



№3-2023

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Вычислительные и информационно-управляющие системы
- Алгоритмы обработки информации
- Моделирование процессов и систем
- Электроника, нанотехнологии и приборостроение

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс 41970

№ 3 (233). 2023 г.

Тематический выпуск

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ,
ИНЖЕНЕРИИ И УПРАВЛЕНИИ**

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Курейчик В.В. (гл. редактор); Кравченко Ю.А. (зам. гл. редактора); Курейчик В.М. (зам. гл. редактора); Бородинский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Боженюк А.В.; Веселов Г.Е.; Гайдук А.Р.; Горбанёва О.И.; Каляев И.А.; Коноплев Б.Г.; Касьянов А.О.; Левин И.И.; Куповых Г.В.; Лысенко И.Е.; Малюков С.П.; Медведев М.Ю.; Мельник Э.В.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Семенихина Д.В.; Сергеев Н.Е.; Стемповский А.Л.; Сухинов А.И.; Тополов В.Ю.; Турулин И.И.; Угольницкий Г.А.; Усов А.Б.; Федосов В.П.; Целых А.Н.; Юханов Ю.В.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Клевцов С.И.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 31.07. 2023 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 24,1. Уч.-изд. л. – 17,5.

Заказ № 9110. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес редакции: 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, ЮФУ, тел. +7 (928) 909-57-82, e-mail: iborodyanskiy@sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

М.В. Никитина, А.В. Капитанов ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ПРОДУКЦИЕЙ, НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ.....	6
А.В. Мангушев, В.А. Зыбин, И.Д. Полухин РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ПЛИС ДЛЯ ОБРАБОТКИ ETHERNET-ПАКЕТОВ.....	15
Д.Е. Чикрин, К.Р. Смольникова ОБЗОР КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЮРИДИКО-СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С НИМИ	25
Л.А. Баракат, И.Ю. Квятковская РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ПРИ БЕЗЭКИПАЖНОМ СУДОВОЖДЕНИИ: НЕЧЕТКИЙ ПОДХОД.....	35
И.Г. Галиуллин, Р.Ф. Сабиров, Д.Е. Чикрин, А.А. Егорчев ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС СЕГМЕНТАЦИИ ПРЕПЯТСТВИЙ С АРХИТЕКТУРОЙ U-NET ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ.....	46

РАЗДЕЛ II. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

А.А. Белевцев, А.М. Белевцев, В.А. Балыбердин МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ И ПОСТРОЕНИЯ ДОРОЖНЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ БУДУЩИХ СОБЫТИЙ.....	56
А.В. Хлуденев СИНТЕЗ ДОПУСКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.....	64
И.С. Берешполов, Ю.А. Кравченко, А.Г. Слепцов АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ	74
Е.Е. Полупанова, А.С. Олейник СОСТАВЛЕНИЕ РАЦИОНА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА	86
К.Е. Румянцев, П.Д. Миронова ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ СИНХРОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА СМЕЖНОЙ ПАРЫ СЕГМЕНТОВ С МАКСИМАЛЬНЫМ СУММАРНЫМ ОТСЧЁТОМ	96
Е.Е. Полупанова, А.А. Рыбалко АЛГОРИТМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ГИБРИДИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОВАЖЕРА	108
Е.С. Подоплелова АНАЛИЗ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ РАНЖИРОВАНИЯ	118
М.Ю. Георги МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЧИННОСТИ ИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ПРАКТИКЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	125
И.Л. Щербов ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОВЕРКИ ЗНАЧИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ СГЛАЖИВАЮЩЕГО ПОЛИНОМА	134

РАЗДЕЛ III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук МОДЕЛЬ ОБРАБОТКИ ЗАЯВОК И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО СКЛАДА.....	144
С.С. Велигодский, Н.Г. Милославская УНИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ЗРЕЛОСТИ ЦЕНТРОВ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ.....	157
В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ КРУИЗ-КОНТРОЛЯ ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ.....	172
А.Г. Слепцов, И.С. Берешполов, Ю.А. Кравченко РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ КЛАССИФИКАЦИИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ	188
С.И. Клевцов ПОРОГОВАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ СЕГМЕНТАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА	201
Али Дж. Давуд Аль-Хафаджи, Г.С. Панатов, А.С. Болдырев ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРЫЛА ПЕРЕМЕННОЙ СТРЕЛОВИДНОСТИ	212

РАЗДЕЛ IV. ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Д.В. Беляев, А.Н. Зикий, А.С. Кочубей, А.Б. Ремпе ГЕНЕРАТОР КОНТРОЛЬНЫХ СИГНАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	224
Б.М. Азизов, А.Н. Бадалова, Х.Н. Мамедов ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	232
Д.Е. Титова КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ВОЗБУЖДЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ИМПЕДАНСНЫМИ СТЕНКАМИ	240
Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков, М.Н. Дубяго, О.В. Качелаев АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	251
И.А. Алшимаисаве СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ВНУТРЕННЯЯ ВСЕНАПРАВЛЕННАЯ АНТЕННА 2 × 2 МИМО ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ 2G, 3G, 4G И 5G	266

CONTENT

SECTION I. COMPUTING AND INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS

M.V. Nikitina, A.V. Kapitanov IMPROVING THE EFFICIENCY OF MANAGING NONCONFORMING PRODUCTS, BASED ON AN INTEGRATED AUTOMATED INFORMATION SYSTEM OF THE ENTERPRISE.....	7
A.V. Mangushev, V.A. Zybin, I.D. Polukhin DEVELOPMENT OF A QUEUING SYSTEM ON FPGA FOR PROCESSING ETHERNET PACKETS	15
D.E. Chikrin, K.R. Smolnikova REVIEW OF COLLABORATIVE ROBOTIC SYSTEMS AND LEGAL-SYSTEM ASPECTS OF INTERACTION WITH THEM	25
L.A. Barakat, I.Y. Kvyatkovskaya DEVELOPING A DECISION-MAKING MECHANISM FOR AUTONOMOUS COLLISION AVOIDANCE OF UNMANNED NAVIGATION: FUZZY APPROACH	36
I.G. Galiullin, R.F. Sabirov, D.E. Chikrin, A.A. Egorchev SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR OBSTACLE SEGMENTATION WITH U-NET ARCHITECTURE FOR AUTONOMOUS AGRICULTURAL MACHINERY	46

SECTION II. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

A.A. Belevtsev, A.M. Belevtsev, V.A. Balyberdin METHODOLOGY FOR FORECASTING THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL TRENDS AND BUILDING ROAD MAP ON THE BASIS OF CONSTRUCTING FUTURE EVENTS	56
A.V. Khludenev TOLERANCE SYNTHESIS BASED ON SENSITIVITY ANALYSIS	65
I.S. Bereshpolov, Yu.A. Kravchenko, A.G. Sleptsov DATA CLUSTERING ALGORITHM FOR PROTECTING CONFIDENTIAL INFORMATION ON THE INTERNET	75
E.E. Polupanova, A.S. Oleinik COMPILING A DIET BASED ON A GENETIC ALGORITHM.....	86
K.E. Rumyantsev, P.D. Mironova PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE SYNC DETECTION ALGORITHM BASED ON THE SELECTION OF AN ADJACENT PAIR OF SEGMENTS WITH THE MAXIMUM TOTAL COUNT	96
E.E. Polupanova, A.A. Rybalko SEQUENTIAL HYBRIDIZATION ALGORITHM FOR THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM SOLVING	108
E.S. Podoplelova SELECTION OF MULTI-CRITERIA ANALYSIS METHODS ON THE EXAMPLE OF THE PROBLEM OF RANKING	118
M.Y. Georgi METHODS FOR MINING CAUSUSITY FROM OBSERVATIONS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE	126
I.L. Shcherbov RESEARCH OF METHODS FOR EXAMINATION OF THE SIGNIFICANCE OF THE SMOOTHING POLYNOMIAL COEFFICIENTS	135

SECTION III. MODELING OF PROCESSES AND SYSTEMS

V.V. Soloviev, A.Ya. Nomerchuk A MODEL FOR PROCESSING APPLICATIONS AND DISTRIBUTING TASKS FOR A ROBOTIC WAREHOUSE.....	144
S.S. Veligodskiy, N.G. Miloslavskaya UNIFIED MODEL OF MATURITY OF NETWORK SECURITY CENTERS OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION NETWORKS	158
V.V. Soloviev, A.Ya. Nomerchuk AUTOMATIC CRUISE CONTROL MODEL FOR A CAR	173
A.G. Sleptsov, I.S. Bereshpolov, Yu.A. Kravchenko DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE MODEL FOR VIDEO INFORMATION CLASSIFICATION.....	189
S.I. Klevtsov THRESHOLD ASSESSMENT OF THE STATE OF A TECHNICAL OBJECT BASED ON SEGMENTATION AND IDENTIFICATION OF THE CONTROLLED PARAMETER MODEL	202
Ali J. Dawood Al-Khafaji, G.S. Panatov, A.S. Boldyrev UNMANNED AERIAL VEHICLE AERODYNAMICS PERFORMANCE OPTIMIZATION USING VARIABLE SWEEP WING ANGLE	212

SECTION IV. ELECTRONICS, NANOTECHNOLOGY AND INSTRUMENTATION

D.V. Belyaev, A.N. Zikiy, A.S. Kochubey, A.B. Rempe CONTROL SIGNAL GENERATOR OF A NEW GENERATION	224
B.M. Azizov, A.N. Badalova, H.N. Mammadov EVALUATION OF CHARACTERISTIC PARAMETERS OF OPTO-ELECTRONIC DEVICES USED IN REMOTE SENSING SYSTEMS.....	233
D.E. Titova BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR EXCITING A ROTATING CYLINDRICAL WAVEGUIDE WITH IMPEDANCE WALLS	241
N.K. Poluyanovich, D.V. Burkov, M.N. Dubyago, O.V. Kachelaev ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN CABLE SYSTEMS WITH INSULATION FROM POLYMER MATERIALS.....	251
I.A. Alshimaysawe ULTRA WIDEBAND INDOOR OMNI-DIRECTIONAL 2×2 MIMO ANTENNA FOR 2G, 3G, 4G, AND 5G APPLICATIONS.....	267

Раздел I. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 65.011.56

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-6-14

М.В. Никитина, А.В. Капитанов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ПРОДУКЦИЕЙ, НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

Целью исследования является повышение эффективности изготовления продукции, на основе интегрированной автоматизированной информационной системы предприятия управления несоответствующей продукцией. Главные задачи заключаются в анализе существующих на рынке автоматизированных систем управления несоответствующей продукцией, разработке модели интегрированной автоматизированной системы управления несоответствующей продукцией при передаче информации подразделениям предприятия посредством единой отраслевой системы документооборота и информационной системы управления несоответствующей продукцией и оценке эффективности применения интегрированной автоматизированной информационной системы управления несоответствующей продукцией. В статье изложено, что автоматизированные информационные системы управления производством являются неотъемлемой частью в управлении производством продукции. В настоящее время они внедрены на многих предприятиях РФ. Проведен анализ таких существующих отечественных автоматизированных систем управления как автоматизированная система управления дискретным производством «Призма», «Галактика ERP», «8D. Управление несоответствиями» и АС «Управление качеством». С помощью экспертного метода выявлен самый низкий показатель качества внедренной на предприятии автоматизированной системы «Управление качеством», данным показателем является интероперабельность системы. Далее выявлено, что для минимизации получения на предприятии продукции, несоответствующей установленным требованиям, необходима интеграция данной автоматизированной системы управления несоответствиями и единой отраслевой системы документооборота. Проведение интеграции систем, контроль объема производства годной и количество обнаруженной дефектной продукции рассмотрены на примере интеллектуальных датчиков давления ТЖИУ. Представлены и описаны модели процесса анализа выявления несоответствий продукции до проведения интеграции и после. Для оценки результативности проведения интеграции построена гистограмма, на которой представлены результаты эффективности производства изготовления годной продукции, на диаграммах Ганта показано сокращение временных затрат на процесс проведения анализа выявления несоответствий, а также представлены результаты экономической эффективности проведения интеграции.

Несоответствия; автоматизированная система; интеграция; предупреждающие и корректирующие действия (ПКД).

M.V. Nikitina, A.V. Kapitanov

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MANAGING NONCONFORMING PRODUCTS, BASED ON AN INTEGRATED AUTOMATED INFORMATION SYSTEM OF THE ENTERPRISE

The aim of the study is to increase the efficiency of product manufacturing, on the basis of an integrated automated information system of nonconforming product management enterprise. The main objectives are to analyze the existing automated nonconforming product management systems on the market, to develop a model of an integrated automated nonconforming product management system when transmitting information to enterprise departments through a unified industry document management system and nonconforming product management information system and to assess the effectiveness of an integrated automated nonconforming product management information system. The article states that automated information systems of production management are an integral part in production management. Currently, they are implemented in many enterprises of the Russian Federation. The analysis of such existing domestic automated control systems as the automated control system of discrete production "Prisma", "Galaktika ERP", "8D. Management of nonconformities" and AS "Quality management". Using the expert method, the lowest indicator of quality of the automated system "Quality Management" implemented at the enterprise was identified, this indicator is the interoperability of the system. Further it was revealed that in order to minimize the receipt at the enterprise of products that do not meet established requirements, it is necessary to integrate this automated system of non-conformity management and a unified industry document management system. Conducting integration of the systems, controlling the volume of production of good products and the number of detected defective products are considered on the example of smart LPG pressure sensors. Models of the process of analysis of product nonconformity detection before and after the integration are presented and described. To assess the effectiveness of the integration process, a histogram is built, which shows the results of the efficiency of the production of good products, Gantt charts show the reduction of time costs for the process of analysis of the detection of inconsistencies, as well as the results of cost-effectiveness of the integration process.

Inconsistencies; automated system; integration; corrective and preventive action (CAPA).

Введение. Важным аспектом в управлении качеством является управление несоответствующей продукцией, что является главной целью в защите потребителей от получения продукции, не отвечающей установленным требованиям, а также необходимость снижения затрат по ее доработке [1]. За последнее десятилетие на предприятиях стали активно внедряться автоматизированные информационные системы управления производством, которые помогают решать такие непростые задачи как: эффективное управление производством продукции, решение финансовых и конструкторских задач, ведение документооборота и управление закупками, а также ведение планирования и т.д. [2]. Положительный опыт внедрения автоматизированных систем, тенденция развития информационных технологий на промышленных предприятиях, стремление устранить информационные барьеры, обеспечить гибкость систем, сформировать единое информационное пространство для всех используемых автоматизированных систем на предприятии являются обострением актуальности вопроса интеграции информационных ресурсов [3].

Обзор существующих систем управления производством. На сегодняшний день известны следующие автоматизированные информационные системы управления: автоматизированная система управления дискретным производством (АСУДП) «Призма», «Галактика ERP» – система управления производственным предприятием и интегрированная автоматизированная информационная система управления несоответствиями АС «Управление качеством».

«Галактика ERP» – автоматизированная система управления, позволяющая в едином информационном пространстве мгновенно решать необходимые управленческие задачи и обеспечивать персонал организации различного уровня управления необходимой и достоверной информацией для принятия управленческих решений. Система имеет трехуровневую архитектуру (клиент – сервер приложений – сервер баз данных) и возможно совмещения двух- и трехуровневой архитектуры в рамках одной установки. В зависимости от того, каковы потребности клиента, в качестве СУБД могут использоваться Pervasive.SQL, MS SQL, Oracle [4].

Автоматизированная система управления дискретным производством (АСУДП) «Призма» – средство управления предприятием, производством, научными и опытно-конструкторскими разработками, хозяйственной деятельностью и материальным обеспечением всех этих видов деятельности. «Призма» была разработана для управления всеми процессами дискретного производства на крупных и средних предприятиях с единичным, мелкосерийным и серийным производством. Система имеет комплекс решений в этой области, здесь реализована замкнутая многоуровневая система планирования [5].

Интегрированная автоматизированная информационная система управления несоответствиями АС «Управление качеством». Система предназначена для контроля и управления качеством продукции, составления всей необходимой отчетности на основе вносимых данных о несоответствиях, предупреждающих и корректирующих действиях и информации об их реализации. Система состоит из модулей, где каждый модуль предназначен для выполнения определенных задач. Также в режиме реального времени можно получать всю информацию об изготовленной продукции: количество годной и дефектной продукции, количество принятых и отклоненных претензий (рекламационных актов), даты изготовления и обнаружения несоответствия того или иного изделия, на каком объекте эксплуатации был обнаружен дефект и т.д. Предоставляется возможность проведения летучего контроля, формирования плана и программы аудита, записи результатов проверок и выполнения устранения замечаний, установленных в ходе проверок.

Автоматизированная система «8D. Управление несоответствиями» осуществляет сбор и анализ информации по несоответствиям на четырех основных стадиях жизненного цикла изделия: входной контроль, производство, поставка продукции, гарантийная эксплуатация. Для повышения качества продукции стоит необходимость непрерывного анализа исходной информации. Для этих целей в системе используются отчеты: диаграмма Парето (рейтинг дефектности позиций с накопительной кривой), гистограмма (количество инцидентов по дням выбранного периода), карточка несоответствий – позволяет посмотреть все несоответствия, которые связаны с выбранным объектом [6].

Выбор объекта исследования. На предприятии с 2010 года внедрена автоматизированная система «Управление качеством», т.к. она является закрытой (локальной) и позволяет обеспечить полную безопасность информации. После запуска в эксплуатацию АС «Управление качеством», стала возрастать потребность интеграции системы с другой системой предприятия – единой отраслевой системой документооборота (ЕОСДО) в части работы с несоответствиями продукции. Поэтому была поставлена цель интеграции этих двух систем, в первую очередь, для повышения эффективности производства годной продукции и сокращению временных затрат на реализацию запуска работы по несоответствиям изделий.

Интеграция системы рассматривалась на примере интеллектуальных датчиков давления ТЖИУ (рис. 1). Проанализировано количество дефектной продукции по отношению к общему объему изготовления до проведения интеграции и после. Датчики давления служат для измерения: абсолютного давления; разности давлений; избыточного давления; давления-разрежения; вакуумметрического давления и расхода жидкостей и газов.

Датчики давления ТЖИУ являются средствами измерений и отвечают требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 22520-85.



Рис. 1. Интеллектуальный датчик давления ТЖИУ

Функциональный анализ интегрированной автоматизированной информационной системы. Для оценки эффективности функционирования автоматизированной системы «Управление качеством» проведен функциональный анализ. При экспертизе качества продукции наиболее часто используются балльные оценки, которые проставляются экспертами. Оценка качественных и количественных показателей данной автоматизированной системы была проведена экспертным методом балльной оценочной шкалой определения показателей качества [7, 8]. Проведен опрос экспертов с целью получения совокупности сведений, касающихся объекта экспертизы. Базовый перечень единичных качественных показателей состоит из 6 характерных черт: достоверность, точность, бесперебойность работы системы, доступность в реальном времени («по запросу»), удобная форма представления, интероперабельность. Базовый перечень единичных количественных показателей состоит из 5 характерных черт: габариты системы, надежность, быстрдействие системы, энергопотребляемость, средний временной показатель составления отчетности.

Из проведенного анализа был сформирован вывод о том, что эксперты наименее удовлетворены таким количественным показателем качества как энергопотребляемость и качественным показателем – интероперабельность. Но самым низким показателем функционирования системы, по мнению экспертов, оказался показатель интероперабельности [9, 10], т.е. менее всего эксперты удовлетворены интегрированностью АС «Управление качеством» с другими системами предприятия. Для решения данной проблемы была разработана модель интегрированной автоматизированной информационной системы.

