield exceeds 3,000 kg/ha, there is a significant amount of variability, which indicates some prediction errors. These errors are likely due to a lack of sufficient training data outside the 500 to 3,000 kg/ha range.

Additionally Mean Absolute percentage error (MAPE) is evaluated for evaluating the accuracy of the models and 11% MAPE value is a reasonably good level of success in predicting agricultural yield; although there is still a room for improvement, particularly in reducing prediction errors for higher yield values.

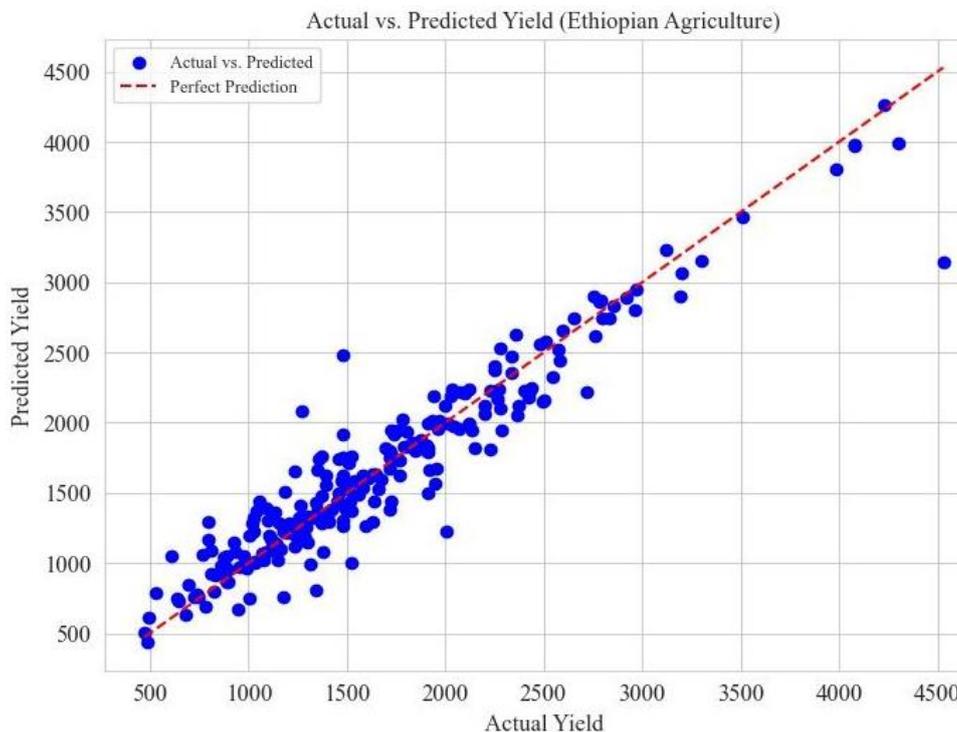


Fig. 3. Actual vs Predicted Yield

Conclusion

There is a lot of promise for increasing agricultural production and food security in Ethiopia through the use of machine learning techniques for crop yield prediction.

The study proposed a GradientBoostingRegressor as the best model for predicting crop yields in Ethiopia based on historical weather, Agricultural and pesticide data. This study achieved RMSE of 0.04, MAE of 0.03, and R2 value of 0.90. DecisionTree regressor also showed good performance characteristics and could also be expanded on further to obtain better results. Future studies should evaluate more machine learning models and algorithms on the large and accurate dataset which include other factors like soil quality and irrigation pattern to improve the performance of the models. Additionally, remote sensing data can be merged with statistical data to improve the model's performance. Farmers and policy makers can make informed decisions to optimize crop management practices, reduce risks, and improve overall farming outcomes using historical data and advanced algorithms. Further research and funding in the field of machine language-based crop forecasting is needed to address the various obstacles and prospects that exist in Ethiopia's diverse agricultural sector.

References

1. Agriculture and Food Security. Available at: <https://www.usaid.gov/ethiopia/agriculture-and-food-security>, free (Accessed: July 24, 2024).
2. Taffesse A.S., Dorosh P.A., Asrat S. (2014). Crop production in Ethiopia: Regional Patterns and Trends. In University of Pennsylvania Press eBooks. <https://doi.org/10.9783/9780812208610.53>.
3. Mekecha B.B. Analyzing climate and agricultural factors for yield prediction of key cereal crops in Ethiopia: A visual analysis (1995–2021). *Modelling and Data Analysis*, 2024, vol. 14 (1), pp. 196–208. DOI: 10.17759/mda.2024140112.
4. Guo Z., Chamberlin J., You L. Smallholder Maize yield estimation using satellite data and machine learning in Ethiopia. *Crop and Environment*, 2023, vol. 2(4), pp. 165–174. DOI: 10.1016/j.crope.2023.07.002.
5. Shiferaw H., Getachew T., Sewnet H., Tamene L. Crop Yield Estimation of Teff (*Eragrostis tef* Zuccagni) Using Geospatial Technology and Machine Learning Algorithm in the Central Highlands of Ethiopia. *Sustainable Agriculture Research*, 2022, vol. 11 (1), p. 34. <https://doi.org/10.5539/sar.v11n1p34>
6. Araújo S.O. et al. Machine learning applications in agriculture: Current trends, challenges, and future perspectives. *Agronomy*, 2023, vol. 13 (12), p. 2976. DOI: 10.3390/agronomy13122976.
7. Dawn Nabarun, Ghosh Tania, Ghosh Souptik, Saha Alope, Mukherjee, Pronoy, Sarkar Subhajit, Guha Sagnik, Sanyal Tanmay. Implementation of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Internet of Things (IoT) in revolutionizing Agriculture: A review on recent trends and challenges. *International Journal of Experimental Research and Review*, 2023, no. 30, pp. 190–218.
8. Liben F., Abera W., Chernet M.T., Ebrahim M., Tilaye A., Erkossa T., Degefie T.D., Mponela P., Kihara J., Tamene L. Site-specific fertilizer recommendation using data driven machine learning enhanced wheat productivity and resource use efficiency. *Field Crops Research*, 2024, 313 p. 109413.
9. Ayalew A.T., Lohani T.K. Prediction of Crop Yield by Support Vector Machine Coupled with Deep Learning Algorithm Procedures in Lower Kulfo Watershed of Ethiopia. *Journal of Engineering*, 2023, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2023/6675523>.
10. Tefera H.A., Dong-Jun H., Njagi K. Implementation of IoT and machine learning for smart farming monitoring system. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 2020, vol. 52 (1), pp. 6–77.
11. Yang Meijian, Wang Guiling, Wu Shu, Block Paul, Lazin Rehenuma, Alexander Sarah, Lala Jonathan, Haider Muhammad Rezaul, Dokou Zoi, Atsbeha Ezana, Koukoula Marika, Shen Xinyi, Peña Malaquias, Nikolopoulos Efthymios, Bagtzoglou Amvrossios, Anagnostou Emmanouil. Seasonal prediction of crop yields in Ethiopia using an analog approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, vol. 331, p. 109347. DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109347.
12. Mann M., Warner J.M., Malik A. Predicting high-magnitude, low-frequency crop losses using machine learning: an application to cereal crops in Ethiopia. *Climatic Change*, 2019, no. 154 (1–2), pp. 211–227. DOI: 10.1007/s10584-019-02432-7.
13. Central Statistical Agency (CSA). 1996–2022. Agricultural Sample Survey. Vol. 1: Report on Area and Production of Major Crops (Private Peasant Holdings, Meher Season), 1994/95 (1987 E.C.). Statistical Bulletin, Addis Ababa. Available at: <https://www.statsethiopia.gov.et/our-survey-reports>, free/ (Accessed: November 10, 2024).
14. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996–2022. FAOSTAT statistical database. Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>, free (Accessed: November 10, 2024).
15. World Bank. (1996–2022). Climate Change Knowledge Portal. World Bank. Available at: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>, free (Accessed: November 10, 2024).

Banchigize B. Mekecha

Postgraduate student, Department of Computer-Aided Engineering and Design, Institute of Information Technologies and Computer Sciences, University of Science and Technology MISIS 4, Leninskiy pr., Moscow, Russia, 119049
ORCID: 0000-0002-4552-6677
Phone: +7-968-018-28-54
Email: banwoman@gmail.com

Alexander V. Gorbatov

Doctor of Engineering, Professor, Department of Computer-Aided Engineering and Design, Institute of Information Technologies and Computer Sciences, University of Science and Technology MISIS 4, Leninskiy pr., Moscow, Russia, 119049
ORCID: 0000-0002-5061-4831
Phone: +7-926-881-19-73
Email: avgorbatov@mail.ru

Мекеча Б.Б., Горбатов А.В.

Прогнозирование урожайности в Эфиопии с использованием градиентной регрессии

В настоящее время алгоритмы и методы машинного обучения используются во многих областях исследований для достижения практических и продуктивных решений.

Сельское хозяйство является одной из отраслей, где влияние является значительным, особенно в области прогнозирования урожайности и выбора сельскохозяйственных культур, что имеет решающее значение для обеспечения продовольственной безопасности и совершенствования методов ведения сельского хозяйства. В такой стране, как Эфиопия, где экономика в значительной степени зависит от сельского хозяйства и, в частности, от фермерства в целом, использование возможностей искусственного интеллекта и машинного обучения имеет решающее значение. Однако использование этих технологий в сельском хозяйстве Эфиопии остается ограниченным, главным образом, из-за отсутствия хорошо организованных и цифровых наборов данных и технологических достижений.

Целью данного исследования является повышение точности прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в Эфиопии и предоставление информации, которая может помочь фермерам и политикам повысить урожайность сельскохозяйственных культур. В этом исследовании была разработана модель прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе исторических данных, которая включает такие факторы, как тип культуры, количество осадков, температура, площадь посева, производство и пестициды.

Среди алгоритмов, рассмотренных в этом исследовании, регрессия с ускорением градиента достигла самого высокого значения R-квадрата – 90% по сравнению с другими, что свидетельствует о его наилучшей прогностической способности. Однако в исследовании также признаются контекстуальные преимущества других алгоритмов, подчеркивая важность выбора моделей, подходящих для кон-

кретных наборов данных и целей. Точность и эффективность сельскохозяйственного планирования и распределения ресурсов в Эфиопии могут быть значительно повышены за счет использования методов машинного обучения для прогнозирования производства сельскохозяйственных культур.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-125-129

Мекеча Банчигизе Базезев

Аспирантка каф. автоматизированного проектирования и дизайна (АПД) Института информационных технологий и компьютерных наук (ИТКН) Университета науки и технологий МИСИС Ленинский пр-т, 4, г. Москва, Россия, 119049
ORCID: 0000-0002-4552-6677
Тел.: +7-968-018-28-54
Эл. почта: banwoman@gmail.com,

Горбатов Александр Вячеславович

Д-р техн. наук, проф., зав каф. АПД ИТКН Университета науки и технологий МИСИС Ленинский пр-т, 4, г. Москва, Россия, 119049
ORCID: 0000-0002-5061-4831
Тел.: +7-926-881-19-73
Эл. почта: avgorbatov@mail.ru

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.314.1

В.И. Авдзейко, А.А. Дроздова, В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов

Анализ способов формирования дискретных зон в конверторах с многозонным регулированием выходных параметров

Источники электропитания, работающие в ключевом режиме работы, создают импульсный характер потребляемого тока, приводящего к возникновению пульсаций тока и напряжения в питающей сети и на входе подключаемых потребителей. Традиционные схемы конверторов строятся на основе однотактных преобразователей или инверторов с полным диапазоном регулирования выходных параметров. Силовые элементы данных конверторов рассчитываются на полную мощность преобразуемой электрической энергии, а на выходе регулируемого инвертора формируется импульсное напряжение, амплитуда и длительность которого оказывают значительное влияние на параметры входных и выходных фильтров. Одним из эффективных путей снижения этого влияния является способ многозонного регулирования, основанный на разбиении диапазона регулирования на несколько зон. Проведен сравнительный анализ данных вариантов конверторов по размаху пульсаций тока дросселей и напряжения на конденсаторах фильтров, по величине тока ключей, а также по условиям возникновения режима прерывистых токов в зависимости от количества зон. Доказано преимущество разбиения диапазона регулирования на зоны с равномерным шагом квантования, а также эффективность этих схем по сравнению с конверторами с полной и неполной глубиной модуляции регулируемого параметра. Анализ вариантов схем с равномерными и неравномерными шагами квантования проведен на моделях, построенных с помощью программы MatLab Simulink.

Ключевые слова: конвертор, пульсации тока и напряжения, многозонное регулирование, импульсная составляющая, прерывистые токи, диапазон регулирования.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-133-139

В системах электропитания (СЭП) согласование параметров первичных источников электропитания с входными параметрами подключаемых потребителей обеспечивается статическими преобразователями. В СЭП постоянного тока эту задачу выполняют конверторы – преобразователи постоянного тока в постоянный ток (DC/DC). Снижение влияния конверторов, работающих в ключевом режиме работы, на питающую сеть и на работу потребителей обеспечивается сглаживающими входными и выходными фильтрами [1]. Традиционные схемы конверторов выполняются на однотактных, двухтактных или мостовых схемах, а регулирование выходных параметров осуществляется путем изменения длительности работы ключей от нуля до максимальной величины. Преобразователи с полным диапазоном регулирования получили название устройств с полной глубиной модуляции [2, 3], их силовые элементы рассчитываются из условия преобразования, регулирования и фильтрации полной мощности нагрузки, а напряжение на входе выходного фильтра содержит только регулируемую импульсную составляющую (U_{per}), амплитуда и длительность которой влияет на величину индуктивности и емкости входных и выходных фильтров.