Разработка функциональной модели интегрированной автоматизированной информационной системы. На рис. 2 представлена модель автоматизированной информационной системы [11, 12] АС «Управление качеством» до интеграции с единой отраслевой системой документооборота. Ввод всей информации проводится вручную. Всего модель состоит из двух компонентов [13, 14]. Первым компонентом является база данных карт анализа несоответствий (БД КАН), где заводится карта анализа несоответствия с описанием причины отказа датчика давления, датами изготовления и обнаружения несоответствия, формируется список состава комиссии по проведению анализа, утверждающих и согласующих сотрудников и т.д. Далее формируется бумажный документ и проводится сбор всех подписей, после КАН передается в Отдел качества на регистрацию. Вторым компонентом модели является единая отраслевая система документооборота. В ней проводится регистрация КАН и рассылка документа всем исполнителям.

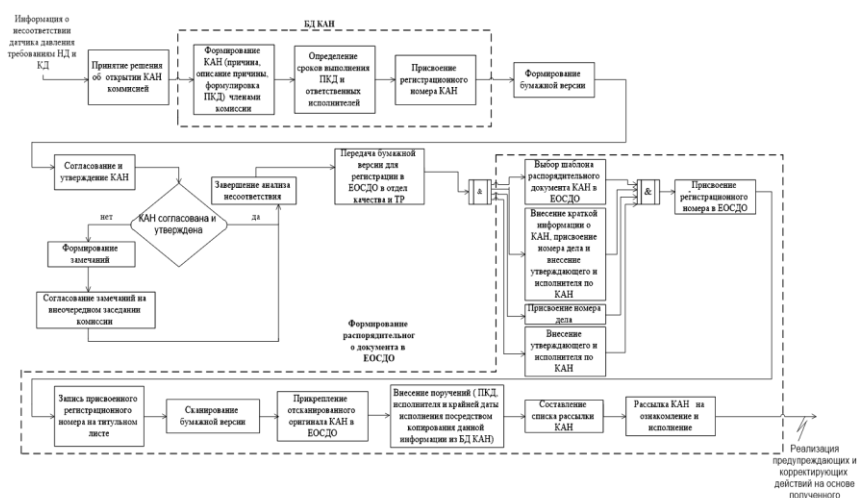


Рис. 2. Информационная модель автоматизированной информационной системы управления при ручной передаче информации подразделениям предприятия посредством единой отраслевой системы документооборота

Общее время от регистрации несоответствия – создания КАН до выполнения ПВД могло варьироваться до 17 и более рабочих дней. Для сокращения сроков регистрации КАН и ускоренного выполнения предупреждающих и корректирующих действий, в первую очередь необходимо перейти от ручного сбора подписей на электронный и осуществить автоматический перенос всей информации по документу из БД КАН в ЕОСДО. На рис. 2 представлена модель интеграции АС «Управление качеством» и ЕОСДО в части работы с КАН.

Модель после интеграции (рис. 3) БД КАН с ЕОСДО так же состоит из двух компонентов. Первый компонент – база данных карт анализа несоответствий (БД КАН), где проводятся все те же действия, как и до интеграции, за исключением нескольких. Теперь указывается ответственный регистратор КАН в ЕОСДО – сотрудник отдела качества, далее присваивается регистрационный номер. Бумажный вариант документа не формируется и все подписи ведутся непосредственно в самой базе данных [15]. После утверждения КАН в БД, документ автоматически интегрируется в ЕОСДО и приходит на регистрацию утвержденному регистратору.

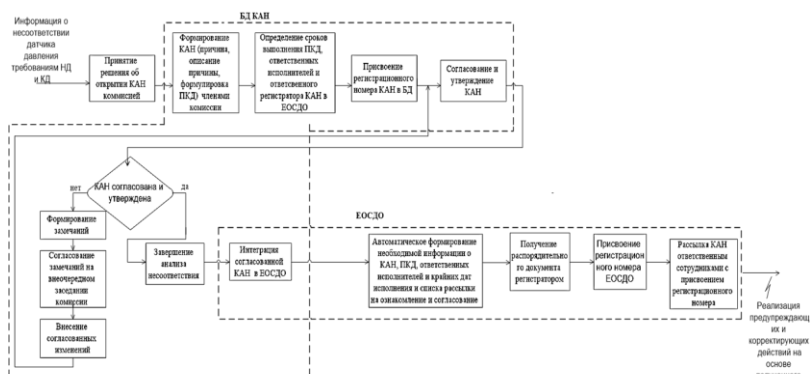


Рис. 3. Информационная модель интегрированной автоматизированной информационной системы управления при передаче информации подразделениям предприятия посредством единой отраслевой системы документооборота

Вторым компонентом является единая отраслевая система документооборота (ЕОСДО). Сотруднику отдела качества – утвержденному в БД регистратору приходит распорядительный документ на утверждение. В КАН автоматически заполнена вся необходимая информация, список ПКД, ответственные исполнители и сроки выполнения мероприятий. После присвоения регистрационного номера, распорядительный документ отправляется сотрудникам на ознакомление и выполнение ПКД.

После интеграции системы заметы значительные изменения в сроках подписания и утверждения КАН, а также в сроках регистрации распорядительного документа в ЕОСДО. Общий срок работы над распорядительным документом составляет до 11 дней, т.е. срок проведения работ сократился на 6 рабочих дней.

Результаты проведенного исследования. На рис. 4 представлена диаграмма Ганта [16, 17] до проведения интеграции системы, из которой наглядно показано, что общая работа по распорядительному документу занимает до 17 дней.

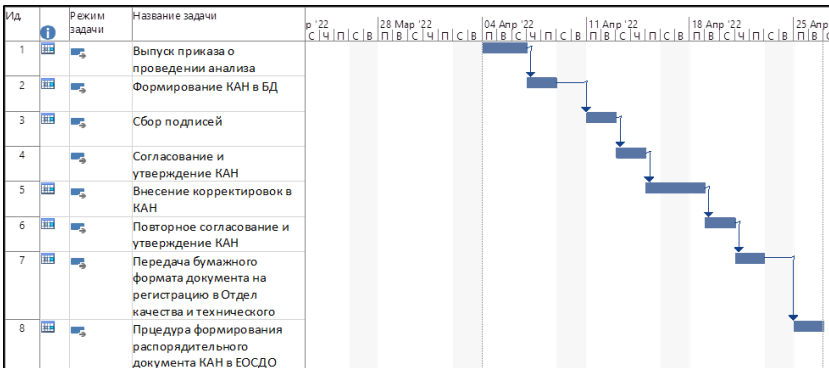


Рис. 4. Диаграмма Ганта до проведения интеграции

На диаграмме Ганта после интеграции системы (рис. 5) заметы значительные изменения в сроках подписания и утверждения КАН, а также в сроках регистрации распорядительного документа в ЕОСДО. Общий срок работы над распорядительным документом составляет до 11 дней, т.е. срок проведения работ сократился на 6 рабочих дней.

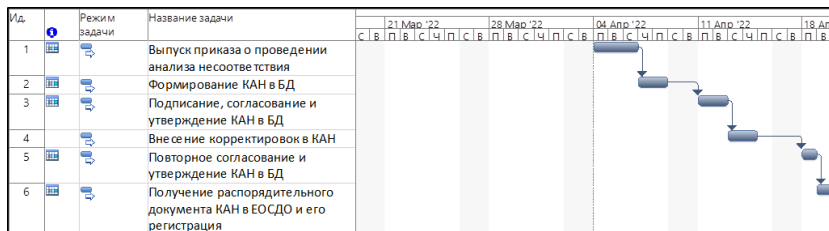


Рис. 5. Диаграмма Ганта после интеграции систем

Интеграция систем была проведена в конце декабря 2021 года и начала активно применяться в работе с первого квартала 2022 года. По результатам анализа производства интеллектуальных датчиков давления, можно сделать вывод о том, что после интеграции АС «Управление качеством» и ЕОСДО в части работы с КАН, резко увеличился объем производства датчиков (от 839 до 1200 шт.) и максимально минимизировалось количество несоответствующей продукции (от 20 до 1 шт. за квартал). На рис. 6 представлена информация об объемах выпуска и коли-

честве несоответствий интеллектуальных датчиков давления за 5 кварталов, взятая из квартальных отчетов по качеству продукции производственно-технического назначения [18].

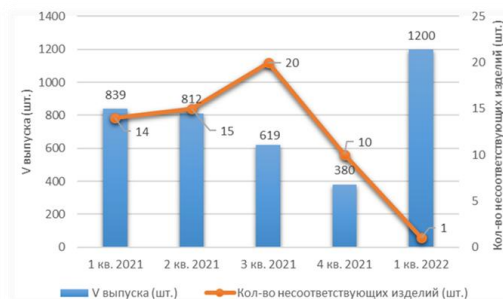


Рис. 6. Гистограмма объема выпуска и количества несоответствующей продукции датчиков давления за 5 кварталов.

Также проведен расчет экономической эффективности [19] проведения интеграции, из которого сделан вывод, что на проведение интеграции необходимо инвестировать 371 723 руб., а размер чистой прибыли от реализации интеллектуальных датчиков давления [20] в первом квартале 2022 г. по сравнению со средней чистой прибылью предыдущих кварталов (10556,4411 млн. руб.) увеличился на 10%. Расходы на интеграцию системы уже окупились.

Заключение. Поставленные задачи в работе полностью реализованы, цель исследования достигнута – проведена интеграция АС «Управление качеством» и единой отраслевой системы документооборота. Представлена информационная модель интегрированной автоматизированной информационной системы управления при передаче информации подразделениям предприятия посредством единой отраслевой системы документооборота. Это позволило сократить временные затраты на проведение анализа выявления несоответствий продукции, тем самым удалось максимально минимизировать получение продукции, не отвечающей установленным требованиям. Резкий скачок увеличения объема выпуска датчиков давления и снижение количества несоответствий говорит о том, что интеграция системы прошла успешно и положительно повлияла на эффективность изготовления продукции. Благодаря переходу к электронной подписи и моментальному автоматическому формированию распорядительного документа, сократилось время на выполнение ПКД и поиск решений для устранения повторных несоответствий. Также посредством проведенной интеграции систем на предприятии, увеличилась чистая прибыль с реализации поставок интеллектуальных датчиков давления ТЖИУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляева М.А. Моделирование систем: конспект лекций: В 2 ч. Ч. 2. – М.: МГУП им. Ивана Федорова, 2012. – 148 с.
2. ГОСТ 24.104-85 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Общие требования.
3. Капитанов А.В., Козлова А.В. Система менеджмента качества в условиях цифровизации // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Матер. Международной молодёжной научной конференции. В 6-ти т. Казань, 07–08 ноября 2019 года. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 143-147.
4. «Галактика ERP» – Корпорация «Галактика». – URL: <https://galaktika.ru/erp> (дата обращения 12.12.2021).
5. Автоматизированная система управления дискретным производством (АСУДП) «Призма». – URL: <http://vnii.ru/production/incl/PRIZMA.pdf> (дата обращения 01.12.2021).

6. Автоматизированная система «8D. Управление несоответствиями». – URL: <https://sapr.ru/article/25021> (дата обращения 13.12.2021).
7. Подольская М.Н. Квалиметрия и управление качеством: лабораторный практикум. Ч. 1. Экспертные методы. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 80 с.
8. Чудинов И.Л., Осипова В.В. Информационные системы и технологии: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 145 с.
9. Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 372 с.
10. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной и судостроительной литературы, 2015. – 630 с.
11. Кривошеев И.А. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным и машиностроительным производством. – М.: Машиностроение, 2017. – 2127 с.
12. Кувшинский В.В. Автоматизация технологических процессов в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2013. – 272 с.
13. ГОСТ 19781-90. Обеспечение систем обработки информации программное. Термины и определения.
14. ГОСТ 19.701-90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения.
15. Щелоков С.А. Базы данных: учеб. пособие. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2014. – 298 с.
16. Кане М.М., Иванов Б.В., Корешков В.Н., Схиртладзе А.Г. Системы, методы и инструменты менеджмента качества: учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2008. – 580 с.
17. Кузнецов А.П., Каляшина А.В. Методы оценки эффективности промышленного оборудования // Технология машиностроения. – 2020. – № 5. – С. 66-75.
18. Барамидзе Г.А. Финансово-правовое регулирование деятельности государственной корпорации "Росатом": автореф. дисс. ... канд. юр. наук: 12.00.04 (Место защиты: Моск. гос. юрид. акад. им. О.Е. Кутафина). – М., 2017. – 26 с.
19. Балабанов И.Т. Финансовый анализ и планирование хозяйствующего субъекта. – 2-е изд. доп. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 208 с.
20. Автоматизация проектирования систем управления. – М.: Финансы и статистика, 2017. – 208 с.

REFERENCES

1. Belyaeva M.A. Modelirovanie sistem: konspekt lektsiy [Systems modeling: Lecture notes]: In 2nd. part. Part 2. Moscow: MGUP im. Ivana Fedorova, 2012, 148 p.
2. GOST 24.104-85 Edinaya sistema standartov avtomatizirovannykh sistem upravleniya. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya. Obshchie trebovaniya [GOST 24.104-85 Unified system of standards of computer control systems. Computer control systems. General requirements].
3. Kapitanov A.V., Kozlova A.V. Sistema menedzhmenta kachestva v usloviyakh tsifrovizatsii [Quality management system in the context of digitalization], XXIV Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchenykh): Mater. Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii [XXIV Tupolev Readings (School of Young Scientists): Proceedings of the International Youth Scientific Conference]. In 6 vol. Kazan, November 07–08, 2019. Kazan': IP Sagieva A.R., 2019, pp. 143-147.
4. «Galaktika ERP» – Korporatsiya «Galaktika» ["Galaktika ERP" – Galaktika Corporation]. Available at: <https://galaktika.ru/erp> (accessed 12 December 2021).
5. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya diskretnym proizvodstvom (ASUDP) «Prizma» [Automated Discrete Production Management System (ADMS) "Prism"]. Available at: <http://vniia.ru/production/incl/PRIZMA.pdf> (accessed 01 December 2021).
6. Avtomatizirovannaya sistema «8D. Upravlenie nesootvetstviyami» [Automated system "8D. Inconsistency Management"]. Available at: <https://sapr.ru/article/25021> (accessed 13 December 2021).
7. Podol'skaya M.N. Kvalimetriya i upravlenie kachestvom: laboratornyy praktikum. Ch. 1. Ekspertnye metody [Qualimetry and quality management: laboratory practical work. Part 1. Expert Methods]. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2011, 80 p.

8. *Chudinov I.L., Osipova V.V.* Informatsionnye sistemy i tekhnologii: ucheb. posobie [Information systems and technologies: textbook]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 145 p.
9. *Zagidullin R.R.* Upravlenie mashinostroitel'nykh proizvodstvom s pomoshch'yu sistem MES, APS, ERP: monografiya [Management Machine-Building Production with Systems MES, APS, ERP: monograph]. Staryy Oskol: TNT, 2011, 372 p.
10. *Ivashchenko N.N.* Avtomaticheskoe regulirovanie. Teoriya i elementy system [Automatic regulation. Theory and elements of systems]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy i sudostroitel'noy literatury, 2015, 630 p.
11. *Krivosheev I.A.* Modeli i metody sozdaniya integrirovannoy informatsionnoy sistemy dlya avtomatizatsii tekhnicheskoy podgotovki i upravleniya aviatsionnym i mashinostroitel'nykh proizvodstvom [Models and methods for creating an integrated information system for automation of technical training and management of aviation and machine-building production]. Moscow: Mashinostroenie, 2017, 2127 p.
12. *Kuvshinskiy V.V.* Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii [Automation of technological processes in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 2013, 272 p.
13. GOST 19781-90. Obespechenie sistem obrabotki informatsii programmnogo. Terminy i opredeleniya [GOST 19781-90. Software provision of information processing systems. Terms and definitions].
14. GOST 19.701-90 Edinaya sistema programmnoy dokumentatsii. Skhemy algoritmov, programm, dannykh i sistem. Oboznacheniya uslovnye i pravila vypolneniya [GOST 19.701-90. Unified system of program documentation. Schemes of algorithms, programs, data and systems. Conventional designations and execution rules].
15. *Shchelokov S.A.* Bazy dannykh: ucheb. posobie [Databases: textbook]. Orenburg: Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet, 2014, 298 p.
16. *Kane M.M., Ivanov B.V., Koreshkov V.N., Skhirtladze A.G.* Sistemy, metody i instrumenty menedzhmenta kachestva: ucheb. posobie [Systems, methods and tools of quality management: textbook]. St. Petersburg: Piter, 2008, 580 p.
17. *Kuznetsov A.P., Kalyashina A.V.* Metody otsenki effektivnosti promyshlennogo oborudovaniya [Methods for assessing the effectiveness of industrial equipment], *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Engineering Technology], 2020, No. 5, pp. 66-75.
18. *Baramidze G.A.* Finansovo-pravovoe regulirovanie deyatel'nosti gosudarstvennoy korporatsii "Rosatom": avtoref. diss. ... kand. yur. nauk: 12.00.04 [Financial and legal regulation of the activities of the state corporation "Rosatom": Abstract. Cand. of legal sc.: 12.00.04 (Place of protection: Mosk. state legal acad. them. O.E. Kutafin). Moscow, 2017, 26 p.
19. *Balabanov I.T.* Finansovyy analiz i planirovaniye khozyaystvuyushchego sub"ekta [Financial analysis and planning of an economic entity]. 2nd ed. add. Moscow: Finansy i statistika, 2002, 208 p.
20. Avtomatizatsiya proektirovaniya sistem upravleniya [Automating the design of control systems]. Moscow: Finansy i statistika, 2017, 208 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Никитина Мария Витальевна – МГТУ «СТАНКИН»; e-mail: 19mariya98@bk.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89857220058; кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; аспирант.

Капитанов Алексей Вячеславович – e-mail: av.kapitanov@stankin.ru; тел.: 89266531369; кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; зав. кафедрой; д.т.н.; доцент.

Nikitina Maria Vitalievna – MSTU "STANKIN"; e-mail: 19mariya98@bk.ru; Moscow, Russia; phone: +79857220058; the department of automated systems of information processing and control; post-graduate student.

Kapitanov Alexey Vyacheslavovich – e-mail: av.kapitanov@stankin.ru; phone: +79266531369; the department of automated systems of information processing and control; head of the department; dr. of eng. sc.; associate professor.

А.В. Мангушев, В.А. Зыбин, И.Д. Полухин**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ПЛИС
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ETHERNET-ПАКЕТОВ**

Разработана схема буферизации Ethernet-пакетов для аппаратной реализации их обработки на базе ПЛИС. Схема спроектирована на уровне RTL на языке System Verilog в среде разработки Quartus II 13.1. Верификация и моделирование было проведено в среде ModelSim Altera. В качестве целевой платформы была выбрана ПЛИС семейства CycloneIV, располагающаяся на отладочной плате DE2-115. Особое внимание уделено модулям приема и передачи данных, а также реализации аппаратной очереди (FIFO) с возможностью изменения ее содержимого модулем обработки. Схема является параметризованной, позволяет изменять глубину очереди за счет одного параметра без внесения изменений в другие части схемы. Особенностью схемы является возможность добавления любого аппаратного модуля, осуществляющего мониторинг, обработку или шифрование сетевого трафика. Для передачи и приема пакетов применен интерфейс МП, что позволяет использовать любые доступные микросхемы физического уровня для приема и передачи пакетов. Устройство допускает без особых сложностей изменить входной и выходной интерфейс, что увеличивает ее универсальность. В системе не используются проприетарные IP ядра, что делает ее максимально переносимой на ПЛИС различных производителей. К главной особенности схемы можно отнести низкую задержку между приемом и отправкой пакета, определяемой лишь параметрами модуля обработки. Результаты работы можно применить в ходе проектирования устройств, осуществляющих передачу данных с предварительной обработкой. Например, сетевое оборудование (коммутаторы, маршрутизаторы), системы мониторинга и сбора данных.

Плис; fpga; verilog; rtl; сетевой трафик; система массового обслуживания; fifo; mii.

A.V. Mangushev, V.A. Zybin, I.D. Polukhin**DEVELOPMENT OF A QUEUING SYSTEM ON FPGA FOR PROCESSING
ETHERNET PACKETS**

A scheme for buffering Ethernet packets for hardware implementation of their processing based on FPGA has been developed. The scheme is designed at the RTL level in the System Verilog language in the Quartus II 13.1 development environment. Verification and modeling were carried out in the ModelSim Altera environment. An FPGA of the CycloneIV family, located on the DE2-115 debugging board, was chosen as the target platform. Particular attention is paid to data reception and transmission modules, as well as the implementation of a hardware queue (FIFO) with the possibility of changing its contents by the processing module. The scheme is parameterized, it allows you to change the queue depth at the expense of one parameter without making changes to other parts of the scheme. A feature of the scheme is the ability to add any hardware module that monitors, processes or encrypts network traffic. The MII interface is used for transmitting and receiving packets, which allows using any available physical layer chips for receiving and transmitting packets. The device allows you to easily change the input and output interface, which increases its versatility. The system does not use proprietary IP cores, which makes it as portable as possible to FPGAs from various manufacturers. The main feature of the scheme is the low delay between receiving and sending a packet, determined only by the parameters of the processing module. The results of the work can be applied during the design of devices that transmit data with preprocessing. For example, network equipment (switches, routers), monitoring and data collection systems.

Fpga; verilog; rtl; network traffic; mass production system; fifo; mii.

Введение. Для сетевых инженеров крайне важной является задача мониторинга, классификации [1], обработки и анализа [2] сетевого трафика. Существует ряд программных [3], аппаратных и программно-аппаратных [4] решений, например Wireshark [5] или Protosphere [6]. В [7] приводится пример использования программно-аппаратного решения. Однако программные средства при прочих равных условиях являются менее производительными. В [8] рассматривается ряд программных анализаторов трафика, в рамках которых происходит только сбор статистики, без изменения самих пакетов. Именно поэтому в данной работе будет рассматриваться аппаратное решение. В качестве платформы проекта используется ПЛИС компании Altera – DE2-115 [9]. Применение именно ПЛИС позволяет легко переконфигурировать схему устройства. А поскольку мы имеем в распоряжении программируемую логику, то малая задержка распространения сигнала и практически безграничная степень параллелизма позволяют добиться высокой скорости обработки данных.

Описание проектируемой системы. В составе схемы требуется наличие как минимум трех модулей, которые будут обеспечивать прием данных с записью в память, обработку полученных пакетов и отправку, соответственно. В дальнейшем модуль приема будет называться write, модуль обработки – handle, а модуль отправки – send. Принятые данные требуется сохранять, и при этом предоставлять к ним доступ всем трем блокам одновременно, что необходимо для слаженной работы системы. Пакеты необходимо отправлять в том же порядке, в котором они пришли, поэтому логично использовать очередь (FIFO) [10, 11].

Для хранения каждого пакета будет использоваться своя отдельная ячейка (модуль cell), устройство которой представлено на рис. 1.

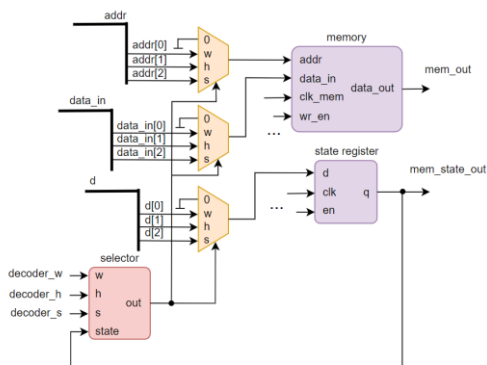


Рис. 1. Устройство модуля cell

Memory – модуль однопортовой памяти [12], в которой и сохраняется пакет. Поскольку максимальный размер пакета в Ethernet ограничен 1500 байтами [13], то объем адресуемой памяти составляет 2048 байт.

State register – регистр состояния ячейки памяти. Ячейка может находиться в одном из трех состояний, закодированных следующим образом: данные отправлены (ячейка готова к записи данных) – 0, данные записаны (ячейка готова к обработке) – 1, данные обработаны (ячейка готова к отправке) – 2. Так как состояний всего 3, то для хранения достаточно двух бит. Тактовый сигнал у регистра и памяти раздельный. Регистр состояния тактируется общим тактовым сигналом, а память от одного из модулей.

К каждому из портов памяти и регистра подключены мультиплексоры, которые предоставляют доступ к ячейке одному из модулей (write, handle или send).

Управление мультиплексорами осуществляет модуль selector. Алгоритм его работы следующий. На входы decoder_w, decoder_h и decoder_s поступают сигналы запроса от соответствующих модулей. При логической единице считается, что соответствующий модуль собирается взаимодействовать с ячейкой. На основании запросов и текущего состояния ячейки происходит следующее: если состояние 0 и запрос на запись, то мультиплексоры предоставляют доступ к памяти модулю write. Иначе если состояние 1 и есть запрос на обработку, то доступ предоставляется модулю handle. Иначе если состояние 2 и запрос на отправку, управление передается модулю send. В противном случае на все входы поступает логический 0, что защищает ячейку и регистр состояния от изменения данных.

Общая схема проекта.

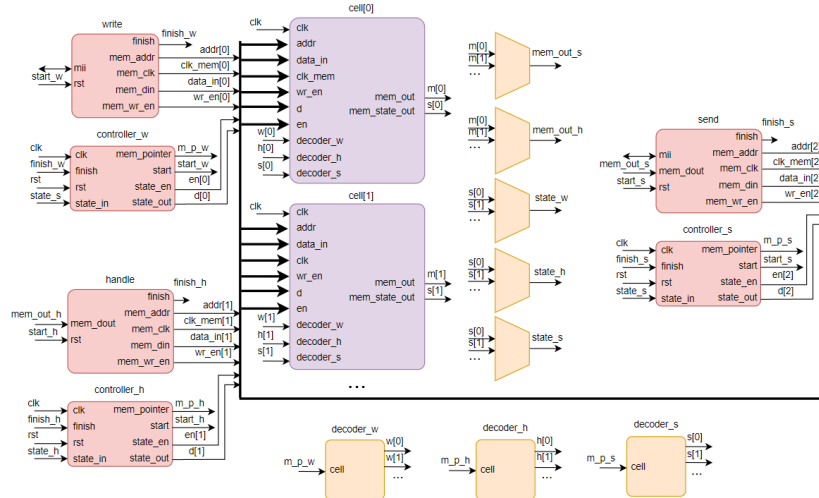


Рис. 2. Общая схема разрабатываемого устройства

На рис. 2 изображена диаграмма, визуализирующая содержимое файла верхнего уровня проекта. Для хранения данных имеется ряд одинаковых ячеек (cell), устройство которых рассмотрено выше. Для обеспечения записи, обработки и отправки данных имеются модули write, handle и send, подробное устройство которых приведено ниже. Каждому из этих модулей требуется свой контроллер, необходимый для выбора ячейки и управления работой модуля. Рассмотрим работу схемы поэтапно.

Изначально после сброса все контроллеры собираются взаимодействовать с ячейкой 0 (cell[0]). Номер ячейки для взаимодействия хранится внутри каждого из контроллеров (controller_w, controller_h, controller_s) и поступает на вход своего декодера (decoder_w, decoder_h, decoder_s). Каждый из них представляет собой преобразователь позиционного кода в унитарный [14]. Логическая единица на соответствующем выходе декодера формирует запрос для соответствующей ячейки. Выбор того, кому предоставить доступ осуществляется внутри ячейки.

Изначально состояние ячейки показывает, что она пуста и готова к записи данных. Поэтому работа с ней предоставляется модулю write. Теперь этот модуль ожидает, когда по интерфейсу МП [15] придет пакет данных. После того как пакет будет принят и записан, будет выставлен сигнал finish_w, после чего controller_w запишет новое состояние в регистр ячейки и начнется отслеживание следующей ячейки. Кроме данных в памяти также сохраняется адрес предпоследнего байта данных, что необходимо для корректного указания граница пакета. Хранение осуществляется в двух первых байтах в порядке от младшего к старшему.

После изменения состояния доступ к данным будет предоставлен модулю handle. Он произведет соответствующую обработку, которая может заключаться в шифровании, изменении полей пакета или внешнем сохранении информации о пакете. В третьем байте памяти кодируется следующая информация: 0 – не отправлять данный пакет, 1 – отправить без пересчета контрольной суммы, 2 – отправить пакет и пересчитать контрольную сумму. После этого выставляется сигнал finish_h и новое состояние записывается в регистр.

Далее управление предоставляется модулю отправки, который первоначально считывает первые три байта и на их основе сразу выставляет сигнал finish_s либо же передает управление соответствующим подмодулям. В конце также производится перезапись состояния ячейки и весь процесс начинается с начала.

Модуль контроллера состояний. Модуль controller (рис. 3) – универсальный параметрический модуль для управления блоком, взаимодействующим с памятью и обеспечивающий взаимодействие с регистром состояний. Описан как конечный автомат Мили, на рис. 4 представлена его диаграмма переходов.

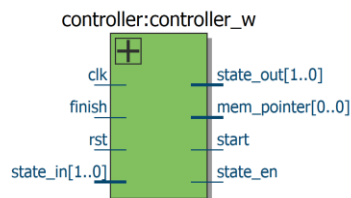


Рис. 3. Блок controller

Вход clk – основной тактового сигнала, rst – общий сброс схемы. На вход state_in поступает текущее состояние отслеживаемой ячейки, на finish – сигнал об окончании работы управляемого модуля. На выходе state_out постоянно находится новое состояние, которое мы будем записывать в регистр состояний, start – управляет подчиненным модулем, если разрешаем его работу, то выставляем логический 1. State_en – вход разрешения записи в регистр состояний. Mem_pointer – адрес текущей отслеживаемой ячейки.

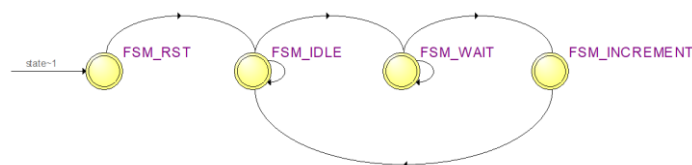


Рис. 4. Состояния конечного автомата модуля controller

После сброса модуль находится в состоянии FSM_RST. В этом состоянии мы сбрасываем адрес отслеживаемой ячейки и переходим в состояние FSM_IDLE. В этом состоянии мы сбрасываем start и state_en в 0 и ожидаем на входе state_in подходящего состояния. Как только это происходит, осуществляем переход в состояние FSM_WAIT, где выставляем на выходе start логическую единицу, активируя подчиненный модуль, и ожидаем логическую 1 на входе finish. При наступлении этого события мы выставляем на start логический 0 и на state_en логическую 1, чтобы записать новое состояние в регистр, после чего попадаем в состояние FSM_INCREMENT. Здесь происходит увеличение указателя на ячейку памяти на 1 и переход в состояние FSM_IDLE, после чего весь цикл повторяется.

Интерфейс МП. Рассмотрим, каким образом происходит прием и передача данных по интерфейсу МП.

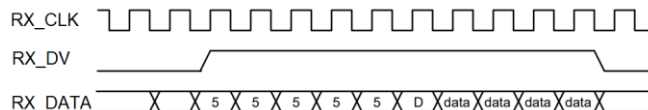


Рис. 5. Сигналы интерфейса МП при приеме данных

Для приема пакета требуется три шины: RX_CLK – тактовый сигнал, RX_DV – сигнал, показывающий валидность данных, RX_DATA – четырехбитная шина данных. Все эти сигналы формируются трансивером.

При начале приема пакета (рис. 5) трансивер выставляет логическую 1 на RX_DV по фронту RX_CLK и на каждый следующий фронт на шину RX_DATA попадает 4 бита данных. Данные поступают в порядке MSB first. Для уведомления об окончании приема, на RX_DV выставляется логический 0 по срезу RX_CLK, после чего пакет считается принятым.

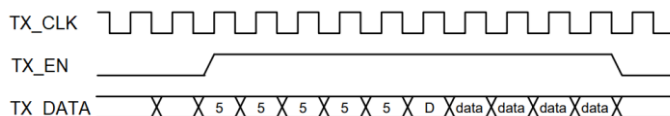


Рис. 6. Сигналы интерфейса МП при отправке данных

Для отправки пакета требуется три шины: TX_CLK – тактовый сигнал, TX_EN – сигнал, показывающий валидность данных, TX_DATA – четырехбитная шина данных. Сигнал TX_CLK поступает от трансивера, TX_EN и TX_DATA управляется устройством, осуществляющим отправку.

Для начала передачи (рис. 6) по фронту TX_CLK выставляем логическую 1 на TX_EN и на каждый следующий фронт на шину TX_DATA отправляем 4 бита данных в порядке MSB first. Для уведомления об окончании передачи, на TX_EN выставляется логический 0 по срезу TX_CLK, после чего пакет считается отправленным.

Модуль записи данных. Модуль write (рис. 7) – осуществляет прием данных по интерфейсу МП и запись в память. Описан как конечный автомат Мура, на рис. 8 представлена его диаграмма переходов.

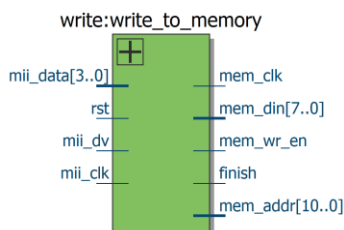


Рис. 7. Модуль write

Вход mii_data – данные от Ethernet трансивера, rst – сброс от блока controller, mii_dv – валидность данных МП, mii_clk – тактовый сигнал от трансивера.

Выход mem_clk – тактовый сигнал для памяти, mem_din – данные для памяти, mem_wr_en – сигнал записи в память, mem_addr – адрес для записи в память, finish – сигнал о завершении работы модуля.

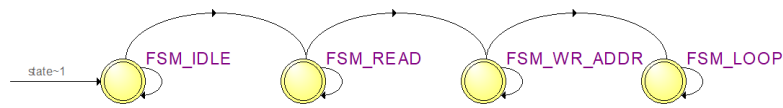


Рис. 8. Состояния конечного автомата модуля write

После сброса контроллер находится в состоянии FSM_IDLE. В этом состоянии ожидает наличия логической 1 на входе mii_dv, после чего переходит в состояние FSM_READ. В этом состоянии производится прием данных и запись в память. Сигналом для перехода в состояние FSM_WR_ADDR является наличие на mii_dv логического 0. Теперь в память производится запись предпоследнего байта с данными и переход к состоянию FSM_LOOP, в котором автомат выставляет в 1 сигнал finish и находится в этом состоянии до прихода сигнала сброса. Такое решение позволяет легче организовать взаимодействие между модулями.

Модуль обработки данных. На данный момент модуль обработки данных не завершен и в качестве демонстрации записывает 0 в определенный байт пакета и указывает что требуется пересчет FCS, поэтому подробное описание не приведено.

Модуль отправки данных. Модуль send (рис. 9) – осуществляет передачу данных из памяти по интерфейсу МП. Описан как конечный автомат Мура, на рис. 10 представлена его диаграмма переходов. Внутри подключается еще два модуля: FCS – для расчета контрольной суммы пакета [16] и mii_tx – для отправки данных по МП.

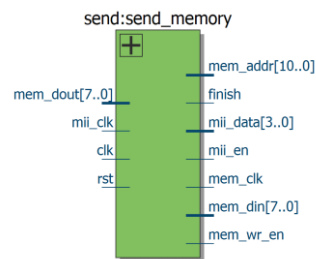


Рис. 9. Модуль send

Вход mem_dout – данные из памяти, mii_clk – тактовый сигнал от Ethernet трансивера, clk – глобальный тактовый сигнал, rst – сброс от блока controller.

Выход mem_addr – адрес для считывания данных, finish – сигнал окончания отправки пакета, mii_data – данные для отправки по МП, mii_en – валидность данных на шине mii_data, mem_clk – тактовый сигнал для памяти, mem_din – данные для записи в память, mem_wr_en – сигнал записи данных в память.

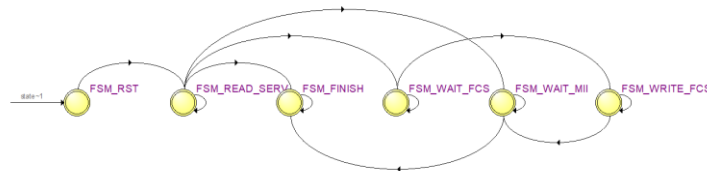


Рис. 10. Состояния конечного автомата модуля send

После сброса контроллер находится в состоянии FSM_RST, где происходит начальная инициализация регистров и переход в состояние FSM_READ_SERV. В этом состоянии производится чтение из памяти предпоследнего адреса данных и

того, что требуется сделать с пакетом. Если пакет не требуется отправлять, то происходит переход в состояние FSM_FINISH, и выставление сигнала окончания обработки. Если же пакет необходимо отправить, то происходит переход в состояние FSM_WAIT_MII, где происходит запуск модуля отправки данных по MII (mii_tx) и по окончании передачи переход в FSM_FINISH. Если требуется пересчитать контрольную сумму, то происходит переход в состояние FSM_WAIT_FSC, в котором запускается модуль для расчета контрольной суммы пакета и после завершения его работы выполняется переход в состояние FSM_WRITE_FCS, где производится перезапись контрольной суммы пакета в память и переход в FSM_WAIT_MII, а далее аналогично описанному.

Модуль интерфейса передачи MII.

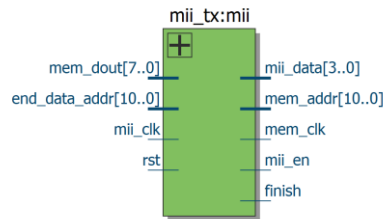


Рис. 11. Модуль mii_tx

Данный модуль производит побайтовое считывание данных из памяти и отправку по интерфейсу MII. Алгоритм работы модуля соответствует описанию из раздела: «интерфейс MII», приведенного выше.

Симуляция схемы. Схема была протестирована с помощью симулятора ModelSim [17]. Для теста было решено использовать 2 ячейки. Тестовая схема аналогична рис. 2. Рассмотрим подробнее результаты симуляции.



Рис. 12. Результат симуляции в ModelSim

Сигналы finish_w, finish_h и finish_s сигнализируют о выполнении работы модулем записи, обработки и отправки соответственно. Сигналы rst_w, rst_h и rst_s являются сигналами сброса для соответствующих модулей. Когда эти сигналы в состоянии логического 0 – модули неактивны. Сигналы mem_ptr_w, mem_ptr_h и mem_ptr_s – указатели на отслеживаемые ячейки данных для соответствующих модулей. state_q – неупакованный массив с состояниями ячеек.

Изначально все модули, кроме модуля записи находятся в сбросе. Как только входе mii_dv появляется логическая 1 (~50 нс), то начинается запись данных в нулевую ячейку. По появлению импульса в сигнале finish_w (~600 нс) видно момент окон-

чания записи, после чего в ячейку записывается состояние 1 – данные записаны (регистр state_q). Далее свою работу начинает модуль обработки, однако из-за своей простоты крайне быстро ее заканчивает, и состояние сменяется на 2 – данные обработаны, после чего начинается отправка. Однако перед отправкой требуется пересчитать контрольную сумму, отчего присутствует запаздывание в передаче, начало которой можно идентифицировать по состоянию логической 1 на выходе mii_en (~ 750 нс).