Схемы с неполной глубиной модуляции позволяют уменьшить параметры фильтров [4–6], у которых осуществляется регулирование только части преобразуемой электрической энергии, а на входе выходного фильтра формируется напряжение, содержащее нерегулируемую постоянную (U_{np}) и регулируемую импульсную (U_{per}) составляющие. Нерегулируемая составляющая не требует фильтрации, а амплитуда и длительность регулируемой составляющей выбираются из условия обеспечения требуемого диапазона регулирования и не превышают 20% [4]. Недостатки подобных схем заключаются в ограниченном диапа-

зоне регулирования, в необходимости использования дополнительного внешнего источника электропитания и гальванической связи входных и выходных цепей.

Увеличить диапазон регулирования выходного напряжения преобразователей при снижении амплитуды импульсной составляющей позволяют способы многозонного широтно-импульсного регулирования (МР), предложенные и разработанные коллективом сотрудников ТУСУРа (г. Томск) под руководством профессора А.В. Кобзева [7, 8]. Принцип МР заключается в разбиении диапазона регулирования на несколько зон. Дискретное изменение выходного напряжения осуществляется путем переключения из одной зоны в другую, а внутри каждой зоны – с помощью широтно-импульсного регулирования [8, 9]. Преимущество и перспективность использования способов МР в преобразовательной технике обоснованы в публикациях [2, 3, 10–18].

Цель работы – анализ способов формирования дискретных зон в конверторах с многозонным регулированием выходных параметров.

Актуальность результатов проведенных исследований заключается в разработке перспективных способов МР выходного напряжения конверторов, обеспечивающих увеличение диапазона регулирования при снижении параметров силовых элементов.

Новизна исследований способов МР подтверждается использованием в качестве критерия оценки параметров элементов относительной импульсной составляющей; результатами анализа способов формирования зон; установленными зависимостями размаха пульсаций, тока регулируемых ключей, диапазона регулирования выходного напряжения и условий возникновения режимов прерывистых токов для исследуемых способов при изменении количества зон;

доказательством эффективности способов МР в СЭП постоянного тока средней и повышенной мощности.

Анализ способов формирования зон

Способы формирования дискретных зон в зависимости от метода квантования подразделяются на два – с равномерным и неравномерным шагом квантования. При первом способе все формируемые зоны выбираются равными, поэтому величина относительной импульсной составляющей в процессе регулирования изменяется ($n = U_{\text{рег}}/U_{\text{нр}} = \text{var}$), а во втором в каждой зоне величина относительной импульсной составляющей поддерживается постоянной ($n = U_{\text{рег}}/U_{\text{нр}} = \text{const}$).

В зависимости от способа формирования зон и их количества меняются величина относительной импульсной составляющей, размах пульсаций тока дросселей и напряжения на конденсаторах фильтров, а также амплитуда тока ключей регулируемых инверторов. Для определения зависимости величины относительной импульсной составляющей от количества зон и выбора оптимального варианта проведен сравнительный анализ способов $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$. Особенность исследуемых вариантов заключается в формировании нерегулируемой составляющей $U_{\text{нр}}$ в первой зоне, напряжение которой выбирается в соответствии с выражением

$$\sum U_{\text{нр}} = U_{\text{max}}/k, \tag{1}$$

где $k = l+1$ – общее количество зон; l – количество регулируемых зон; $U_{\text{max}}=U_{\text{нр}} + U_l$ – максимальное напряжение на выходе выпрямителя.

Для способа $n = \text{const}$, напряжение формируемых зон можно представить с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{\text{нр}} + U_{\text{нр}} n = U_{\text{нр}} (1+n); \\ U_2 &= U_1 + U_1 n = U_{\text{нр}} (1+n)^2; \\ U_3 &= U_2 + U_2 n = U_{\text{нр}} (1+n)^2 + (1+n); \\ &\dots\dots\dots; \\ U_i &= U_{\text{нр}} (1+n)^k, \end{aligned} \tag{2}$$

где U_i – верхняя зона.

В табл. 1 приведены значения относительной импульсной составляющей, величина напряжения формируемых уровней, рассчитанные по выражению (2), и диапазон регулирования выходного напряжения (8) для количества регулируемых зон от 2 до 5 для способа $n = \text{const}$.

При способе $n = \text{var}$ весь диапазон регулирования выходного напряжения разбивается на равное количество зон, а первая зона выполняется нерегулируемой. Напряжение для каждой формируемой зоны можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{\text{нр}} + \Delta U; \\ U_2 &= U_1 + \Delta U = U_{\text{нр}} + 2\Delta U; \\ U_3 &= U_2 + \Delta U = U_{\text{нр}} + 3\Delta U; \\ &\dots\dots\dots; \\ U_i &= U_{\text{нр}} + \Delta U i, \end{aligned} \tag{3}$$

где ΔU – шаг квантования по уровню.

В соответствии с (3) в табл. 1 представлены значения n , напряжения формируемых уровней и диапазон регулирования выходного напряжения для количества регулируемых зон от 2 до 5 для способа $n = \text{var}$.

Оба способа позволяют получить равные диапазоны регулирования выходного напряжения при одинаковом количестве зон.

Таблица 1

Относительные величины импульсной составляющей и формируемых уровней напряжения для способов $n=\text{const}$ и $n = \text{var}$ при изменении количества регулируемых зон

Кол-во формируемых зон, l	$l=2$		$l=3$			$l=4$				$l=5$				
Диапазон регулирования, δ	0,67		0,75			0,8				0,83				
$n = \text{const}$														
Относительная импульсная составляющая, n	0,75		0,6			0,5				0,43				
Относительная величина формируемых уровней напряжения, U_i	0,57	1,0	0,39	0,62	1,0	0,30	0,44	0,66	1,0	0,24	0,34	0,49	0,69	1,00
$n = \text{var}$														
Относительная импульсная составляющая, n	1,0	0,5	1,0	0,5	0,3	1,0	0,5	0,33	0,25	1,0	0,5	0,33	0,25	0,2
Относительная величина формируемых уровней напряжения, U_i	0,67	1,0	0,5	0,75	1,0	0,4	0,6	0,8	1,0	0,33	0,5	0,67	0,83	1,0

При способе $n = \text{const}$ величина относительной импульсной составляющей остается постоянной, а при $n = \text{var}$ она уменьшается при переходе из низшей в более верхнюю зону при неизменном количестве l . Для выявления зависимости параметров элементов схем от n выбран метод исследования конвертора на схемотехнической модели, созданной с помощью программы MATLAB Simulink, позволяющий учитывать большое количество переменных [19–22].