В момент завершения обработки данных (~ 600 нс) приходит второй пакет, который будет записан во вторую ячейку памяти. К моменту окончания записи данные из первой ячейки все еще не были отправлены, поэтому ее состояние 2, а состояние второй ячейки сменилось на 1, после чего началась обработка этого пакета. К моменту окончания обработки (~ 1200 нс), модуль отправки данных все еще был занят отправкой данных с первой ячейки, и только после завершения этой операции приступил к отправке данных со второй ячейки. Если подать новый пакет на вход, то он будет записан в первую ячейку, поскольку она свободна и указатель сбросился в 0 после переполнения.

Выводы. В результате был получен код на языке System Verilog, позволяющий реализовать аппаратную платформу для обработки пакетов. Была протестирована возможность захвата пакета с последующей отправкой. Так как в ходе разработки не были применены проприетарные IP ядра [18, 19], есть возможность запустить данный проект практически на любой ПЛИС, имеющей встроенную память. В качестве интерфейса для приема и передачи пакетов был применен МП. Полученные наработки можно применить для доработки схемы под задачи обработки, мониторинга или шифрования [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Болдырихин Н.В., Алтунин Ф.А., Короченцев Д.А.* Особенности классификации зашифрованного сетевого трафика // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 3 (213). – С. 89-98. – DOI: 10.18522/2311-3103-2020-3-89-98.
2. *Белоусов А.С., Будылдина Н.В.* Анализ сетевого трафика: от анализа пакетов до анализа потоков // Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики: Сб. научных трудов II Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 26–27 января 2022 г. / под ред. В.П. Шувалова. Сост. М.П. Карачарова. – Екатеринбург: Уральский технический институт связи и информатики (филиал) федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", 2022. – С. 17-21.
3. *Яковлев Д.А., Синева И.С.* Построение виртуализированной системы фильтрации поддельных сетевых пакетов с использованием Intel DPDK // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10, № 8. – С. 30-35.
4. *Лапищев В.В.* Реализация анализа трафика сети Тор на базе Mikrotik и Suricata // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сб. статей VII Всероссийской научно-технической конференции, Таганрог, 05–11 апреля 2021 г. – Таганрог: ЮФУ, 2021. – С. 58-60.
5. Анализатор трафика для компьютерных сетей. – URL: <https://www.wireshark.org/> (дата обращения: 05.05.2023).
6. Protosphere: система анализа сетевого трафика. – URL: <https://www.ispras.ru/technologies/protosphere/>.
7. *Константинов И.В., Фирсова А.А., Николаева А.В.* Инструмент анализа сетевого трафика // Аллея науки. – 2022. – Т. 1, № 5 (68). – С. 791-794.
8. *Ларин Д.В., Гетьман А.И.* Средства захвата и обработки высокоскоростного сетевого трафика // Тр. Института системного программирования РАН. – 2021. – Т. 33, № 4. – С. 49-68. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(4)-4.
9. DE2 – 115 User manual. – URL: http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/502/DE2_115_User_manual.pdf.

10. Род Стивенс. Алгоритмы. Теория и практическое применение. – М.: Изд-во «Э», 2016. – 544 с.
11. Кузьмичев А.М., Рахмьянов А.С. Формирование и передача пакетов информации по высокоскоростному каналу связи // Механика, управление и информатика. – 2009. – № 1. – С. 495-502.
12. Соловьев В. Логическое проектирование встраиваемых систем на FPGA. Ч. 14. Проектирование встроенной памяти в системе Quartus // Компоненты и технологии. – 2019. – № 11 (220). – С. 38-46.
13. IEEE Standard for Ethernet. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/7071/> (дата обращения: 05.05.2023).
14. Цифровой синтез: практический курс / под общ. ред. А.Ю. Романова, Ю.В. Панчула. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 556 с.
15. Media-independent interface. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Media-independent_interface (дата обращения: 05.05.2023).
16. Проект «Марсоход». – URL: <https://marsohod.org/projects/marsohod2/263-rtl-recv> (дата обращения: 05.05.2023).
17. García Valderas M., Zumel P., L zaro A. [et al.]. ModelSim-PSIM mixed signal simulation for power electronics digital control design // VLSI Circuits and Systems IV, Dresden, Germany, 04 May 2009. Vol. 7363. – Dresden, Germany, 2009. – P. 73630V-7. – DOI: 10.1117/12.822051.
18. Бруно Ф. Программирование FPGA для начинающих / пер. с англ. С.Л. Плехановой / под науч. ред. А.Ю. Романова, Ю.В. Ревича. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 304 с.
19. Морозов И.А. Интеграция IP-ядер для ПЛИС в реконфигурируемых вычислительных системах // Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2016): Матер. 4-й Всероссийской научно-технической конференции, Дивногорское, 19–24 сентября 2016 г. Т. 1. – Дивногорское: ЮФУ, 2016. – С. 74-77.
20. Мангушев А.В. Модуль передачи данных по сети Ethernet на базе ПЛИС // XXVII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: Сб. материалов конференции, Волгоград, 02–15 ноября 2022 г. / Редколлегия: С.В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 239-240.

REFERENCES

1. Boldyrikhin N.V., Altunin F.A., Korochentsev D.A. Osobennosti klassifikatsii zashifirovannogo setevogo trafika [Features of the classification of encrypted network traffic], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 3 (213), pp. 89-98. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-3-89-98.
2. Belousov A.S., Budyldina N.V. Analiz setevogo trafika: ot analiza paketov do analiza potokov [Network traffic analysis: from packet analysis to flow analysis], *Infokommunikatsionnye tekhnologii: aktual'nye voprosy tsifrovoy ekonomiki: Sb. nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ekaterinburg, 26–27 yanvarya 2022 g.* [Infocommunication technologies: current issues of the digital economy: Collection of scientific papers of the II International Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, January 26–27, 2022], ed. by V.P. Shuvalova. Compiled by M.P. Karacharova. Ekaterinburg: Ural'skiy tekhnicheskii institut svyazi i informatiki (filial) federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo byudzhelnogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Sibirskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy i informatiki", 2022, pp. 17-21.
3. Yakovlev D.A., Sineva I.S. Postroenie virtualizirovannoy sistemy fil'tratsii poddel'nykh setevykh paketov s ispol'zovaniem Intel DPDK [Building a virtualized system for filtering fake network packets using Intel DPDK], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2016, Vol. 10, No. 8, pp. 30-35.
4. Lapshichev V.V. Realizatsiya analiza trafika seti Tor na baze Mikrotik i Suricata [Implementation of traffic analysis of the Tor network based on Mikrotik and Suricata], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: Sb. statey VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Taganrog, 05–11 aprelya 2021 g.* [Fundamental and applied aspects of computer technology and information security: Collection of articles of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference, Taganrog, April 05–11, 2021]. Taganrog: YuFU, 2021, pp. 58-60.

5. Analizator trafika dlya komp'yuternykh setey [Traffic analyzer for computer networks]. Available at: <https://www.wireshark.org/> (accessed 05 May 2023).
6. Protosphere: sistema analiza setevogo trafika [Protosphere: network traffic analysis system]. Available at: <https://www.ispras.ru/technologies/protosphere/>.
7. Konstantinov I.V., Firsova A.A., Nikolaeva A.V. Instrument analiza setevogo trafika [Network traffic analysis tool], *Alleya nauki* [Alley of Science], 2022, Vol. 1, No. 5 (68), pp. 791-794.
8. Larin D.V., Get'man A.I. Sredstva zakhvata i obrabotki vysokoskorostnogo setevogo trafika [Tools for capturing and processing high-speed network traffic], *Tr. Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2021, Vol. 33, No. 4, pp. 49-68. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(4)-4.
9. DE2 – 115 User manual. Available at: http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/502/DE2_115_User_manual.pdf.
10. Rod Stevens. Algoritmy. Teoriya i prakticheskoe primeneniye [Algorithms. Theory and practical application]. Moscow: Izd-vo «E», 2016, 544 p.
11. Kuz'michev A.M., Rakhim'yanov A.S. Formirovaniye i peredacha paketov informatsii po vysokoskorostnomu kanalu svyazi [Formation and transmission of information packets over a high-speed communication channel], *Mekhanika, upravleniye i informatika* [Mechanics, control and informatics], 2009, No. 1, pp. 495-502.
12. Solov'ev V. Logicheskoye proektirovaniye vstraivaemykh sistem na FPGA. Ch. 14. Proektirovaniye vstroennoy pamyati v sisteme Quartus [Logic design of embedded systems on FPGA. Part 14. Designing built-in memory in the Quartus system], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2019, No. 11 (220), pp. 38-46.
13. IEEE Standard for Ethernet. Available at: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/7071/> (accessed 05 May 2023).
14. Tsifrovoy sintez: prakticheskiy kurs [Digital synthesis: a practical course], under the general. ed. A.Yu. Romanova, Yu.V. Panchula. Moscow: DMK Press, 2020, 556 p.
15. Media-independent interface. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Media-independent_interface (accessed 05 May 2023).
16. Proekt «Marsokhod» [Project "Mars rover"]. Available at: <https://marsohod.org/projects/marsohod2/263-rtl-recv> (accessed 05 May 2023).
17. Garcha Valderas M., Zumel P., Lózaró A. [et al.]. ModelSim-PSIM mixed signal simulation for power electronics digital control design, *VLSI Circuits and Systems IV, Dresden, Germany, 04 May 2009*. Vol. 7363. Dresden, Germany, 2009, pp. 73630V-7. DOI: 10.1117/12.822051.
18. Bruno F. Programmirovaniye FPGA dlya nachinayushchikh [FPGA programming for beginners], transl. from engl. S.L. Plekhanovoy, under scientific. ed. A.Yu. Romanova, Yu.V. Revicha. Moscow: DMK Press, 2022, 304 p.
19. Morozov I.A. Integratsiya IP-yader dlya PLIS v rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistemakh [Integration of IP cores for FPGAs in reconfigurable computing systems], *Superkomp'yuternyye tekhnologii (SKT-2016): Mater. 4-y Vserossiyskoy nachno-tekhnicheskoy konferentsii, Divnomorskoye, 19–24 sentyabrya 2016 g.* [Supercomputer Technologies (SKT-2016): Proceedings of the 4th All-Russian Scientific and Technical Conference, Divnomorskoye, September 19–24, 2016]. Vol. 1. Divnomorskoye: YuFU, 2016, pp. 74-77.
20. Mangushev A.V. Modul' peredachi dannykh po seti Ethernet na baze PLIS [FPGA-based Ethernet data transmission module], *XXVII Regional'naya konferentsiya molodykh uchenykh i issledovateley Volgogradskoy oblasti: Sb. materialov konferentsii, Volgograd, 02–15 noyabrya 2022 g.* [XXVII Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region: Conference Proceedings, Volgograd, November 02–15, 2022], ed. board: S.V. Kuz'min (managing ed.) [and others]. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2022, pp. 239-240.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Мангушев Александр Вячеславович – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: mangushev2001@yandex.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: +79880522090; студент.

Зыбин Валерий Андреевич – e-mail: vazybin@mail.ru; тел.: +79610573464; студент.

Полухин Игорь Дмитриевич – e-mail: poluxin.2001@mail.ru; тел.: +79020951311; студент.

Mangushev Alexander Vyacheslavovich – Volgograd State Technical University; e-mail: mangushev2001@yandex.ru; Volgograd, Russia; phone: +79880522090; undergraduate student.

Zybin Valery Andreevich – e-mail: vazybin@mail.ru; phone: +79610573464; undergraduate student.

Polukhin Igor Dmitrievich – e-mail: poluxin.2001@mail.ru; phone: +79020951311; undergraduate student.

УДК 004.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-25-35

Д.Е. Чикрин, К.Р. Смольникова

ОБЗОР КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЮРИДИКО-СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С НИМИ

Значительный интерес для отрасли робототехники является исследование междисциплинарной области – взаимодействие человека и робота (Human-robot interaction, HRI). Индустрия 4.0 (4IR) диктует интенсивное внедрение робототехнических решений во все отрасли экономики и процессы жизнедеятельности людей. Именно поэтому взаимодействие оператора и кобота является одной из самых актуальных тем, влияющая на экономику, рынок труда и общество в целом. На текущий момент кобототехника является одним из новых прорывных направлений в робототехнике, а в связи с развитием стандартов 4IR коботы имеют ключевое преимущество в рамках автоматизации, где полное замещение человеческого труда невозможно. Такая коллаборация навыков оператора и коллаборативного робота ускорит производственно-технологический процесс и позволит компаниям, интегрирующим коботов, стать более конкурентоспособнее, а также свести к минимуму процесс производственных задач. Целью исследования является описание робототехнических систем и анализ юридико-системных аспектов взаимодействия кобота и оператора в совместном рабочем пространстве (collaborative workspace). Задачами исследования являются: 1) общий обзор коллаборативных робототехнических систем по типам: решаемых задач, выполняемых работ и управления; 2) рассмотрение существующих систем оценки рисков при взаимодействии оператора и кобота. Реализация поставленных задач внесет свой вклад в дальнейшие исследования инновационной области HRI, направленная на создание среды для безопасной и эффективной коллаборации оператора и кобота. Практическая ценность настоящей статьи заключается также в системном подходе к рассмотрению сферы кобототехники для дальнейшего изучения безопасных сценариев взаимодействия. По нашему мнению, наиболее эффективным подходом является анализ каждого конкретного случая использования какого-либо вида роботов. Одновременно отмечаем, что в текущих реалиях быстрорастущего сектора робототехники затруднительно классифицировать и унифицировать коллаборативные робототехнические системы в единый акт.

Коллаборативные роботы; взаимодействие человека и робота; коллаборативные робототехнические системы; Индустрия 4.0.

D.E. Chikrin, K.R. Smolnikova

REVIEW OF COLLABORATIVE ROBOTIC SYSTEMS AND LEGAL-SYSTEM ASPECTS OF INTERACTION WITH THEM

Of significant interest to the robotics industry is the study of the multidisciplinary field of human-robot interaction (HRI). Industry 4.0 (4IR) dictates the intensive implementation of robotic solutions in all sectors of the economy and human life processes. That is why the interaction between operator and cobot is one of the most relevant topics affecting the economy, labor market and society as a whole. Currently, cobotics is one of the new breakthrough areas in robotics, and due to the development of 4IR standards, cobots have a key advantage in automation, where full replacement of human labor is impossible. This collaboration of operator and collaborative robot

skills will accelerate the manufacturing process and allow companies integrating cobots to become more competitive and minimize the process of manufacturing tasks. The purpose of the study is to describe robotic systems and analyze the legal-system aspects of the interaction between cobot and operator in a collaborative workspace (collaborative workspace). The objectives of the study are: 1) general overview of collaborative robotic systems by types: tasks to be solved, work to be performed and control; 2) consideration of existing risk assessment systems for operator-cobot interaction. The realization of the set tasks will contribute to further research in the innovative field of HRI, aimed at creating an environment for safe and efficient operator-cobot collaboration. The practical value of this paper also lies in the systematic approach to consider the field of cobotics to further explore safe collaboration scenarios. In our opinion, the most effective approach is to analyze each specific use case of a type of robot. At the same time, we note that in the current realities of the rapidly growing robotics sector, it is difficult to classify and unify collaborative robotic systems into a single act.

Collaborative robots; human-robot interaction; collaborative robotic systems; Industry 4.0.

I. Введение. На текущий момент робототехника является одной из наиболее стремительно развивающихся областей человеческого знания и инженерно-технической мысли. Однако в рамках данной статьи рассматривается более узкая область робототехники, являющаяся менее проработанной в сравнении с другими областями робототехники – коллаборативные роботы (коботы).

Отличительные особенности коллаборативных роботов заключаются в том, что коботы представляют собой автоматическое устройство, независимое от своего создателя и выполняют задачи, поставленные непосредственно работником-специалистом (оператором), работающим совместно с ним. При эксплуатации коботы не ограждаются заборами (клетками, ограждениями) и не требуют систем безопасности. Совместная работа человека и робота является инновационной областью, направленная на создание среды для безопасного и эффективного сотрудничества между людьми и роботами для выполнения конкретной задачи [1].

Следует отметить серьезный и основательный подход зарубежных исследователей в части обзоров литературы и сценариев взаимодействия коллаборативных роботов [1–7]. В связи с отсутствием законодательного регулирования также необходимо отметить, что в российской и зарубежной литературе по-разному интерпретируется, но при этом сохраняется смысл рассматриваемого термина «коллаборативный робот».

Термин «коллаборативный робот» был введен Э. Колгейтом и М. Пешкиным еще в 1999 г., где авторы трактуют указанный термин как роботизированное устройство, которое манипулирует объектами в сотрудничестве с человеком-оператором [8].

В существующем ГОСТе Р 60.0.0.4-2019 «Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения» [9] термин «коллаборативный робот» не конкретизирован, но при этом предусматриваются взаимосвязанные термины такие как: робот для совместных работ (collaborative robot), совместная работа (collaborative operation) и совместное рабочее пространство (collaborative workspace).

Стремительное развитие научно-технического прогресса (НТП) в сфере роботостроения является неоспоримым фактом сегодняшнего времени, продемонстрировавший значительный темп создания и развития инфраструктуры. Следовательно, на данном этапе развития робототехники принципиальное значение играет унификация терминологии и именно по этой причине межгосударственные стандарты в области робототехники должны четко отражать соответствующие термины и определения.

Таким образом, чтобы приблизиться к сути понятия «коллаборативный робот (кобот)» нужно понимать его как компактный, гибкий промышленный робот, предназначенный для последовательных и точных работ во взаимодействии с работником-специалистом при отсутствии дополнительного программирования.

Дополнительно необходимо подчеркнуть, что последние 5-10 лет коллаборативные роботы являются одним из новых прорывных направлений в робототехнике и имеют колоссальный потенциал роста, благодаря их эффективной безопасной работе совместно с людьми. Так, например, в 2017 г. согласно отчету, опубликованному International Federation of Robotics (IFR), менее 4% от новых 381 тыс. промышленных роботов, установленных на предприятиях по всему миру, были коллаборативные роботы [10]. В соответствии с отчетом компании «Interact Analysis» сообщается, что в 2022 г. доход рынка коботов вырос на 17,2% до 954 млн долл., как и поставки выросли на 21,9% до 37 780 единиц. Также прогнозируется, что к 2026 г. индустрия коботов увеличится до 2,2 млрд долл. [11].

Таким образом с учетом постепенного перехода к Индустрии 5.0, ориентированной на синергию между людьми и роботами, а также на основании систематически публикуемых отчетов различных профильных компаний, можно прийти к следующему выводу. В долгосрочной перспективе коллаборативные роботы и в дальнейшем будут захватывать ландшафт робототехники в геометрической прогрессии в связи с их ключевыми преимуществами: цена, безопасность, гибкость, простота программирования. Вместе с тем нельзя не учитывать, что по мере интенсивного роста рынка коботов возрастает необходимость должного уровня безопасности при их эксплуатации в различных сценариях.

II. Коллаборативные робототехнические системы (КРС) и сценарии взаимодействия оператора и кобота. В настоящее время как Российской Федерации, так и в зарубежных странах отсутствует должное законодательное регулирование в области безопасного взаимодействия. Тем не менее одним из базовых документов, закрепляющий подходы к безопасному взаимодействию является ГОСТ Р 60.1.2.3-2021/ISO/TS 15066:2016 «Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком» [12], дополняющий и уточняющий межгосударственные стандарты по безопасности промышленных роботов [13, 14].

На данном этапе коботы по типам коллаборативных робототехнических систем можно разделить на: 1) коботы, соответствующие требованиям межгосударственных стандартов и 2) коботы не соответствующие требованиям ГОСТа, однако это не означает, что коботы, не соответствующие стандарту являются небезопасными.

В рамках данного параграфа в табличной форме рассматриваются коботы, соответствующие требованиям стандарта, а также в каждом конкретном сценарии анализируются участие оператора, техника и скорость кобота при взаимодействии оператора и кобота.