Принцип формирования выходного напряжения конвертора с МР

На рис. 1 приведена упрощенная схема конвертора с МР. В ее состав входят: входной фильтр ($L1$,

$C1$), инверторы напряжения ($I1, I2$ и $I3$) с выходными трансформаторами $Tr1, Tr2$ и $Tr3$, выходные обмотки которых w_{12}, w_{22} и w_{32} соединены последовательно и включены на вход выпрямителя ($D1–D4$), к выходу которого через выходной фильтр ($L2, C2$) подключена нагрузка R_n .

Формирование зон основано на суммировании выходных напряжений мостовых инверторов путем последовательного соединения их вторичных обмоток и осуществляется следующим образом. Первый инвертор $I1$ работает в нерегулируемом режиме и формирует на нагрузке нерегулируемую составляющую выходного напряжения $U_{\text{нр}1} = U_l/k$. Выходное

напряжение остальных инверторов может быть равным нулю или суммироваться с выходными напряжениями вторичных обмоток и, соответственно, формирует последовательно – нулевое, регулируемое и нерегулируемое по длительности напряжение со 180-градусным управлением.

В первой зоне работает только инвертор И1, напряжение на входе выпрямителя равно U_1 . Алгоритм работы ключей инверторов И2 и И3 обеспечивает нулевое напряжение на выходных обмотках w_{22} и w_{32} . Во второй зоне инвертор И1 формирует напряжение U_1 , а инвертор И2 работает в режиме с широтно-импульсным регулированием. На вход выпрямителя поступает суммарное напряжение U_1+U_2 , выходное напряжение инвертора И3 равно нулю. В третьей зоне инверторы И1 и И2 переключаются синфазно со 180-градусным управлением, нерегулируемая составляющая на входе выпрямителя равна $U_{нр} = U_1+U_2$. Инвертор И3 формирует регулируемое по длительности напряжение U_3 , которое суммируется с напряжениями U_1 и U_2 . Далее процесс, при наличии дополнительных инверторов, происходит аналогично. Диапазон регулирования выходного напряжения $\delta = U_{пер}/U_{пер}+U_{нр}$ и величина относитель-

ной импульсной составляющей $n_i = U_{пер i}/U_{нр i}$ в каждой зоне зависят от способа формирования зон и от их количества.

В связи с тем, что амплитуда и длительность импульсной составляющей прямо пропорциональны размаху пульсаций на элементах фильтров и току ключей инверторов, ее относительная величина выбрана в качестве критерия оценки эффективности способов регулирования выходного напряжения конверторов.

Исследование влияние величины относительной регулируемой импульсной составляющей на параметры элементов многозонного конвертора

Установление зависимости размаха пульсаций тока дросселей, напряжения на конденсаторах фильтров и тока регулируемых ключей инверторов от импульсной составляющей и от количества и способа формирования дискретных зон выполнено с помощью схемотехнической модели конвертора с МР (рис. 1), созданной с помощью программы MatLab Simulink, позволяющей учитывать большое количество переменных [19, 20].

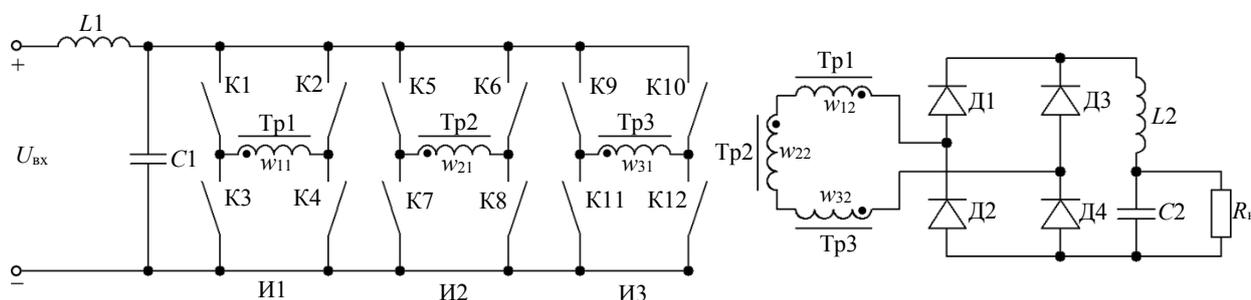


Рис. 1. Упрощенная силовая схема конвертора с МР

В процессе исследования выбраны следующие параметры схемы: входное и выходное напряжение конвертора равно 300 В, максимальная мощность нагрузки 1000 ВА, номинальное выходное напряжение 225 В, частота коммутации регулируемого инвертора равна $f = 10$ кГц, сопротивление нагрузки $R_n = 87,23$ Ом, $L1 = 1,1$ мГн, $C1 = 80$ мкФ, $L2 = 1,2$ мГн, $C2 = 65$ мкФ. Предварительный расчет параметров фильтров выполнен с помощью формул, приведенных в статье [18]. Параметры фильтров выбраны из следующих условий: размах пульсаций потребляемого тока ($\Delta I_n = \Delta I_{L1}$) во всех режимах не должен превышать 0,1% $I_{n \max}$, а размах пульсаций напряжения на конденсаторах (ΔU_{C1} и ΔU_{C2}) не должен превышать 0,1% $U_{n \max}$ во всем диапазоне регулирования выходного напряжения. При разработке модели приняты допущения об идеальности всех элементов схемы и неизменности тока нагрузки и напряжения питания в период проведения измерений.

На рис. 2 приведены диаграммы напряжения и токов на элементах входных и выходных фильтров при двух зонах регулирования: $n = const = U_{пер}/U_{нр} = 0,33$ и $\Delta U = 100$ В. Ток дросселя $L1$ содержит постоянную составляющую тока потребления $I_{потр}$ и импульсную ΔI_{L1} , характеризующую влияние конвертора на питающую сеть. Напряжение на конденсаторе $C1$ ($U_{вх}$) является напряжением питания инверторов И1–И3. Ток

дросселя $L2$ содержит постоянную составляющую, равную току нагрузки, и импульсную составляющую, влияющую, как будет показано ниже, на возникновение режима прерывистых токов в дросселе $L2$. U_{C2} является напряжением питания потребителей, а размах пульсации напряжения ΔU_{C2} ограничивается требованиями потребителя и ТУ конденсаторов.

Первый нерегулируемый инвертор при $n = const$ и $n = var$ выполняется со 180-градусным управлением и формирует нерегулируемую составляющую с амплитудой U_{max}/k в форме напряжения на выходе выпрямителя. Алгоритм работы регулируемых инверторов при переходе из нижней в верхнюю зону приведен выше. Амплитудные значения напряжений формируемых зон и напряжений на вторичных обмотках трансформаторов инверторов, в зависимости от количества регулируемых зон и способа их формирования, в процессе моделирования устанавливались в соответствии с данными, приведенными в табл. 1.

Исследования показали, что размах пульсаций тока дросселей и напряжения на конденсаторах фильтров достигает максимальных значений при работе схемы в верхнем диапазоне регулирования при формировании любого количества l при длительности регулируемого импульса $\Theta = T/4$. На рис. 3 приведены графики размаха пульсаций на элементах фильтров

при $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$ по критерию относительной импульсной составляющей.

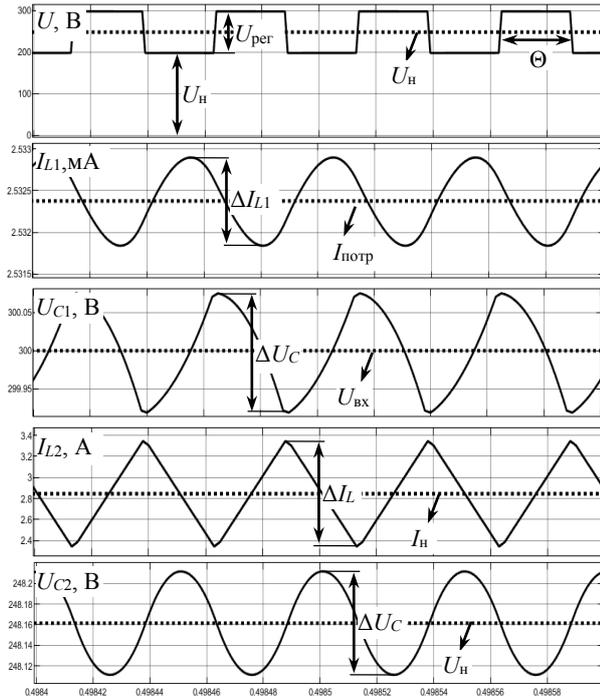


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов на элементах фильтров

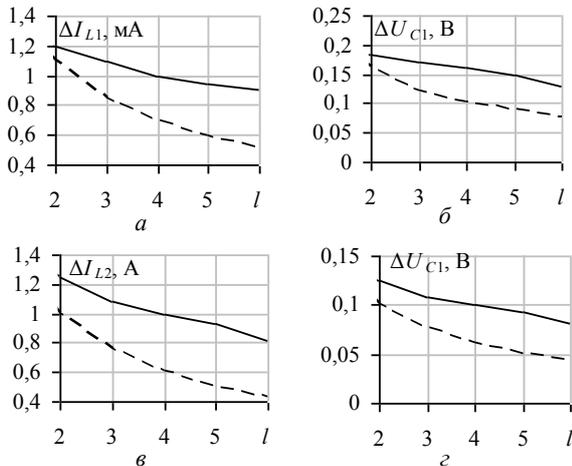


Рис. 3. Размах пульсаций на элементах входного (а, б) и выходного (в, г) фильтров при увеличении количества регулируемых зон для способа $n = \text{const}$ (—) и $n = \text{var}$ (---)

Из рис. 3 видно, что при $n = \text{const}$ в диапазоне изменения l от 2 до 6 размах пульсаций тока дросселя (ΔI_{L1}) и напряжения на конденсаторе (ΔU_{C1}) входного фильтра уменьшается в 1,4 раза, а на элементах выходного фильтра – в 1,5 раза. Для $n = \text{var}$ размах пульсаций тока дросселя (ΔI_{L1}) и напряжения на конденсаторе (ΔU_{C1}) входного фильтра с ростом l от 2 до 6 уменьшается в 2,7 раза, а на элементах выходного фильтра (ΔI_{L2} и ΔU_{C2}) – в 3,5 раза. Эффективность способа формирования дискретных зон при $n = \text{var}$ увеличивается с ростом количества формируемых зон.

Исследование режимов прерывистых токов

Ток дросселя выходного фильтра I_{L2} , как показано на рис. 4, содержит импульсную ΔI_{L2} и постоянную составляющие $I_L = I_H$.

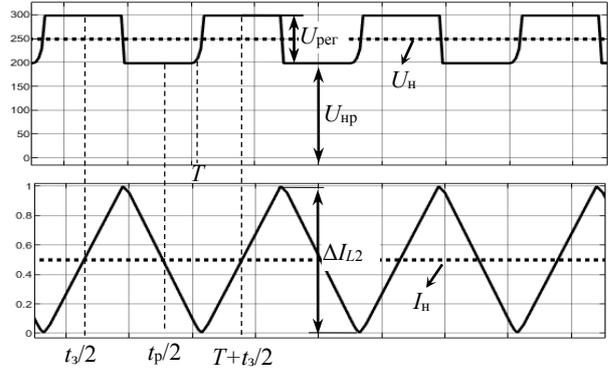


Рис. 4. Диаграммы напряжения на входе выходного фильтра и ток дросселя $L2$ при возникновении режима прерывистых токов

Постоянная составляющая определяется напряжением на нагрузке U_H и сопротивлением нагрузки R_H , а импульсная – амплитудой и длительностью импульсной составляющей U_{per} на входе выходного фильтра. В промежутке времени от $t_3/2$ до $t_p/2$ ток пульсации ΔI_{L2} суммируется с током нагрузки I_H , а на отрезке времени от $t_p/2$ до $T + t_3/2$ вычитается из тока нагрузки. При уменьшении тока нагрузки постоянная составляющая I_H также снижается, и при условии равенства $I_H = \Delta I_{L2}/2$ ток дросселя становится равным нулю и возникает режим прерывистых токов.

На рис. 5 представлены расчетные значения минимального тока нагрузки в зависимости от количества регулируемых зон, при которых возникает режим прерывистых токов для способов $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$.

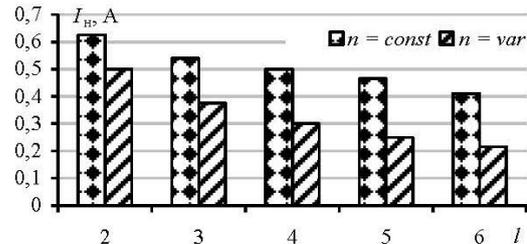


Рис. 5. Минимальные значения тока нагрузки при которых возникает режим прерывистых токов при изменении l для $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$

Способ $n = \text{var}$ обеспечивает меньшую величину пульсации тока дросселя при изменении тока нагрузки и увеличении l , чем при $n = \text{const}$. В соответствии с рис. 4 при $l = 2$ диапазон изменения тока нагрузки находится в пределах от 0,625 до 3,44 А ($\delta = 0,818$) при $n = \text{const}$ и от 0,5 до 3,44 А ($\delta = 0,855$) при $n = \text{var}$, а при $l = 5$ $I_{H \text{ min}} = 0,465$ А ($\delta = 0,881$) при $n = \text{const}$ и 0,25 А ($\delta = 0,927$) при $n = \text{var}$.