Вышеуказанный межгосударственный стандарт [12] определяет четыре комбинации взаимосвязи и типа функционирования коботов:

1. Тип кобота с защитным механизмом контролируемой остановки предусматривает работу кобота по большей части самостоятельно. Оператор непосредственно во время технологического процесса в заранее определенной безопасной зоне выполняет необходимые операции (например, сварка, покраска и т.д.), которые кобот не может выполнить, при этом в этот момент кобот прекращает двигаться и переходит в режим паузы. С помощью автоматической системы кобот останавливается, если оператор подходит на близкое расстояние. Когда оператор выходит из рабочего пространства кобота, его деятельность автоматически возобновляется. В данном сценарии взаимодействия кобот и оператор не могут работать одновременно, т.е. работает либо оператор, либо кобот.

2. Тип кобота с ручным управлением эксплуатируется во время «ручного обучения» кобота оператором для точных операций с тяжелыми объектами. Такой тип кобота оснащен датчиком, распознающим давление руки. Такой датчик «чувствует» силу, которую оператор применяет к манипулятору-коботу (например, в виде сверла, фрезы, схвата) во время обучения. В ситуации, когда оператор не находится в рабочем пространстве кобота, т.е. когда кобота не обучают, кобот выполняет свои функции в режиме работы манипулятора. В данном сценарии во время обучения оператор находится в контакте с коботом, который находится под ручным управлением, при этом одновременные движения контролируется человеком.

3. Тип кобота, оборудованный системой компьютерного зрения способен во время работы мониторить перемещение оператора. В ситуации, когда оператор находится в совместном рабочем пространстве – кобот снижает скорость до безопасной, а в ситуации, когда оператор подходит предельно близко – кобот прекращает работу и останавливается. В данном сценарии взаимодействия кобот эксплуатируется для операций, требующих частого нахождения оператора в совместном рабочем пространстве, в котором кобот и оператор могут перемещаться одновременно.

4. Тип кобота с ограничением силы способен взаимодействовать с оператором в непосредственной близости в совместном рабочем пространстве, ввиду способности чувствовать сопротивление на своем пути, а также останавливаться в ситуации, когда кобот соприкасается с оператором. В ситуации, когда расстояние становится критически близким, кобот останавливается, т.е. фактически в этом случае используется сценарий контролируемая остановка с учетом требований безопасности. В данном сценарии имеет место прямой контакт между коботом и оператором. Существует два типа контакта. Переходный контакт представляет собой «короткое» контактное событие (<50 мс), когда часть тела оператора, как правило, может отскочить. Тип квази-статистического контакта в большинстве случаев может быть контактом долгим, где часть тела оператора может быть захвачена захватным устройством кобота. С учетом совместной работы кобота и оператора в непосредственной близости в общем рабочем пространстве в данном сценарии используются меры по снижению риска причинения вреда оператору: 1) конструкция кобота, по общему правилу, имеет округлую форму и изготавливается из податливых материалов, 2) соответствующий выбор приложений и конструкция ячейки кобота, например, захват, траектория движения и т.д.

Учитывая изложенные подходы к безопасности, по первому впечатлению складывается мнение, что с учетом сложной системы безопасности коботов, его эксплуатация является во всех отношениях безопасной. Однако в зависимости от характера работы не исключено, что имеет место причинение вреда оператору, работающего в непосредственной близости с коботом.

На основании вышесказанного в табл. 1. «Сценарии совместной работы кобота и оператора» описаны вышерассмотренные сценарии безопасной совместной работы кобота и оператора, демонстрирующие предварительную оценку рисков возможных обстоятельств причинения вреда оператору. Принимая во внимание стремительный рост коботостроения, по нашему убеждению, наиболее эффективным подходом является анализ каждого сценария совместной работы при использовании кобота во взаимодействии с оператором, так как конечная конфигурация должна представлять баланс между безопасностью и производительностью.

Таблица 1

Сценарии совместной работы робота и оператора

Сценарии совместной работы	Участие оператора	Скорость робота	Техника	Меры безопасности
Контролируемая остановка с учетом требований безопасности	Оператор не имеет контроля	Скорость равна нулю, если оператор находится в зоне совместной работы	Остановка робота обеспечивается без потери мощности двигателей	Световые барьеры
Ручное управление	Аварийная остановка. Контроль оператора во время обучения	Контролируемая скорость с учетом требований безопасности	Ввод данных и управление движением осуществляет оператор. Робот не обучается – работает в режиме манипулятора	Силовой датчик
Контроль скорости и разделения зон	Никакого человеческого контроля в совместном рабочем пространстве. Работа робота зависит от предварительных настроенных в его управляющей программе зон	Контролируемая скорость с учетом требований безопасности	Одновременная работа. Минимальное раздельное расстояние для выполнения задач	Световые барьеры
Ограничение мощности и усилия	Зависит от применения. Оператор работает одновременно. Контролируется сила и мощность при контакте	Максимальная определенная скорость для ограничения силы	Робот не может превысить мощность чрезмерной силы. Свободное передвижение в совместном рабочем пространстве	Силовые датчики. Конструкция робота, выбор приложений и конструкция ячеек робота

При выборе методов обеспечения безопасности, можно использовать любое сочетание из перечисленных выше сценариев взаимодействия при работе в совместном рабочем пространстве, представленных в одной коллаборативной роботизированной системе, или всех четырех одновременно.

В целях эксплуатации роботов на должном уровне необходимо установить конкретные возможные повторяющиеся задачи с высокой долей предсказуемости. Исходя из вышеприведенных подходов можно выделить три основных критерия, опровергающие должное безопасное взаимодействие оператора и робота: 1) оценка намерений человека, 2) меры безопасности, 3) антропогенно-техногенные опасности [1]. Рассмотрим каждый критерий.

Оценка намерений человека является первостепенной задачей и определяющим фактором при проектировании робота. Важнейшим критерием в данном случае является наделение робота навыком с легкостью предвидеть намерения человека-оператора. Вместе с тем нельзя не учитывать критерий «предсказуемости» и со стороны человека-оператора. Двустороннее взаимодействие критерия «предсказуемости» представляет собой факт предвидения человеком-оператором движения

кобота, в свою очередь кобот должен предвидеть действия человека-оператора на основании двух факторов: 1) предсказание последующего действия оператора и 2) предсказание времени действия.

Следующим критерием в рамках возможных мер по снижению риска является безопасность, предусматривающая отсутствие травм, т.е. причинение вреда оператору во время совместной работы. Во время совместной работы коботы могут полностью двигаться и работать с острыми и опасными предметами. Работа в общем рабочем пространстве предусматривает необходимость соблюдения специальных требований безопасности в целях обеспечения безопасности оператору при выполнении совместных задач. В данном случае, чтобы обеспечить безопасность оператору необходимо создать модель столкновения для кобота, которая способна обнаружить возможное столкновение с оператором [15].

Третий критерий – это антропогенно-техногенные опасности, т.е. нарушения, допущенные человеком при взаимодействии с коботом, которые во многом обусловлены недостаточным вниманием оператора. В целях достижения безопасности и стабильности во время совместной работы необходимо минимизировать нарушения со стороны человека-оператора.

Таким образом с точки зрения безопасности и контроля необходимо сформировать безопасную систему, разбирающуюся в человеческих предпочтениях и действующая безопасными способами. Но в любом случае остается риск проектирования коботов без учета аспектов, связанных с безопасностью. Как сказал Ник Бостром в интервью Мартину Форду: «Стремясь к результату, люди часто пренебрегают правилами безопасности. И побеждает тот, кто тратит на безопасность меньше всего усилий» [16].

Заключая данный параграф стоит отметить, что также необходимо разработать методы защиты с антропогенными опасностями, вызванные оператором для обеспечения безопасного взаимодействия, которые будут гармонизированы и закреплены на законодательном уровне. Далее в следующем параграфе будут рассмотрены этические и де-факто существующие законы, регулирующие сектор роботехники.

III. Роботехника в законе: существующие предложения в мире относительно безопасного взаимодействия человека и робота. Если соотносить вышеуказанные проблемы с текущим состоянием права в мире, то в зарубежных странах существуют следующие акты, акцентирующие особое внимание на безопасность при взаимодействии человека и робота:

- ◆ Нормы гражданского права робототехники и Хартия робототехники [17], обращающая внимание на этические принципы, которые необходимо учитывать при взаимодействии, в том числе запрет на эксплуатацию робота как средство причинения вреда, посягательство на человеческое достоинство и неприкосновенности частной жизни.

- ◆ Резолюция Европарламента «Нормы гражданского права о робототехнике» [18] представляет собой юридический и этический свод правил, ориентированные непосредственно на заинтересованные субъекты, применяющие так или иначе робототехнику в различных ситуациях, например, компании-производители, госорганы, ученые и др.

- ◆ Небезызвестные, а также вошедшие в историю и всеми применяемые Законы роботехники Айзека Азимова, закрепляющие обязательные правила поведения для роботов [19].

- ◆ Международные стандарты и технические спецификации, которые идентичны межгосударственным российским стандартам, закрепляющие интероперабельность роботов и их компонентов, а также снижение затрат на их разработку,

производство и обслуживание за счет стандартизации и унификации процессов, интерфейсов и параметров, в том числе с особым вниманием к обеспечению безопасности [9, 12–14].

Регулирование робототехники в Российской Федерации также является одним из актуальных и дискуссионных вопросов. На текущий момент существуют такие наиболее популярные российские научные труды:

- ♦ Инициативный проект федерального закона «Об обороте роботов, их составных частей (модулей)» [20].

- ♦ Концепция законодательства о робототехнике – Законы «Гришина», основывающиеся на законах робототехники Азимова и предлагают использовать роботов по аналогии с животными и юридическими лицами [21].

- ♦ Книги, разрабатываемые и написанные юридической фирмой «Dentos» и ее сотрудниками в рамках программы «Цифровая экономика Российской Федерации» в части регулирования робототехники, где рассматриваются основные правовые проблемы, связанные с развитием робототехники и технологий искусственного интеллекта [22].

Несмотря на множество вышеперечисленных документов, уделяющие особое внимание на необходимость регулирования сектора робототехники на текущий момент ни один из документов в полной мере не разрешают текущие проблемы в части безопасного взаимодействия человека и робота.

На эту проблему обращают зарубежные футурологи и специалисты в области робототехники, иными словами предвестники новых законов робототехники, которые говорят о необходимости формирования новых законов и различных документов именно в части безопасного взаимодействия.

Так, например, проф. Бруклинского юридического факультета Ф. Паскуале в своей книге приходит к выводу о том, что в связи с появлением различных опасностей, связанных с восходом заводской робототехники и автоматизацией необходимо пойти дальше, и дополнить существующие законы робототехники Азимова еще четырьмя законами Паскуале [23].

Американский футуролог Э. Уэбб в своем бестселлере знакомит с китайскими компаниями, объединенные под названием «BAT» и американскими – «G-MAFIA», составляющие «Большую девятку», их междоусобной гонке, а также их стратегических целях, нацеленные не на прозрачность, а на оптимизацию. Воспроизводит три сценария будущего развития искусственного интеллекта: оптимистический, прагматический и катастрофический. По мнению Э. Уэбб, законы Азимова являются общими и, в свою очередь, предлагает создать глобальную комиссию, которая придерживается принципов, не нарушая структуру прав, в которых соблюдается баланс индивидуальных свобод и высшего блага, блага всего человечества. В целях определения потенциальных последствий для экономических, геополитических и личных свобод необходимо реализовать техническое моделирование и составление карты рисков. Одновременно с этим Уэбб утверждает, что изменения должны происходить не только на государственном уровне, в «Большой Девятке» и кадрах, а также в каждом человеке [24].

Выводы. В рамках данной статьи описано и проанализировано взаимодействие оператора и робота в коллаборативных робототехнических системах, в том числе обозначены и рассмотрены существующие проблемы в части должного безопасного взаимодействия оператора и робота. В целях предотвращения причинения вреда коботом оператору, были рассмотрены различные точки зрения зарубежных специалистов, предлагающих варианты разрешения таких коллизий.

Обзор в табличной форме коллаборативных робототехнических систем по типам решаемых задач, выполняемых работ и управлению во всех сценариях коллаборации с учетом анализа участия оператора, техники и скорости кобота показы-

вает, что на данный момент не исключено причинение вреда оператору, работающего в непосредственной близости с коботом. В рамках обзора были выявлены три основных критерия отрицающие должную безопасность: оценка намерений человека, меры безопасности и антропогенно-техногенные опасности.

Для достижения безопасности между коботом и оператором, и в особенности в части обеспечения гарантий безопасности оператору, необходимо предварительно оценивать всевозможные риски причинения вреда как со стороны кобота, так и со стороны человека в ситуациях с антропогенными опасностями.

Несомненно, коботы имеют множество преимуществ таких как: увеличение производительности труда в результате коллаборации, снижение риска получения травм оператором вследствие делегирования опасных задач на кобота, возможность выполнения задач в труднодоступных местах за счет маневренности кобота, улучшение качества продукции в силу точности и повторяемости движений кобота.

Вместе с тем нельзя не учитывать недостатки кобота, выявленные в процессе анализа коллаборативных робототехнических систем: риск возникновения конфликтных ситуаций между коботом и оператором, необходимость дополнительного обучения персонала для работы с коботом, ограниченность функционала кобота по сравнению с работником-специалистом, ограничения в безопасности работы кобота вблизи оператора, что может ограничить его применение в некоторых отраслях.

Таким образом, представляется перспективным продолжить поиск оптимальных законов, соблюдающие баланс интересов всех заинтересованных субъектов, а также продолжить дальнейшее исследования инновационной области – взаимодействие человека и робота как ключевой фактор Индустрии 5.0, направленной на создание среды для безопасной и эффективной коллаборации оператора и кобота.

Благодарность. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hameed A., Ordys A., Mozaryn J., Sibilska-Mroziewicz A.* 'Control System Design and Methods for Collaborative Robots: Review // Appl. Sci. – 2023. – 13. – 675. – <https://doi.org/10.3390/app13010675> (дата обращения: 19.05.2023).
2. *Mikkel S.K., Roy J.K.* Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature // ResearchGate. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/342347381> (дата обращения: 19.05.2023).
3. *Hameed Ayesha, Andrzej Ordys, Jakub Możaryn, Anna Sibilska-Mroziewicz.* Control System Design and Methods for Collaborative Robots: Review // MDPI. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/1/675> (дата обращения: 19.05.2023).
4. Picking with a robot colleague: A systematic literature review and evaluation of technology acceptance in human-robot collaborative warehouses // ResearchGate. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/370206151> (дата обращения: 19.05.2023).
5. The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works // ResearchGate. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/367125121> (дата обращения: 19.05.2023).
6. Review of Collaborative Robot and Its Motion Planning Methods // ResearchGate. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/370779755> (дата обращения: 19.05.2023).
7. A Review on Collaborative Robot Assembly Line Balancing Problems // ResearchGate. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/364790312> (дата обращения: 19.05.2023).
8. URL: https://peshkin.mech.northwestern.edu/publications/1996_Colgate_CobotsRobotsCollaboration.pdf (дата обращения: 20.05.2022).
9. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ISO 8373:2012. Национальный стандарт Российской Федерации. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200162703> (дата доступа: 20.05.2023).
10. IFR. Demystifying Collaborative Industrial Robots. – URL: http://robotunion.ru/files/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf (дата обращения: 20.05.2023).

11. Interact Analysis. Collaborative Robots. – Apr 2022. – URL: <https://interactanalysis.com/research/collaborative-robots-apr-2022/> (дата обращения: 20.05.2023).
12. ГОСТ Р 60.1.2.3-2021/ISO/TS 15066:2016. Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180499> (дата доступа: 20.05.2023).
13. ГОСТ Р 60.1.2.1-2016/ИСО 10218-1:2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Ч. 1. Роботы. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141084> (дата доступа: 20.05.2023).
14. ГОСТ Р 60.1.2.2-2016/ИСО 10218-2:2011. Национальный стандарт Российской Федерации. «Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Ч. 2. Робототехнические системы и их интеграция». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141449> (дата доступа: 20.05.2023).
15. Haddadin S.; Croft E. Physical human-robot interaction // In Springer Handbook of Robotics. – Springer: Cham, Switzerland, 2016. – P. 1835-1874.
16. Форд Мартин. Архитекторы интеллекта: вся правда об искусственном интеллекте от его создателей. – СПб.: Питер, 2020. – 416 с.
17. Civil Law Rules on Robotics (2015/2103(INL)). – URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051_EN.html (дата доступа: 20.05.2023).
18. European Parliament. REPORT with recommendations to the Commission on Civil Law Rules on Robotics (2015/2103 (INL)). Debates, 15 February 2017. – Available at: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=CRE&reference=20170215&secondRef=ITEM-014&language=EN&ring=A8-2017-0005> (дата обращения: 20.05.2023).
19. Азимов А. Хоровод. Черный столб. – М.: Знание, 1963. – 146 с.
20. Бегущев И.П. Об обороте роботов, их составных частей (модулей) (инициативный проект федерального закона). – Казань: Изд-во «Познание» Казанского инновационного университета, 2021.
21. Проект Гришина Дмитрия Сергеевича Grishin Robotics. – URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjkusH8uIv_AhUVrosKHcjCB1wQFnoECBAQAQ&url=http%3A%2F%2Frobopravo.ru%2Fuploads%2F%2Fz%2F6%2Fg%2Fz6gj0wkwhv1o%2Ffile%2FbESvQz3Y.pdf&usg=AOvVaw0vT6JYirXxQ0caClHAZRup (дата доступа: 20.05.2023).
22. Архипов В.В., Бакуменко В.В., Волюнец А.Д. и др. Регулирование робототехники: введение в «Робоправо». Правовые аспекты развития робототехники и технологий искусственного интеллекта / под ред. А.В. Незнамова. – М.: Инфотропик Медиа, 2018. – 232 с.
23. New Laws of Robotics: Defending Human Expertise in the Age of AI” by Frank Pasquale Copyright © 2020 by the President and Fellows of Harvard College Published by arrangement with Harvard University Press.
24. Webb A. The Big Nine: how the tech titans and their thinking machines could warp humanity. – First ed.: March 2019 ed. – New York: PublicAffairs, 2019. Includes bibliographical references and index: March 2019. – 203 p.

REFERENCES

1. Hameed A., Ordys A., Mozaryn J., Sibilska-Mroziewicz A. 'Control System Design and Methods for Collaborative Robots: Review, *Appl. Sci.*, 2023, 13, 675. Available at: <https://doi.org/10.3390/app13010675> (accessed 19 May 2023).
2. Mikkel S.K., Roy J.K. Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature, *ResearchGate*. Available at: URL: <https://www.researchgate.net/publication/342347381> (accessed 19 May 2023).
3. Hameed Ayesha, Andrzej Ordys, Jakub Możaryn, Anna Sibilska-Mroziewicz. Control System Design and Methods for Collaborative Robots: Review, *MDPI*. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/1/675> (accessed 19 May 2023).
4. Picking with a robot colleague: A systematic literature review and evaluation of technology acceptance in human-robot collaborative warehouses, *ResearchGate*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/370206151> (accessed 19 May 2023).
5. The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works, *ResearchGate*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/367125121> (accessed 19 May 2023).