Таким образом, оба способа МР позволяют увеличивать диапазон регулирования тока нагрузки, но способ $n = \text{var}$ обеспечивает меньшую величину пульсации тока дросселя и больший диапазон регулирования тока нагрузки, чем способ $n = \text{const}$.

Исследование влияния количества зон на величину тока ключей регулируемых инверторов

При МР ток ключей регулируемых инверторов зависит от количества зон и способа их формирования. Ключи нерегулируемых инверторов переключаются со 180-градусным управлением. На рис. 6 при-

ведены средние значения тока ключей при изменении количества зон для обоих способов их формирования.

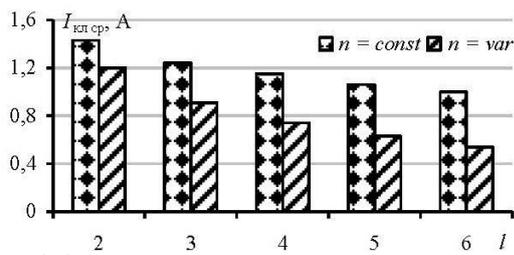


Рис. 6. Средние значения тока регулируемых ключей инверторов при изменении l для $n = const$ и $n = var$ при номинальной мощности нагрузки

Преимущество способа формирования дискретных зон $n = var$, по сравнению со способом $n = const$, возрастает при увеличении количества регулируемых зон. Если при $l = 2$ средний ток ключа в 1,2 раза меньше для $n = var$, чем при $n = const$, то при $l = 6$ разница составляет 1,85 раза.

Оценка эффективности МР

Оценка эффективности конвертора с МР, по сравнению со схемами с полной и неполной глубиной модуляции, проведена при использовании схемы, приведенной на рис. 1. Схема с полной глубиной модуляции получается при использовании только одного регулируемого инвертора напряжения И1 с выходным трансформатором. Напряжение на входе выходного фильтра в этой схеме имеет только регулируемую импульсную составляющую $U_{рег}$. Схема с не-

полной глубиной модуляции содержит два инвертора напряжения: И1 и И2. Инвертор И1 выполняется со 180-градусным управлением и формирует на входе выходного фильтра постоянную составляющую напряжения, а выходное напряжение И2 регулируется от 0 до 180 градусов и формирует регулируемую составляющую напряжения $U_{рег}$, амплитуда которого задается требуемым диапазоном регулирования.

При диапазоне регулирования $\delta = 0,5$ амплитуды регулируемой и нерегулируемой составляющими равны. Схемы с многозонным регулированием при двух регулируемых зонах содержат один нерегулируемый инвертор И1 с выходным напряжением 100 В и два поочередно включаемых в регулируемый режим инверторов И2 и И3. Увеличение зон регулирования обеспечивалось путем соответствующего увеличения количества инверторов напряжения. Результаты сравнения сведены в табл. 2.

Схема с неполной глубиной модуляции позволяет уменьшить размах пульсаций и минимальный ток на 50%, а ток ключей – в 2,2 раза, по сравнению со схемой с полной глубиной модуляции. Схема с МР при 2 регулируемых зонах позволяет уменьшить размах пульсации входного тока в 1,9 раза, а пульсации ΔI_{L2} , ΔU_{C1} , ΔU_{C2} и ток нагрузки – более 2 раз, ток ключей в 3,17 раза. Увеличение регулируемых зон до 5 позволяет снизить размах пульсаций на элементах входного фильтра в 3,5 раза, ΔI_{L2} , ΔU_{C2} и ток нагрузки – в 4,5 раза, ток ключей в 6 раз. Значения $I_{н}$ в табл. 2 отражают минимальный ток нагрузки.

Таблица 2

Снижение показателей схем с неполной глубиной модуляции и схемы с МР по сравнению со схемой с полной глубиной модуляцией, в раз

Сравниваемые показатели	Схема с неполной модуляцией, $U_{нр} = U_{рег}$	Схема с многозонной модуляцией, $n = var$	
		$l = 2$	$l = 5$
Размах пульсации потребляемого тока	1,50	1,91	3,56
Размах пульсации напряжения питания инверторов	1,57	2,06	3,67
Размах пульсации тока дросселя выходного фильтра	1,50	2,27	4,54
Размах пульсации выходного напряжения	1,52	2,30	4,60
Ток ключей регулируемых инверторов	2,18	3,17	6,03
Минимальный ток нагрузки, при котором возникает режим прерывистых токов	1,50	2,27	4,54

При полной глубине модуляции (режим ключа) диапазон регулирования обеспечивается от 1,135 до 3,44 А, при работе только с одной регулируемой зоной (неполная глубина модуляции) – от 0,755 до 3,44 А, а при двух зонах при $n = const$ – от 0,625 до 3,44 А и от 0,5 до 3,44 А при $n = var$.

Величина тока регулируемых ключей влияет на динамические потери в регулируемых инверторах. Размах пульсаций тока потребления характеризует влияние конвертора на питающую сеть, а размах пульсаций на конденсаторе С2 оказывает влияние на работу подключаемых потребителей.

Проведенное сравнение доказывает целесообразность применения многозонного регулирования в схемах конверторов средней и повышенной мощности. Основным недостатком схем с многозонным регулированием выходного напряжения заключается в увеличении количества силовых полупроводниковых приборов. Это необходимо учитывать при оптимизации структуры СЭП при заданном диапазоне регулирования выходных параметров.

Заключение

В работе выполнен анализ способа МР, основанного на разбиении полного диапазона регулирования на несколько дискретных зон, установлена зависимость способа формирования зон и их количества на величину элементов фильтров и ключей конвертора. Критериями для оценки параметров элементов конверторов выбраны амплитуда и относительная длительность регулируемой составляющей напряжения. Доказано, что формирование дискретных зон обеспечивает снижение параметров входных и выходных фильтров в СЭП постоянного тока. При этом способ МР эффективнее реализовывать с равномерным квантованием дискретных зон. Показано, что при МР за счет разбиения полного диапазона регулирования на несколько поддиапазонов достигается снижение влияния СЭП на питающую сеть и на работу подключаемых потребителей, а также уменьшение тока ключей регулируемых инверторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-00403, <https://rscf.ru/project/23-29-00403/>.

Литература

1. Григораш О.В. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения / О.В. Григораш, Ю.П. Степура, А.Е. Усков. – Краснодар: Кубанский гос. аграрный ун-т, 2011. – 188 с.

2. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С. Моин, Н.Н. Лаптев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.

3. Земан С. Анализ импульсно-модуляционных способов регулирования последовательного инвертора / С. Земан, А. Осипов // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 88–91.

4. Кобзев А.В. Энергетическая электроника: учеб. пособие / А.В. Кобзев, Б.И. Коновалов, В.Д. Семенов. – Томск: Том. межвуз. центр дистанционного образования, 2010. – 164 с.

5. Найвельт Г.С. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч.И. Хусаинов, Г.П. Затикян, Л.Н. Шаров, С.А. Кузнецов, В.А. Алексеев, Л.М. Киселев, В.И. Тихонов, Ю.Н. Шуваев. – М.: Радио и связь, 1985. – 576 с.

6. Malo S. Output Voltage Regulation of a High-Efficiency High Step-Up DC-DC Power Converter / S. Malo, R. Grino // Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales. – 2007. – P. 854–859. DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374709.

7. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.

8. Кобзев А.В. Модуляционные источники питания РЭА / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, Н.М. Музыченко. – Томск: Радио и связь, 1990. – 336 с.

9. Томасов В.С. Импульсные полупроводниковые преобразователи в системах управления приборных комплексов нового поколения // Научно-технический вестник Санкт-Петербург. гос. ин-та точной механики и оптики (технического ун-та). – 2003. – № 11. – С. 5–20.

10. Олещук И. Синхронная многозонная модуляция для регулирования силовых электронных преобразовательных систем на базе инверторов напряжения: обзор результатов последних исследований // Электронная обработка материалов. – 2022. – Т. 58, № 5. – С. 51–70.

11. Strzelecki R. Distribution Transformer with Multi-Zone Voltage Regulation for Smart Grid System Application / R. Strzelecki, W. Matelski, R. Małkowski, V. Tomasov, L. Wolski, A. Krahl // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – 2019. – P. 132–137. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764193.

12. Брылина О.Г. Статические и динамические спектральные характеристики многозонного преобразователя с частотно-широотно-импульсной модуляцией // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Энергетика. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 70–77.

13. Lusgin V.I. Energy-efficient installations of multi-zone multi-frequency induction heating of steel billets for large deformation / V.I. Lusgin, I.E. Lopatin, E.P. Shalina, A.Y. Petrov, S.M. Fatkhullin, I.G. Alekseev // Advanced Problems of Electrotechnology. – 2020. – No. 1. – P. 1–10.

14. Kosykh E. Analysis of the Control System for a Soft Starter of an Induction Motor Based on a Multi-Zone AC Voltage Converter / E. Kosykh, N. Udovichenko, N. Lopatkin, G. Zinoviev, E. Grishanov, R. Sarakhanova // Electronics. – 2023. – No. 12. – P. 1–24.

15. Mohsin M.H. Sinusoidal inverter using pulse width amplitude modulation / M.H. Mohsin, N.K. Alshamaa, A.H. Dalal, A.H. Sabah // The Fourth Postgraduate Engineering Conference. – 2020. – P. 1–7. DOI:10.1088/1757-899X/745/1/012022.

16. Bambang S. Improved voltage of cascaded inverters using sine quantization progression / S. Bambang, A. Mochamad, P. Mauridhi // TELKOMNIKA. – 2010. – Vol. 8, No. 2. – P. 123–130.

17. Анисимова Т.В. Инверторы с многозонной модуляцией / Т.В. Анисимова, А.Н. Данилина // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – № 52. – С. 1–15.

18. Авдзейко В.И. Расчет выходных фильтров систем электропитания с многозонным регулированием / В.И. Авдзейко, А.А. Дроздова, В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов // Электричество. – 2023. – № 9. – С. 31–37.

19. Martynyuk V.V. The Analysis of Energy Transition Processes in Boost Converter / V.V. Martynyuk, V.D. Kosenkov, O.V. Geydarova, M.V. Fedula // Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. – 2019. – Is. 77. – P. 17–29.

20. Cossart Q. Model reduction of converters for the analysis of 100% power electronics transmission systems / Q. Cossart, F. Colas, X. Kestelyn // 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 2018. – P. 1254–1259. DOI: 10.1109/ICIT.2018.8352358.

Авдзейко Владимир Игоревич

Канд. техн. наук, вед. н.с. отд. проектирования и развития инновационной инфраструктуры
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-6638-2684
Тел.: +7-909-546-48-86
Эл. почта: avdzeykovi@yandex.ru

Дроздова Анастасия Александровна

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9934-5006
Тел.: +7-999-619-37-70
Эл. почта: anastasiya.drozdova.00@list.ru

Рулевский Виктор Михайлович

Д-р техн. наук, ректор ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-3546-3921
Тел.: +7(382-2) 51-05-30
Эл. почта: rector@tusur.ru

Ляпунов Данил Юрьевич

Канд. техн. наук, инж. отд. № 13 Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9326-3595
Тел.: +7-903-913-61-37
Эл. почта: danillyapunov@yandex.ru

Avdzeiko V.I., Drozdova A.A.,
Rulevskiy V.M., Lyapunov D.Yu.

Analysis of methods to form discrete zone in converters with multi-zone control of output parameters

Power supplies operating in the key mode of operation create a pulsed character of current consumption, leading to current and voltage ripples in the supply network and at the input of connected consumers. Conventional converter circuits are based on single-cycle converters or inverters with full range of output parameters regulation. Power elements of these converters are calculated for the full power of the converted electrical energy, and at the output of the regulated inverter a pulse voltage is formed, the amplitude and duration of which have a significant impact on the parameters of input and output filters. One of the efficient ways to reduce this influence is the method of multi-zone regulation is based on the division of the regulation range into several zones. In the article, a comparative analysis of the given variants of converters is carried out in terms of the current ripple spread of inductors and voltage on filter capacitors, of the current value of keys, as well as of the conditions of intermittent currents occurrence depending on the number of zones. The advantage of dividing the control range into zones with uniform quantisation step is proved, as well as the efficiency of these schemes in comparison with converters with full and incomplete modulation depth of the regulated parameter. The analysis

of schemes variants with uniform and non-uniform quantisation steps is carried out on the models built with the help of MATLAB Simulink software.