6. Review of Collaborative Robot and Its Motion Planning Methods, *ResearchGate*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/370779755> (accessed 19 May 2023).
7. A Review on Collaborative Robot Assembly Line Balancing Problems, *ResearchGate*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/364790312> (accessed 19 May 2023).
8. Available at: https://peshkin.mech.northwestern.edu/publications/1996_Colgate_CobotsRobotsCollaboration.pdf (accessed 20 May 2022).
9. GOST R 60.0.0.4-2019/ISO 8373:2012. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Roboty i robototekhnicheskie ustroystva. Terminy i opredeleniya [GOST R 60.0.0.4-2019/ISO 8373:2012. National standard of the Russian Federation. Robots and robotic devices. Terms and Definitions]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200162703> (accessed 20 May 2023).
10. IFR. Demystifying Collaborative Industrial Robots. Available at: http://robotunion.ru/files/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf (accessed 20 May 2023).
11. Interact Analysis. Collaborative Robots. Apr. 2022. Available at: <https://interactanalysis.com/research/collaborative-robots-apr-2022/> (accessed 20 May 2023).
12. GOST R 60.1.2.3-2021/ISO/TS 15066:2016. Roboty i robototekhnicheskie ustroystva. Trebovaniya bezopasnosti dlya robotov, rabotayushchikh sovместно s chelovekom [GOST R 60.1.2.3-2021/ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices. Safety requirements for robots working together with humans]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200180499> (accessed 20 May 2023).
13. GOST R 60.1.2.1-2016/ISO 10218-1:2011. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Roboty i robototekhnicheskie ustroystva. Trebovaniya po bezopasnosti dlya promyshlennykh robotov. Ch. 1. Roboty [GOST R 60.1.2.1-2016/ISO 10218-1:2011. National standard of the Russian Federation. Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1. Robots]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200141084> (accessed 20 May 2023).
14. GOST R 60.1.2.2-2016/ISO 10218-2:2011. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. «Roboty i robototekhnicheskie ustroystva. Trebovaniya po bezopasnosti dlya promyshlennykh robotov. Ch. 2. Robototekhnicheskie sistemy i ikh integratsiya» [GOST R 60.1.2.2-2016/ISO 10218-2:2011. National standard of the Russian Federation. “Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2. Robotic systems and their integration]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200141449> (accessed 20 May 2023).
15. Haddadin S.; Croft E. Physical human-robot interaction, *In Springer Handbook of Robotics*. Springer: Cham, Switzerland, 2016, pp. 1835-1874.
16. Ford Martin. Arkhitektory intellekta: vsya pravda ob iskusstvennom intellekte ot ego sozdately [The Architects of Intelligence: The whole truth about artificial intelligence from its creators]. St. Petersburg: Piter, 2020, 416 p.
17. Civil Law Rules on Robotics (2015/2103(INL)). Available at: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051_EN.html (accessed 20 May 2023).
18. European Parliament. REPORT with recommendations to the Commission on Civil Law Rules on Robotics (2015/2103 (INL)). Debates, 15 February 2017. Available at: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=CRE&reference=20170215&secondRef=ITEM-014&language=EN&ring=A8-2017-0005> (accessed 20 May 2023).
19. Azimov A. Khorovod. Chernyy stolb [Round dance. Black pillar]. Moscow: Znanie, 1963, 146 p.
20. Begishev I.R. Ob oborote robotov, ikh sostavnykh chastey (moduley) (initsiativnyy proekt federal'nogo zakona) [On the turnover of robots, their components (modules) (initiative draft federal law)]. Kazan': Izd-vo «Poznanie» Kazanskogo innovatsionnogo universiteta, 2021.
21. Proekt Grishina Dmitriya Sergeevicha Grishin Robotics [Project Grishin Dmitry Sergeevich Grishin Robotics]. Available at: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjkusH8uIv_AhUVrosKHcjCBlwQFnoECBAQAQ&url=http%3A%2F%2Frobopravo.ru%2Fuploads%2Fs%2Fz%2F6%2Fg%2Fz6gj0wkwhv1o%2Ffile%2FbESvQz3Y.pdf&usg=AOvVaw0vT6JYirXxQ0caCIHAZRup (accessed 20 May 2023).
22. Arkhipov V.V., Bakumenko V.V., Volynets A.D. i dr. Regulirovanie robototekhniki: vvedenie v «Robopravo». Pravovye aspekty razvitiya robototekhniki i tekhnologiy iskusstvennogo intellekta [Regulation of Robotics: An Introduction to RoboPravo. Legal aspects of the development of robotics and artificial intelligence technologies], ed. by A.V. Neznamova. Moscow: Infotropik Media, 2018, 232 p.

23. New Laws of Robotics: Defending Human Expertise in the Age of AI” by Frank Pasquale
Copyright © 2020 by the President and Fellows of Harvard College Published by arrangement
with Harvard University Press.
24. Webb A. The Big Nine: how the tech titans and their thinking machines could warp humanity.
First ed.: March 2019 ed. New York: Public Affairs, 2019. Includes bibliographical references
and index: March 2019, 203 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – Институт вычислительной математики и информационных технологий КФУ; e-mail: Dmitry.kfu@ya.ru; г. Казань, Россия; тел.: +78432065229, доб. 3306; д.т.н.; директор; профессор кафедры анализа данных и технологий программирования.

Смошникова Камилла Рустемовна – e-mail: krsmolnikova@mail.ru; тел.: +79655899966; аспирант.

Chikrin Dmitriy Evgenievich – Institute of Computational Mathematics and Information Technologies of KFU; e-mail: Dmitry.kfu@ya.ru; Kazan, Russia; phone: +78432065229, ext. 3306; dr. of eng. sc.; director; professor of data analysis and programming technologies department.

Smolnikova Kamilla Rustemovna – e-mail: krsmolnikova@mail.ru; phone: +79655899966; post-graduate student.

УДК 656.61: 510.644: 681.51

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-35-45

Л.А. Баракат, И.Ю. Квятковская

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ПРИ БЕЗЭКИПАЖНОМ СУДОВОЖДЕНИИ: НЕЧЕТКИЙ ПОДХОД

В ближайшем будущем безэкипажные суда будут иметь все большее значение, а также будут принимать решения без какого-либо вмешательства человека. Такая ситуация повышает риск столкновения безэкипажных судов с другими объектами. Анализируя аварийные случаи судов, можно отметить, что столкновения из-за нарушения Международных Правил Предупреждения Столкновений Судов в море, 1972 г. (МППСС-72), которые разработаны Международной морской организацией (ИМО), остаются лидером навигационных аварийных происшествий на водных путях. Поэтому автономное предотвращение столкновений на море будет играть основную роль в обеспечении безопасности при безэкипажном судовождении (БЭС). В данной статье рассматривается проблема автономного предотвращения столкновений в нормальных условиях видимости в открытом море. В связи с этим в работе на основании системного анализа существующих правил МППСС-72 разработан шестиэтапный метод устранения угрозы столкновения безэкипажного судна, включающий: механизм принятия решений на основе логической схемы для реализации стратегии, наилучшей в смысле выбранного критерия оптимальности (оптимальная стратегия) при управлении БЭС, где входными данными для системы нечеткой логики предотвращения столкновений судов являются навигационные параметры (скорость, курс, положение и т. д.). База нечетких продукционных правил МППСС-72 состоит из 17 правил предотвращения столкновений для определения наиболее подходящих управляющих воздействия в случае возникновения риска столкновения. Авторами работы в качестве функции принадлежности нечеткого множества была предложена трапецевидная форма, которая позволяет аналитическое представление о риске столкновения безэкипажного судна с препятствием в зависимости от признака ситуации (сектора встречи). Разрабатываемые в настоящее время информационные системы предотвращения столкновений добавило барьер безопасности, чтобы помочь предотвратить столкновения в море. Однако по-прежнему требовались дальнейшие исследования и усилия ученых многих

развитых стран мира. В рамках дальнейших исследований авторами планируется применение описанного метода для разработки информационной системы принятия решений при управлении движением безэкипажного судна.

Безэкипажное судовождение; автономное предотвращение столкновения; принятие решения; риск столкновения; безэкипажное судно; управляющее воздействие.

L.A. Barakat, I.Y. Kvyatkovskaya

DEVELOPING A DECISION-MAKING MECHANISM FOR AUTONOMOUS COLLISION AVOIDANCE OF UNMANNED NAVIGATION: FUZZY APPROACH

In the near future, unmanned vessel (UV) will become increasingly important and will act without any human intervention. This situation raises the collision risk between UVs and general ships. Research on maritime accidents have shown that ship collision accidents due to violation of the International Rules for the Prevention of Collisions at Sea, 1972 (COLREGs-72), which were developed by the International Maritime Organization (IMO), remain the leader of navigational accidents on shipping waterways. In this respect, autonomous preventing collisions is critical for unmanned navigational safety at sea. Hence, in this paper, aiming at the problem of autonomous collision avoidance in open sea area under conditions of good visibility. To this end, a fuzzy logic system to obtain autonomous collision of UVs according to the rules of COLREGs-72 proposed in this paper. The proposed Decision-Making Mechanism (DMM) based on logical schema for the implementation of the strategy that is the best in the sense of the selected optimality criterion (optimal strategy) for unmanned navigation control. The inputs to the collision avoidance fuzzy logic system are the navigational parameters (speed, course, position, etc.). The rule base of the collision avoidance fuzzy logic system consists of 17 rules to avoid collisions. The authors proposed a trapezoidal membership function which allows an analytical representation of the collision risk of an UV with a target ship, depending on the situation feature (encounter sector). Currently, various information collision avoidance systems, which have been developed, added a safety barrier to help prevent collisions at sea. However, further research and efforts of scientists from many developed countries of the world were still required. As part of further research, the authors plan to use the described method to develop an information decision-making system for a movement control of an unmanned vessel.

Unmanned navigation; autonomous collision avoidance; Decision-Making; collision risk; unmanned vessel; control action.

Introduction. The Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs-72), which are the international navigational rules and regulations that define safe actions to prevent collisions between crewed ships, was adopted in 1972 and entered into force in 1977. Amendments to the convention on the COLREGs-72 introduced in 1981, 1987, 1989, 1993, 2001, 2007 and 2012 are already in force on the international level [11]. In order to reduce the risk of collision between ships at sea, all maritime vessels are required to comply with all essential collision-avoidance requirements based on the COLREGs, which include 41 rules divided into six sections. In addition to these parts, there are four annexes which provide technical requirements for lights and sound signals.

COLREGs-compliant navigation of unmanned vessels. The advent of UV at present does raise questions across the shipping industry as to whether these vessels can strictly comply with the current requirement of the COLREGs-72, including on Rules 2 (*Responsibility*), 5 (*Look-out*), 8 (*Action to avoid a collision*) and 18 (*Responsibilities between vessels*). Within the framework of Rule 2 of the COLREGs, the ship's owner, captain and crew are legally responsible for applying of COLREGs 72. But in an unmanned navigation, it will be difficult to determine the person responsible for infraction or violation of these rules of the COLREGs, since an UV can operate independently with no human intervention or interaction.

The first step of decision-making for autonomous collision avoidance is based on Rules 5 and 7(a), where an UV should constantly be able to carry out joint visual and auditory observation of the marine environment using microphones, daylight and IR cameras and all available means of observation, taking into account the need for coordination between the algorithms of "vision" and "hearing" in accordance with a trained observer. Therefore, the International Maritime Organization (IMO) needs to make appropriate changes, as well as additional clarifications to these rules.

Rule 7 (*Risk of collision*) emphasizes that on-time assessment of the risk of collision is a necessary condition for safe navigation. Therefore, in an unmanned navigation, continuous analysis of the navigation situation allows to sufficiently assess the risk of a collision and make effective decisions to prevent collisions.

Rules 13 (*overtaking*), 14 (*Head-on situation*), 15 (*Crossing situation*) and 18 (*Responsibilities between vessels*) are the main provisions defining behavior in dangerous encounter situations of vessels, and guidelines for decision-making. As shown in Fig. 1, each of UV and target ship in the head-on situation should avoid the collision in the direction of the starboard (see Fig. 1,a). The UV in the overtaking situation can set a course in the direction of the starboard of the target ship (see Fig. 1,b). The UV in the crossing situation must alter the course to the starboard (see Fig. 1,c). The target ship in the crossing situation must alter the course to the starboard (see Fig. 1,d).

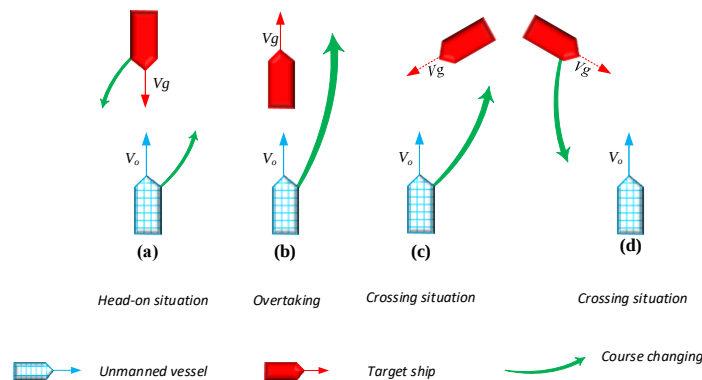


Fig. 1. Encounter situations of unmanned vessel and target ship

Rule 18 covers the relative responsibilities of various vessels on the principle of "who gives way to whom", unless any other rule requires otherwise. In this regard, a vessel with better maneuverability gives way to a vessel with less maneuverability. Each ship can be defined as a stand-on or give-way according to the COLREGs-72 rules [4].

An UV will be able to take early and decisive action to avoid collision in accordance with rules 16 (*Action by give-way vessel*) and 17 (*Action by stand-on vessel*). In fact, COLREG-72 is a system which is based on a set of fuzzy production rules about behavior. This system consists of (condition, action) pairs which mean, "If condition then action".

Problem formulation and approach. The model of intelligent decision-making for autonomous collision avoidance within the framework of COLREGs-72 is considered as a classification model, provided that the input factors are described in the form of linguistic variables characterizing the parameters of the automatic vessel motion control system, and establishing a correspondence between sets of fuzzy variables and elements of the set of control decisions for the implementation of the COLREGs-72.

Rule 8 includes maneuvering actions to be taken to prevent collisions with another vessel. This rule requires that the change in course and/or speed taken to prevent a collision should have a sufficiently large magnitude to be easily detected by other vessels. The effectiveness of the action shall be carefully checked until the other vessel is finally past and clear. In general, the order in which these actions are performed is given by the following hierarchy of the Decision-Making:

$$D_1 \triangleright D_2 \triangleright D_3 \triangleright D_4, \quad (1)$$

where $\triangleright$ is preference relation symbol; D_1 denotes vessel should alter course to starboard side; D_2 is vessel speed reduction to a full stop; D_3 denotes vessel should alter course to starboard with simultaneous speed reduction; D_4 denotes vessel should alter course to the port side.

Based on linguistics terminology description of actions included in the Rule 8 of COLREGS-72 and taken in various situations to prevent collisions of vessels a set of several utterances is given as follows:

$$Rule_n = IF \langle A_n \rangle THEN \langle B_n \rangle, \quad (2)$$

where A_n , B_n are fuzzy utterances of linguistic variables which defined on the input and output values, respectively, for $n = 1$ to 4. Therefore, we can represent the actions included in the Rule 8 of COLREGS-72 to avoid collision in a fuzzy form:

Rule₁: IF «UV sail upon the high seas» THEN «change the course of movement by at least $30 - 90^\circ$ ».

Rule₂: IF «the vessel has turned to the port side for passing» THEN «it should be made much earlier than a possible change of course to the starboard side».

Rule₃: IF «there is sufficient space » THEN «movement course change alone may be the most effective action to prevent the close approach».

Rule₄: IF «it is necessary to prevent a collision » OR «allow more time to assess the situation» THEN «UV should slacken her speed» OR «stop completely».

A Decision-Making Mechanism for autonomous collision avoidance. As shown in Fig. 2, a hierarchy of rules was developed to formulate decision-making stages for autonomous collision avoidance in normal visibility conditions upon the high seas according to the part B (*Steering and Sailing Rules*) of COLREGs which establish internationally agreed system for safe navigation.

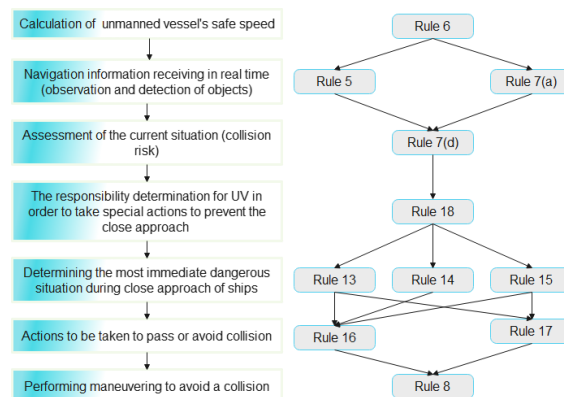


Fig. 2. Hierarchy of decision-making within the framework of the COLREGs

Based on these rules, in the context of fuzzy sets and fuzzy logic, a *Decision-Making Mechanism* has been developed in this paper to implement a Decision-Making strategy for unmanned navigation:

Stage 1. Check Rule 6 (UV shall at all times proceed at a safe speed).

Stage 2. Check Rule 5 (keeping a lookout by camera and aural censoring equipment fixed to the ship) and Rule 7(a) (properly use all available means to determine in time if there is a risk of collision).

Stage 3. IF «Rule 5 is true» AND «Rule 7(a) is true» THEN «go to the step 4» ELSE «go to step 1».

Stage 4. Check Rule 7(d) (assessment of the current situation considering that UV will not create the potential for collision).

Stage 5. IF «Rule 7(d) is true» THEN «it is necessary to calculate the bearing among ships and fix its value» AND «go to the step 6» ELSE «collision hazard exists».

Stage 6. Check Rule 18 (Unmanned ship has a duty to avoid ships, such as ships not under command).

Stage 7. IF «Rule 18 is false» AND «collision risk exists in a traffic lane» THEN «the relevant Rules of navigation and maneuvering should apply» ELSE «go to the step 8».

Stage 8. Check Rule 13 (the rule for overtaking ships), Rule 14 (Head-On Situation) and Rule 15 (Crossing Situation).

Stage 9. IF «Rule 13 is true» OR «Rule 15 is true» THEN «check Rules 16 and 17» AND «go to the step 11» ELSE «go to the step 10».

Stage 10. IF «Rule 14 is true» THEN «check Rule 16» AND «go to the step 12».

Stage 11. IF «Rule 16 is false» AND «Rule 17 is false» THEN «collision hazard exists» AND «go to the step 12».

Stage 12. Check Rule 8 (take action very early to ensure there is no collision risk).

Stage 13. Achieving the goal (avoiding the collision).

A Collision Avoidance Method for unmanned navigation. According to the recommendations of The Federal Agency for Sea and Inland Water Transport (Rosmorrechflot) on the use of COLREGs-72 by autonomous ships in automatic control mode and the resolution No. 2031 of 5 December 2020 “on the regulations on conducting an experiment on the trial operation of autonomous ships under the State flag of the Russian Federation” by the Government Decree [1], there are four zones in the area around the vessel as shown in Fig. 3.

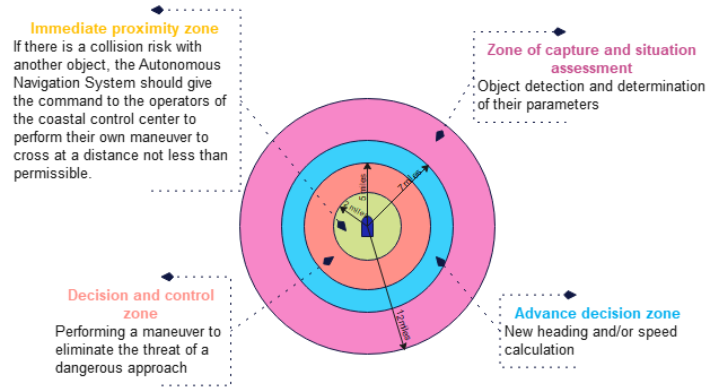


Fig. 3. Approximate zones around the vessel in case of dangerous approach in automatic control mode

Using a scenario that assumed that in the navigation area an UV and the target ship are at positions (x_o, y_o) and (x_g, y_g) , respectively. The speed and movement course of each are represented as V_o, V_g , and ψ_o, ψ_g , respectively. Fig. 4 illustrates encounter situation of UV and the target ship while sailing to help understand the relative parameters of and their calculations.

The Distance to Closest Point of Approach (DCPA) can be obtained as follows [3]:

$$DCPA = D \cdot |\sin(\psi_r - a_g - 180)|, \quad (3)$$

where D is the relative distance between the UV and the target ship which can be given as follows [2]:

$$D = \sqrt{(x_g - x_o)^2 + (y_g - y_o)^2}, \quad (4)$$

a_g is the azimuth of the detected obstacle (target ship).

ψ_r denotes the relative movement course which can be calculated as follows:

$$\psi_r = \cos^{-1} \left(\frac{V_o - V_g \cdot \cos(\psi_o - \psi_g)}{V_r} \right) \quad (5)$$

here V_r represents the relative velocity, which can be obtained using the following:

$$V_r = \sqrt{V_o^2 + V_g^2 - 2V_o \cdot V_g \cdot \cos(\psi_o - \psi_g)}. \quad (6)$$

Finally, Time to Closest Point of Approach (TCPA) can be obtained from [7]:

$$TCPA = DCPA / V_r. \quad (7)$$

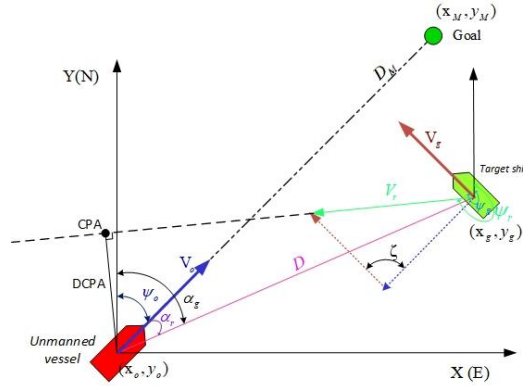


Fig. 4. Relative parameters of an unmanned vessel and the target ship encounter while sailing

(x_M, y_M) – goal position, CPA – Closest Point of Approach, ζ – the relative angle (angle less than 90) between the courses of the UV and the obstacle, D_M – the distance between UV and the goal, α_r – the relative bearing.

After identifying the main parameters, the next step is to avoid collision at sea. This paper proposes a six-step method for UV collision avoidance in accordance with COLREGs-72 at various positions with the target ship:

Step1. Dividing the zone at a distance of 12 miles (Rosmorrechflot's requirements) around each UV and target ship into eight sectors, the boundaries of which are determined by bearing, as shown in Fig. 5.

Step2. Determination of the set of sectors around the UV $I = (A, B, C, D, E, F, G, H)$.

Step3. Definition of the set of sectors around the target ship $j = (a, b, c, d, e, f, g, h)$.

Step4. Determination of the set of possible relative positions of a target ship with an UV (situation feature). In this case, for example, D_c means that the target ship is in the UV sector D and in its own sector c .

Step5. Analysis of the obtained set I_j to determine the recommended control actions in accordance with the appropriate COLREGs-72, depending on the relative approach speed ($V_K = V_g / V_o$).

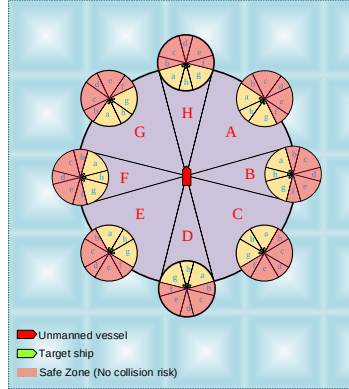


Fig. 5. Sectors used to classify encounter situations

Step6. Create a fuzzy set of the rule base of a Fuzzy Inference System (FIS) to prevent ship collisions which determines the necessary control actions to avoid a collision in the presence of a target ship at a distance of ≤ 12 miles around the UV.

Fig. 6 illustrates the basic building block of the inference process that is used to control speed, course and trajectory of UV to avoid a collision under conditions of uncertainty. The defuzzification technique for the proposed FIS can be the Center of Gravity method (CG method). The advantage of this method is that all active rules take part in the defuzzification process. However, the CG method has a number of systematic errors: a large cost of calculation, the narrowing of the range of defuzzification and the defuzzified value is relatively easy to calculate, but computationally rather complex and therefore results in quite slow inference cycles, and leads to unwanted results if the fuzzy set is not unimodal [21, 22]. These errors lead to the fact that accuracy of fuzzy systems decreases. It is possible to solve these problems and increase the accuracy of the fuzzy system, as noted in [23], through the method of areas' ratio (MAR) which can be used only for the triangular and trapezoidal membership functions.

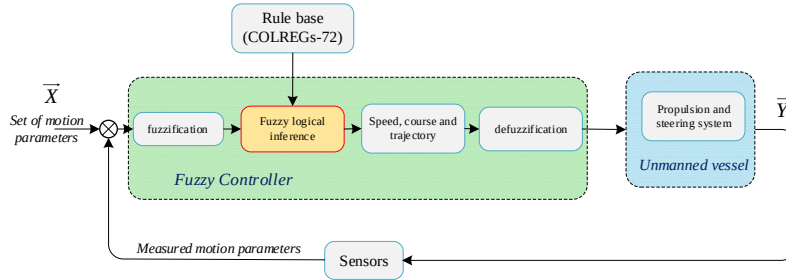


Fig. 6. Fuzzy Inference System to prevent ship collisions

Results and analysis. In general, the rule base is as follows:

$$Rule_n = IF \langle I_j \text{ is true} \rangle THEN \langle \text{control action} \rangle \quad (8)$$

Rule₁: IF $\langle A_b \text{ is true} \rangle$ OR $\langle A_c \text{ is true} \rangle$ OR $\langle A_d \text{ is true} \rangle$ OR $\langle A_e \text{ is true} \rangle$ OR $\langle A_f \text{ is true} \rangle$ OR $\langle B_b \text{ is true} \rangle$ OR $\langle B_c \text{ is true} \rangle$ OR $\langle B_d \text{ is true} \rangle$ OR $\langle B_e \text{ is true} \rangle$ OR $\langle B_f \text{ is true} \rangle$ OR $\langle C_b \text{ is true} \rangle$ OR $\langle C_c \text{ is true} \rangle$ OR $\langle C_d \text{ is true} \rangle$ OR $\langle C_e \text{ is true} \rangle$ OR $\langle C_f \text{ is true} \rangle$ OR $\langle D_b \text{ is true} \rangle$ OR $\langle D_c \text{ is true} \rangle$ OR $\langle D_d \text{ is true} \rangle$ OR $\langle D_e \text{ is true} \rangle$ OR $\langle D_f \text{ is true} \rangle$ OR $\langle E_b \text{ is true} \rangle$ OR $\langle E_c \text{ is true} \rangle$ OR $\langle E_d \text{ is true} \rangle$ OR $\langle E_e \text{ is true} \rangle$ OR $\langle E_f \text{ is true} \rangle$ OR $\langle F_b \text{ is true} \rangle$ OR $\langle F_c \text{ is true} \rangle$ OR $\langle F_d \text{ is true} \rangle$ OR $\langle F_e \text{ is true} \rangle$ OR $\langle F_f \text{ is true} \rangle$ OR

« G_b is true» OR « G_c is true» OR « G_d is true» OR « G_e is true» OR « G_f is true» OR « H_b is true» OR « H_c is true» OR « H_e is true» OR « H_f is true» THEN «no collision risk» AND «save the speed and course of the UV and the target ship».

Rule₂: IF « H_a is true» AND « $V_K \ll 1$ » THEN «save the speed of the UV» AND «change the course of the UV to starboard» AND «save the speed and course of the target ship».

Rule₃: IF « H_g is true» AND « $V_K \ll 1$ » THEN «save the speed of the UV» AND «change the course of the UV to the port side» AND «save the speed and course of the target ship».

Rule₄: IF (« H_a is true» OR « H_g is true») AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «no collision risk» AND «save the speed and course of the UV and the target ship».

Rule₅: IF « H_h is true» THEN «change the course of the UV and the target ship to starboard» AND «save the speed of the UV and the target ship».

Rule₆: IF « H_a is true», THEN «increase the speed of the UV» AND «change the course of the UV to starboard» AND «save the speed and course of the target ship».

Rule₇: IF (« A_h is true» OR « A_g is true» OR « A_a is true» OR « B_h is true» OR « B_g is true» OR « B_a is true» OR « C_h is true» OR « C_g is true» OR « C_a is true» OR « D_h is true» OR « D_g is true» OR « E_h is true» OR « E_a is true» OR « E_g is true» OR « F_h is true» OR « F_a is true» OR « F_g is true» OR « G_h is true» OR « G_a is true» OR « G_g is true») AND « $V_K \ll 1$ » THEN «no collision risk» AND «save the speed and course of the UV and the target ship».

Rule₈: IF « A_h is true» AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «reduce the speed of the UV» AND «change the course of the UV to the port side» AND «save the speed and course of the target ship».

Rule₉: IF « A_a is true» AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «save the speed of the UV» AND «change the course of the UV to starboard» AND «save the speed and course of the target ship».

Rule₁₀: IF (« A_g is true» OR « B_h is true» OR « G_a is true» OR « B_g is true» OR « C_g is true») AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «increase the speed of the UV» AND «save the course of the UV» AND «save the speed and course of the target ship».

Rule₁₁: IF (« B_a is true» OR « C_h is true» OR « C_a is true» OR « G_g is true») AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «reduce the speed of the UV» AND «save the course of the UV» AND «save the speed and course of the target ship».

Rule₁₂: IF « G_h is true» AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «change the course of the UV to the port side» AND «reduce the speed of the UV» AND «save the speed and course of the target ship».

Rule₁₃: IF « D_h is true» AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «save the speed and course of the UV» AND «increase the speed of the target ship» AND «change the course of the target ship to starboard».

Rule₁₄: IF « D_g is true» AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «save the speed and course of the UV» AND «increase the speed of the target ship» AND «change the course of the target ship to the port side»;

Rule₁₅: IF (« E_h is true» OR « E_a is true» OR « E_g is true» OR « F_g is true») AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «save the speed and course of the UV» AND «save the course of the target ship» AND «reduce the speed of the target ship».

Rule₁₆: IF « F_h is true» AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «save the speed and course of the UV» AND «reduce the speed of the target ship» AND «change the course of the target ship to starboard».

Rule₁₇: IF « F_a is true» AND (« $V_K \gg 1$ » OR « $V_K \approx 1$ ») THEN «save the speed and course of the UV» AND «increase the speed of the target ship» AND «save the course of the target ship».

Moreover, the concepts of the collision risk degree can be formulated by the trapezoidal membership function which allows an analytical representation of the collision risk of an UV with a target ship, depending on the situation feature (encounter sector). The graphical representation of this membership function for is shown in Fig. 7.

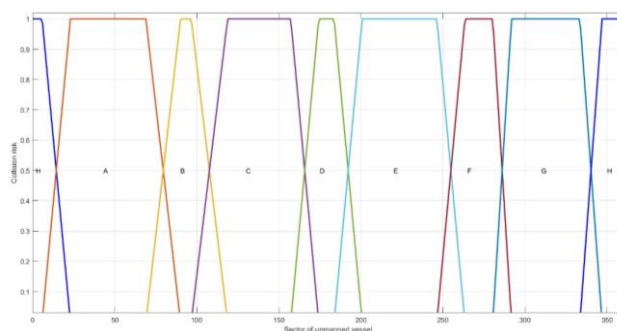


Fig. 7. Unmanned vessel encounter sectors membership function

Conclusions. In this study, we presented a fuzzy-logic approach for autonomous collision avoidance of unmanned navigation, since the International Regulations for Preventing Collisions at Sea is a system which is based on a set of fuzzy production rules about behavior and consists of (condition, action) pairs which mean, "If condition then action".

This paper proposed a six-step method for UVs collision avoidance considering COLREGs-72 rules at various positions with the target ship. In this method the rule base of a Fuzzy Inference System to prevent ship collisions is formed to determine the necessary control actions.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 2031 of 5 December 2020 "on the regulations on conducting an experiment on the trial operation of autonomous ships under the State flag of the Russian Federation". ConsultantPlus.
2. Abebe M., Noh Y., Seo C., Kim D., & Lee I. Developing a ship collision risk Index estimation model based on Dempster-Shafer theory // *Applied Ocean Research*. – 2021. – 113. – 102735.
3. Brcko T., Androjna A., Srše J., & Boć R. Vessel multi-parametric collision avoidance decision model: Fuzzy approach // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021. – 9 (1). – 49.
4. Ahmed Y.A., Hannan M.A., Oraby M.Y., & Maimun A. COLREGs compliant fuzzy-based collision avoidance system for multiple ship encounters // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021. – 9 (8). – 790.
5. Ha J., Roh M.I., & Lee H.W. Quantitative calculation method of the collision risk for collision avoidance in ship navigation using the CPA and ship domain // *Journal of Computational Design and Engineering*. – 2021. – 8 (3). – P. 894-909.
6. Zhao X., He Y., Huang L., Mou J., Zhang K., & Liu X. Intelligent Collision Avoidance Method for Ships Based on COLREGs and Improved Velocity Obstacle Algorithm // *Applied Sciences*. – 2022. – 12 (18). – 8926.
7. Chen D., Dai C., Wan X., & Mou J. A research on AIS-based embedded system for ship collision avoidance // In 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). – IEEE, June 2015. – P. 512-517.
8. Баракат Л.А. Возможности и перспективы применения метода рассуждения по прецедентам для интеллектуального принятия решений при безэкипажном судовождении // IX региональная научно-практической конференции. Томск, 2020. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – С. 5- 8.
9. Баракат Л. Предотвращение столкновений безэкипажных судов с использованием глубокого обучения с подкреплением // Пятая международная научно-практическая конференция. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИМК МТМТС-2019): Тр. конференции. – М.: Изд-во Перо, 2019. – С. 102-105. – ISBN 978-5-00150-311-8.
10. Баракат Л.А., Квятковская И.Ю. Интеллектуальное принятие решений по автономному предотвращению столкновений безэкипажных судов на основе алгоритма глубокой Q-сети // 64-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета: Матер. конференции. Астрахань, 20-25 апреля 2020 г. – Астрахань: Изд-во АГТУ.

11. Barakat L.A. Markov decision-making process for autonomous collision avoidance of unmanned ships // X Regional Scientific and Practical conference. – Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2021. – P. 236-239.
12. Deng F., Jin L., Hou X., Wang L., Li B., & Yang H. COLREGs: Compliant Dynamic Obstacle Avoidance of USVs Based on the Dynamic Navigation Ship Domain // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – 9 (8). – 837.
13. Burmeister H.C., & Constanpel M. Autonomous collision avoidance at sea: A survey // Frontiers in Robotics and AI. – 2021. – 297.
14. Miyoshi T., Fujimoto S., & Rooks M. Study of principles in COLREGs and interpretations and amendments COLREGs for maritime autonomous surface ships (MASS) // Transactions of Navigation. – 2021. – 6 (1). – P. 11-18.
15. Hannaford E., Maes P. & Van Hassel E. Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey // WMU J Marit Affairs. – 2022. – 21. – P. 233-266.
16. Porathe T. Safety of autonomous shipping: COLREGs and interaction between manned and unmanned ships // Proceedings of the European Safety and Reliability conference, ESREL, 2019.
17. Zhou X.Y., Huang J.J., Wang F.W., Wu Z.L., & Liu Z.J. A study of the application barriers to the use of autonomous ships posed by the good seamanship requirement of COLREGs // The Journal of Navigation. – 2020. – 73 (3). – P. 710-725.
18. Hwang C.N., Yang J.M., & Chiang C.Y. The design of fuzzy collision-avoidance expert system implemented by H ∞ -autopilot // Journal of Marine Science and technology. – 2001. – 9 (1), 4.
19. Ho N. Inference rule of collision risk index based on ship near-collision via adaptive neuro fuzzy inference System. Advances in Science // Technology and Engineering Systems Journal. – 2019. – 4 (4). – P. 152-160.
20. Lee S.M., Kwon K.Y., & Joh J. A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines // International journal of control, automation, and systems. – 2004. – 2 (2). – P. 171-181.
21. Ruspini E.H., Bonissone P.P., & Pedrycz W. Handbook of fuzzy computation. – CRC Press. 2020.
22. Пезам А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ, 2015. – 798 с.
23. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., & Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // Applied soft computing. – 2017. – 59. – P. 19-32.

REFERENCES

1. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 2031 of 5 December 2020 “on the regulations on conducting an experiment on the trial operation of autonomous ships under the State flag of the Russian Federation”. ConsultantPlus.
2. Abebe M., Noh Y., Seo C., Kim D., & Lee I. Developing a ship collision risk Index estimation model based on Dempster-Shafer theory, *Applied Ocean Research*, 2021, 113, 102735.
3. Brcko T., Androjna A., Srše J., & Boć R. Vessel multi-parametric collision avoidance decision model: Fuzzy approach, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9 (1), 49.
4. Ahmed Y.A., Hannan M.A., Oraby M.Y., & Maimun A. COLREGs compliant fuzzy-based collision avoidance system for multiple ship encounters, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9 (8), 790.
5. Ha J., Roh M.I., & Lee H.W. Quantitative calculation method of the collision risk for collision avoidance in ship navigation using the CPA and ship domain, *Journal of Computational Design and Engineering*, 2021, 8 (3), pp. 894-909.
6. Zhao X., He Y., Huang L., Mou J., Zhang K., & Liu X. Intelligent Collision Avoidance Method for Ships Based on COLREGs and Improved Velocity Obstacle Algorithm, *Applied Sciences*, 2022, 12 (18), 8926.
7. Chen D., Dai C., Wan X., & Mou J. A research on AIS-based embedded system for ship collision avoidance, In *2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, June 2015, pp. 512-517.
8. Barakat L.A. Vozможности i perspektivy primeneniya metoda rassuzhdeniya po pretsedentam dlya intellektual'nogo prinyatiya resheniy pri bezekipazhnom sudovozhdenii [Opportunities and prospects for applying the method of reasoning by precedents for intelligent decision-making in unmanned navigation], *IX regional'naya nauchno-prakticheskoy konferentsii* [IX Regional Scientific and Practical Conference]. Tomsk, 2020. Tomsk: Tomsk. gos. un-t sistem upr. i radioelektroniki, 2020, pp. 5-8.