Keywords: converter, current and voltage ripple, multi-zone regulation, pulse component, intermittent currents, regulation range.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-133-139

References

1. Grigorash O.V., Stepura Yu.P., Uskov A.E. *Statische preobrazovateli i stabilizatory avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya* [Static converters and stabilizers of autonomous power supply systems]. Publishing office of Kuban State Agrarian University, 2011, 188 p. (in Russ.).
2. Moin V.S., Laptev N.N. *Stabilizirovannyye tranzistornyye preobrazovateli* [Stabilized transistor converters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 376 p. (in Russ.).
3. Zeman S., Osipov A. *Analiz impul'sno-modulyatsionnykh sposobov regulirovaniya posledovatel'nogo invertora* [Analysis of pulse-modulation methods for regulating a series inverter]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2007, no. 4, pp. 88–91.
4. Kobzev A.V., Konovalov B.I., Semenov V.D. *Energeticheskaya elektronika: Uchebnoye posobiye* [Power Electronics: Textbook]. Tomsk, Tomsk Interuniversity Center for Distance Education Publ., 2010, 164 p. (in Russ.).
5. Naivelt G.S. et al. *Istochniki elektropitaniya ra-dioelektronnoy apparatury* [Power sources for radio-electronic equipment]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1985, 576 p. (in Russ.).
6. Malo S., Grino R. Output Voltage Regulation of a High-Efficiency High Step-Up DC-DC Power Converter. *Instituto de Orgazinación y Control de Sistemas Industriales*, 2007, pp. 854–859. DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374709.
7. Kobzev A.V. *Mnogozonnaya impul'snaya modulyatsiya* [Multi-zone pulse modulation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 304 p. (in Russ.).
8. Kobzev A.V., Mikhhalchenko G.Ya., Muzychenko N.M. *Modulyatsionnyye istochniki pitaniya REA* [Modulation power supplies for electronic equipment]. Tomsk, Radio and Communications Publ., 1990, 336 p. (in Russ.).
9. Tomasov V.S. *Impul'snyye poluprovodnikovyye preobrazovateli v sistemakh upravleniya pribornyykh kom-pleksov novogo pokoleniya* [Pulse semiconductor converters in control systems of new generation instrument complexes]. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta tochnoy mekhaniki i optiki (tekhnicheskogo universiteta)* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics published by ITMO University], 2003, no. 11, pp. 5–20 (in Russ.).
10. Oleshchuk I. Sinkhronnaya mnogozonnaya modulyatsiya dlya regulirovaniya silovykh elektronnykh preobrazovatel'nykh sistem na baze invertorov napryazheniya: obzor rezul'tatov poslednykh issledovaniy [Synchronous multi-zone modulation for regulation of power electronic converter systems based on voltage inverters: a review of the latest research results]. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials], 2022, vol. 58, no. 5, pp. 51–70 (in Russ.).
11. Strzelecki R., Strzelecki R., Matelski W., Małkowski R., Tomasov V., Wolski L., Krahel A. Distribution Transformer with Multi-Zone Voltage Regulation for Smart Grid System Application. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2019, pp. 132–137. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764193
12. Brylina O.G. *Sticheskiye i dinamicheskiye spek-tral'nyye kharakteristiki mnogozonnogo preobrazovatelya s chastotno-shirotno-impul'snoy modulyatsiyey* [Static and dynamic spectral characteristics of a multi-zone converter with frequency-pulse-width modulation]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 70–77 (in Russ.).
13. Lusgin V.I., Lopatin I.E., Shalina E.P., Petrov A.Y., Fatkhullin S.M., Alekseev I.G. Energy-efficient installations of multi-zone

multi-frequency induction heating of steel billets for large deformation. *Advanced Problems of Electrotechnology*, 2020, no. 1, pp. 1–10.

14. Kosykh E., Udovichenko N., Lopatkin N., Zinoviev G., Grishanov E., Sarakhanova R. Analysis of the Control System for a Soft Starter of an Induction Motor Based on a Multi-Zone AC Voltage Converter. *Electronics*, 2023, no. 12, pp. 1–24.

15. Mohsin M.H. Alshamaa N.K., Dalal A.H., Sabah A.H. Sinusoidal inverter using pulse width amplitude modulation. *The Fourth Postgraduate Engineering Conference*, 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/745/1/012022.

16. Bambang S., Mochamad A., Mauridhi P. Improved voltage of cascaded inverters using sine quantization progression. *TELKOMNIKA*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 123–130.

17. Anisimov T.V., Danilina A.N. *Inventory s mnogozonnoy modulyatsiyey* [Inverters with multi-zone modulation]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»* [Electronic Journal Proceedings of MAI], 2012, no. 52, p. 1–15 (in Russ.).

18. Avdzeiko V.I., Drozdova A.A., Rulevsky V.M., Lya-punov D.Yu. *Raschet vykhodnykh fil'trov sistem elektropitaniya s mnogozonnym regulirovaniyem* [Calculation of output filters of power supply systems with multi-zone regulation]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2023, no. 9, pp. 31–37 (in Russ.).

19. Martynyuk V.V., Kosenkov V.D., Geydarova O.V., Fedula M.V. The Analysis of Energy Transition Processes in Boost Converter. *Bulletin of NTUU KPI. Series Radiotechnique. Radioapparatus Building*, 2019, Is. 77, pp. 17–29.

20. Cossart Q., Colas F., Kestelyn X. Model reduction of converters for the analysis of 100% power electronics transmission systems. *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2018, pp. 1254–1259. DOI: 10.1109/ICIT.2018.8352358

Vladimir I. Avdzeiko

Candidate of Sciences in Engineering, Leading Researcher, Department of Design and Development of Innovative Infrastructures, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-6638-2684
Phone: +7-909-546-48-86
Email: avdzyekovi@yandex.ru

Anastasiya A. Drozdova

Postgraduate student, Department of Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-9934-5006
Phone: +7-999-619-37-70
Email: anastasiya.drozdova.00@list.ru

Viktor M. Rulevskiy

Doctor of Science in Engineering, Rector, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-3546-3921
Phone: +7 (382-2) 51-05-30
Email: rector@tusur.ru

Danil Yu. Lyapunov

Candidate of Sciences in Engineering, Engineer of Department No. 13, Research Institute of Automation and Electromechanics, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-9326-3595
Phone: +7-903-913-61-37
Email: danillyapunov@yandex.ru

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} ; $I_{вх}$; T_z ; β_2 ; H_2O , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) – A_1 , $M(f)$, β_x . Шаблоны для набора формул необходимо взять на сайте из шаблона статьи.

7. Все употребляемые обозначения и сокращения должны быть пояснены.

8. Единицы измерения физических величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ) и написаны по-русски через пробел (х, ГГц; 20 ГГц; T , град; $7^\circ C$). Десятичные числа пишутся через запятую (не точку).

9. Таблицы и рисунки должны иметь тематические заголовки (не повторяющие фразы-ссылки на них в тексте). (Рис. 1. Название рисунка; Таблица 1. Название таблицы). Большие блоки расшифровки

условных обозначений лучше приводить в тексте. Подписи и надписи на рис. – Times New Roman, 9 пт (после масштабирования), не жирным, не курсивом, переменные – 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