9. Barakat L. Predotvrashchenie stolknoveniy bezekipazhnykh sudov s ispol'zovaniem glubokogo obucheniya s podkrepleniem [Collision avoidance for unmanned ships using deep reinforcement learning], *Pyataya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoy tekhniki i morskikh transportnykh sistem» (IKM MTMTS-2019): Tr. konferentsii* [Fifth International Scientific and Practical Conference. "Simulation and integrated modeling of marine equipment and marine transport systems" (IKM MTMTS-2019): Proceedings of the conference]. Moscow: Izd-vo Pero, 2019, pp. 102-105. ISBN 978-5-00150-311-8.
10. Barakat L.A., Kvyatkovskaya I.Yu. Intellektual'noe prinyatie resheniy po avtonomnomu predotvrashcheniyu stolknoveniy bezekipazhnykh sudov na osnove algoritma glubokoy Q-seti [Intelligent Decision Making for Autonomous Collision Avoidance for Unmanned Vessels Based on the Deep Q-Network Algorithm], *64-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mater. Konferentsii* [64th International Scientific Conference of the Astrakhan State Technical University: Proceedings of the Conference]. Astrakhan', 20-25 April 2020. Astrakhan': Izd-vo AGTU.
11. Barakat L.A. Markov decision-making process for autonomous collision avoidance of unmanned ships, *X Regional Scientific and Practical conference*. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2021, pp. 236-239.
12. Deng F., Jin L., Hou X., Wang L., Li B., & Yang H. COLREGs: Compliant Dynamic Obstacle Avoidance of USVs Based on the Dynamic Navigation Ship Domain, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9 (8), 837.
13. Burmeister H.C., & Constapel M. Autonomous collision avoidance at sea: A survey, *Frontiers in Robotics and AI*, 2021, 297.
14. Miyoshi T., Fujimoto S., & Rooks M. Study of principles in COLREGs and interpretations and amendments COLREGs for maritime autonomous surface ships (MASS), *Transactions of Navigation*, 2021, 6 (1), pp. 11-18.
15. Hannaford E., Maes P. & Van Hassel E. Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey, *WMU J Marit Affairs*, 2022, 21, pp. 233-266.
16. Porathe T. Safety of autonomous shipping: COLREGS and interaction between manned and unmanned ships, *Proceedings of the European Safety and Reliability conference, ESREL*, 2019.
17. Zhou X.Y., Huang J.J., Wang F.W., Wu Z.L., & Liu Z.J. A study of the application barriers to the use of autonomous ships posed by the good seamanship requirement of COLREGs, *The Journal of Navigation*, 2020, 73 (3), pp. 710-725.
18. Hwang C.N., Yang J.M., & Chiang C.Y. The design of fuzzy collision-avoidance expert system implemented by H ∞ -autopilot, *Journal of Marine Science and technology*, 2001, 9 (1), 4.
19. Ho N. Inference rule of collision risk index based on ship near-collision via adaptive neuro fuzzy inference System. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2019, 4 (4), pp. 152-160.
20. Lee S.M., Kwon K.Y., & Joh J. A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines, *International journal of control, automation, and systems*, 2004, 2 (2), pp. 171-181.
21. Ruspini E.H., Bonissone P.P., & Pedrycz W. Handbook of fuzzy computation. CRC Press. 2020.
22. Pegat A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie [Fuzzy modeling and control]. Moscow: BINOM, 2015, 798 p.
23. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., & Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio, *Applied soft computing*, 2017, 59, pp. 19-32.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Ажмухамедов.

Баракат Лама Али – Астраханский государственный технический университет; e-mail: lama.barakat@mail.ru; г. Астрахань, Россия; кафедра высшей и прикладной математики; ассистент.

Квятковская Ирина Юрьевна – e-mail: i.kvyatkovskaya@astu.org; кафедра высшей и прикладной математики; д.т.н.; профессор.

Barakat Lama Ali – Astrakhan State Technical University; e-mail: lama.barakat@mail.ru; Astrakhan, Russia; the department of higher and applied mathematics; assistant.

Kvyatkovskaya Irina Yurievna – e-mail: i.kvyatkovskaya@astu.org; the department of higher and applied mathematics; dr. of eng. sc.; professor.

И.Г. Галиуллин, Р.Ф. Сабиров, Д.Е. Чикрин, А.А. Егорчев

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС СЕГМЕНТАЦИИ
ПРЕПЯТСТВИЙ С АРХИТЕКТУРОЙ U-NET ДЛЯ АВТОНОМНОЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Сельское хозяйство играет фундаментальную роль в обеспечении продовольственной безопасности и удовлетворении потребностей населения в пищевых продуктах. Оптимизация производства сельскохозяйственных культур и повышение эффективности работы являются неотъемлемыми задачами для современного сельского хозяйства. В связи с этим все больше внимания уделяется разработке и применению автономных сельскохозяйственных технических систем, способных автоматизировать и оптимизировать различные производственные процессы. Однако эффективность автономных систем ограничивается недостаточным развитием систем обнаружения препятствий и алгоритмов принятия решений. Когда машинно-тракторные агрегаты и другие самоходные машины сталкиваются с препятствиями на своем пути, точное и быстрое распознавание этих препятствий играет решающую роль в принятии соответствующих решений для избежания аварийных ситуаций. В данной статье представлен программно-аппаратный комплекс сегментации препятствий с использованием архитектуры U-Net, разработанный с целью преодоления данных ограничений в автономных сельскохозяйственных технических системах. Архитектура U-Net известна своей способностью к высокоточному распознаванию объектов на изображениях, что делает ее привлекательным выбором для систем машинного зрения в условиях сельского хозяйства. Представленный комплекс обладает высокой производительностью и позволяет проводить сегментацию препятствий типа столб, дерево и кустарниковая растительность в режиме реального времени во время движения машинно-тракторных агрегатов по заданной траектории. Это обеспечивает точное принятие решений и избежание аварийных ситуаций, что существенно повышает эффективность и безопасность работы автономных систем в условиях сельскохозяйственного производства. Проведенные испытания подтвердили эффективность и применимость разработанных решений в реальных сельскохозяйственных условиях. Представленный в статье программно-аппаратный комплекс сегментации препятствий с архитектурой U-Net открывает новые возможности для автономной сельскохозяйственной техники и способствует повышению производительности и эффективности сельского хозяйства. Это важный шаг в развитии современных технологий сельского хозяйства и содействует применению автономных систем для улучшения сельскохозяйственного производства и повышения продуктивности.

Машинно-тракторный агрегат; нейронная сеть; сегментация; распознавание препятствий; алгоритм; система технического зрения; автономный трактор; U-Net.

I.G. Galiullin, R.F. Sabirov, D.E. Chikrin, A.A. Egorchev

**SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR OBSTACLE SEGMENTATION
WITH U-NET ARCHITECTURE FOR AUTONOMOUS AGRICULTURAL
MACHINERY**

Agriculture plays a fundamental role in ensuring food security and meeting the population's needs for food products. Optimization of agricultural crop production and increasing efficiency are essential tasks for modern agriculture. In this regard, more attention is being given to the development and implementation of autonomous agricultural systems capable of automating and optimizing various production processes. However, the effectiveness of autonomous systems is limited by the insufficient development of obstacle detection systems and decision-making algorithms. When agricultural machinery and other autonomous vehicles encounter obstacles in their path, precise and rapid recognition of these obstacles plays a decisive role in making appropriate decisions to avoid accidents. This article presents a software-hardware complex for obstacle seg-

mentation using the U-Net architecture, designed to overcome these limitations in autonomous agricultural systems. The U-Net architecture is renowned for its ability to accurately recognize objects in images, making it an attractive choice for machine vision systems in agricultural conditions. The presented complex boasts high performance and enables real-time obstacle segmentation, including columns, trees, and shrubbery, during the movement of agricultural machinery along a designated trajectory. This ensures precise decision-making and avoidance of accidents, significantly enhancing the efficiency and safety of autonomous systems in agricultural production. Field tests have confirmed the effectiveness and applicability of the proposed solutions under real agricultural conditions. The presented software-hardware complex with U-Net architecture opens up new possibilities for autonomous agricultural technology, promoting increased productivity and efficiency in agriculture. It represents a significant step in the development of modern agricultural technologies and contributes to the use of autonomous systems to enhance agricultural production and improve productivity.

Machine-tractor unit; neural network; segmentation; obstacle recognition; algorithm; computer vision system; autonomous tractor; U-Net.

Ведение. Основной задачей развития сельскохозяйственного производства в нынешних условиях является цифровая трансформация процессов по эксплуатации сельскохозяйственной техники, как самоходной, так и сельскохозяйственных машин. Повсеместное применение различных разработанных устройств параллельного вождения привело к значительному снижению нагрузки на операторов машинно-тракторных агрегатов, но и внесло значительное изменение в процесс их работы в поле. Возможность проведения необходимых технологических работ в растениеводстве в период проведения сезонных полевых работ круглосуточно привела также и к определенным трудностям таким как снижение внимания механизаторов, в отдельных случаях – к засыпанию [1].

Современные разработки устройств параллельного вождения в сельскохозяйственном производстве не имеют функций активного определения и распознавания препятствий, а также алгоритмов их объезда [2].

Существующие разработки и исследования в области распознавания препятствий и построения алгоритмов их объезда, а также принятия решений в основном предназначены для автомобилей и не учитывают специфику проведения полевых работ в условиях отсутствия четких границ траектории движения, разметки, дорожных знаков.

Целью исследования является своевременное определение препятствий машинно-тракторных агрегатов с автономным управлением.

Задачами являются: Определение наличия препятствий на траектории движения машинно-тракторного агрегата с учетом габаритных характеристик трактора и присоединённого к нему сельскохозяйственного орудия, сегментация препятствия по видам, корректирование маршрута с целью построения траектории объезда препятствия и возвращения его на линию первоначального движения, т.е. возвращение на построенную ранее линию параллельно движения с целью минимизации потерь при проведении технологических операций при производстве продукции растениеводства.

Методы и результаты исследования. В условиях работы на поле, основными препятствиями, с которыми сталкивается сельскохозяйственная техника, являются столбы, деревья и кустарниковые насаждения. Эти препятствия могут создавать ряд проблем и вызывать опасность при выполнении различных операций в сельском хозяйстве. Столбы, такие как электрические столбы или заборы, могут ограничивать свободу перемещения сельскохозяйственной техники. При неправильном управлении или отсутствии достаточной видимости, столбы могут быть повреждены или даже повалены, что может привести к серьезным последствиям для оборудования, оператора и окружающей среды.

Деревья и кустарниковые насаждения также представляют определенные проблемы на поле. Они могут создавать узкие проходы или перекрыть доступ к определенным участкам. Для сельскохозяйственной техники может быть сложно маневрировать вокруг деревьев и кустарников, особенно если они расположены плотно или имеют непредсказуемую форму.

Преодоление данных препятствий требует точного обнаружения и оценки их местоположения и размеров [3]. Это позволяет разработать соответствующие стратегии управления, чтобы избежать столкновений и минимизировать риски повреждений оборудования. Далее предлагается техническое решение, основанное на системе машинного зрения, которое может быть применено для обнаружения и классификации данных препятствий.

Учитывая технологические параметры использования сельскохозяйственных машин нами был разработан аппаратно-программный комплекс сегментации объектов препятствий, написан исходный код [4]. По итогам исследования [5–21] темы детектирования [22, 25] и классификации [23, 24] объектов на изображениях в рамках данной работы используется сверточная нейронная сеть U-Net.

Нейронная сеть U-Net представляет собой эффективную архитектуру глубокого обучения, специально разработанную для задач сегментации изображений. Ее особенностью является наличие пути прямого связывания между низкоуровневыми и высокоуровневыми признаками, что позволяет сети успешно извлекать и сохранять мелкие детали и контекст информации при работе с изображениями.

Применение нейронной сети U-Net позволяет достичь высокой точности и эффективности в обнаружении и классификации различных типов препятствий на поле, таких как столбы, деревья и кустарниковая растительность. Благодаря возможности работы в реальном времени, алгоритмы, основанные на U-Net, способны оперативно обрабатывать видеопотоки с камер и предоставлять точную информацию о препятствиях.

Для обработки изображений препятствий на поле, таких как столбы, деревья и кустарниковая растительность, была использована нейронная сеть с настроенной архитектурой U-Net, изображенной на рис. 1. Входные данные подавались в виде тензора размерностью $512 \times 512 \times 3$, представляющего собой изображение с трех каналов RGB.

Архитектура U-Net базируется на принципе энкодер-декодер. Энкодер и декодер состоят из последовательных операций свертки, нормализации и функций активации. Цель этих операций состоит в изменении разрешения карты признаков. В энкодере каждый уровень уменьшает ширину и высоту карты признаков с помощью слоя MaxPool, одновременно увеличивая ее глубину. Декодер, напротив, увеличивает ширину и высоту карты, но уменьшает глубину, используя слой ConvTranspose и объединение карты с соответствующим уровнем энкодера.

Такая архитектура U-Net позволяет эффективно извлекать и сохранять информацию о препятствиях на различных уровнях детализации. Это особенно полезно при распознавании и классификации различных типов препятствий на поле. Последовательность операций свертки, нормализации и активации помогает выявлять ключевые признаки и структуры препятствий, обеспечивая точность и надежность в процессе обработки изображений.

В целях реализации разработанного алгоритма был разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс [26, 27], включающий цветную матричную камеру промышленного сканирования JAI GO-5000C-PGE и вычислитель с характеристиками: ОЗУ 16 ГБ, видеопамять 6 ГБ NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti MAX-Q.

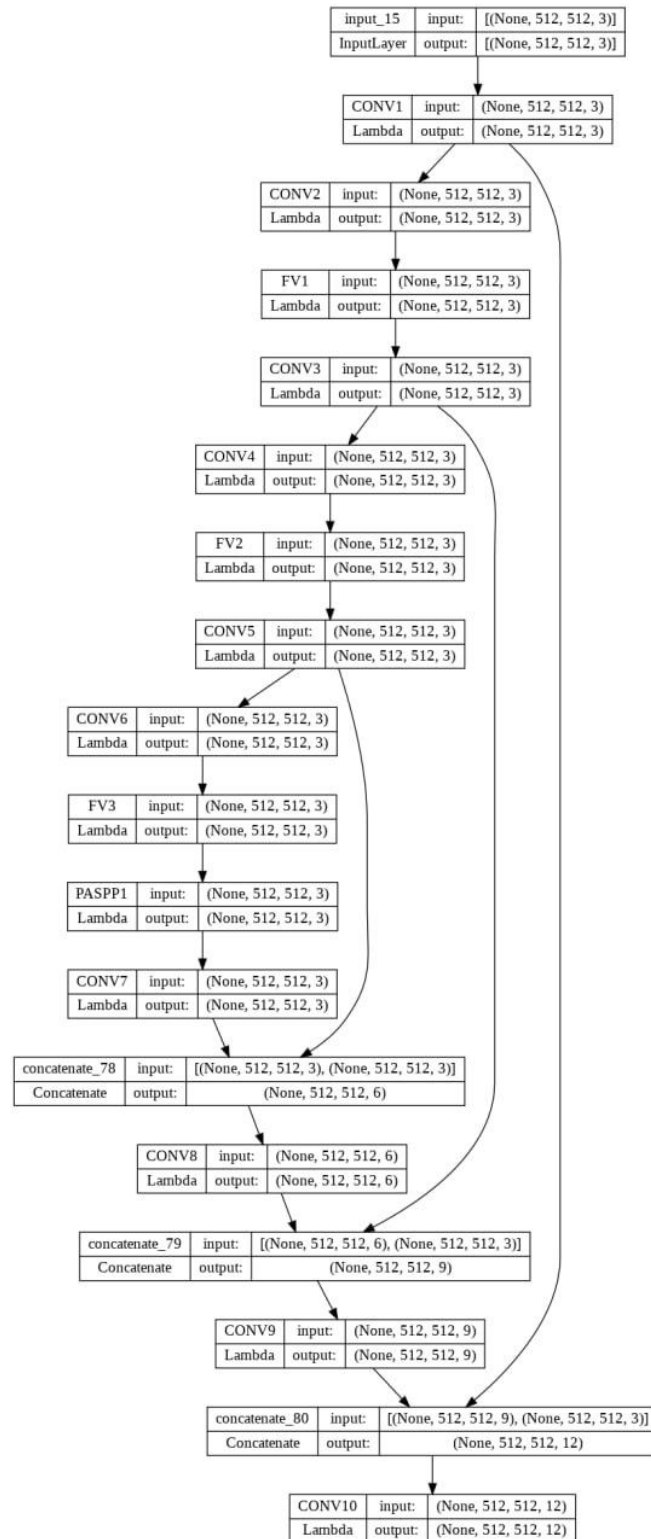


Рис. 1. Архитектура U-Net

Так же была разработана программа на языке Python с использованием нейронной сети. Обучение проводили на выборке из 10000 изображений, предварительно размеченных в целях сегментации препятствий типа столб, дерево и древесно-кустарниковая растительность. В рамках испытаний разработанного аппаратно-программного комплекса были проведены 10 групп экспериментов длительностью по 10 минут каждый по детектированию и классификации объектов классов «столб», «дерево», «кустарниковая растительность». При проведении испытаний были определены интервал времени обнаружения $\Delta T = 0,5$ с и интервал дальности обнаружения до $\Delta S = 40$ м. Результаты проведения испытаний распознавания (детектирование и классификация) представлены в табл. 1 и 2. За нулевую гипотезу принято отсутствие целевого объекта на кадре: ошибка I-го рода соответствует ложной тревоге, ошибка II-го рода – пропуску цели.

Таблица 1

Результаты детектирования объектов

Вид ошибки	Номер испытания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I-го рода	2,82	2,09	1,81	1,26	1,90	2,81	2,80	1,84	2,33	2,32
II-го рода	3,46	2,82	3,19	2,97	2,45	3,24	2,97	2,83	3,52	2,25

Таблица 2

Результаты классификации объектов

Вид ошибки	Номер испытания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I-го рода	2,13	2,54	2,89	2,39	2,62	2,32	2,77	2,39	2,96	2,15
II-го рода	2,11	2,39	2,56	2,08	2,60	2,83	2,64	2,86	2,71	2,38

На рис. 2 представлен вид разработанного аппаратно-программного комплекса системы распознавания препятствий, установленного на автономный трактор ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ».



Рис. 2. Автономный трактор

На рис. 3–5 представлены результаты сегментации препятствий разработанной программы.

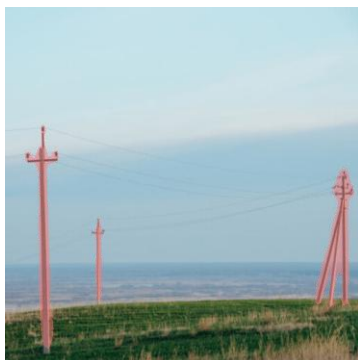


Рис. 3. Распознавание столбов



Рис. 4. Распознавание деревьев и кустарников

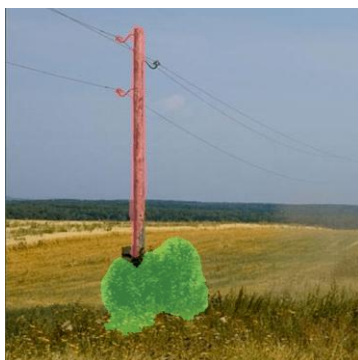


Рис. 5. Комплексное распознавание столба и куста

Выводы. В данной работе показана возможность применения нейронной сети архитектуры U-Net для сегментации и детектирования препятствий типа столб, дерево, куст и их комбинации.

Проведенное исследование выявило высокую эффективность её применения в задаче сегментации и детектировании - принятия решения по ошибке I-го рода для алгоритмов детектирования составляет в среднем 2,2%, классификации в среднем 2,5%; по ошибке II-го рода для алгоритмов детектирования в среднем 2,9%; классификации в среднем 2,5%.

В дальнейших исследованиях предлагается произвести дообучение на изображениях препятствий на грунте – камней, поваленных деревьев, а также пороговых препятствий и рвов.

Благодарность: Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сабиров Р.Ф., Медведев В.М., Яруллин Ф.Ф., Шафигуллин Г.Т.* Нейросетевое моделирование технологических процессов в сельском хозяйстве // Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса: Матер. международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса, Казань, 07–08 июня 2019 г. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2019. – С. 182-184. – EDN WOJDMR.
2. *Чикрин Д.Е.* Универсальные комплекты автоматизации сельскохозяйственной техники для робо-тизированных агрохозяйств // Международная агропромышленная выставка «АгроВолга 2021». – 2021.
3. *Тормагов Т.А., Генералов А.А., Шавин М.Ю., Рапопорт Л.Б.* Задачи управления движением автономных колесных роботов в точном земледелии // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, № 1 (116). – С. 39-60. – DOI 10.17285/0869-7035.0083. – EDN GWCIQX.
4. Свид. о гос. регистрации прогр. для ЭВМ 2021667661 Рос. Федерация. Программный модуль сегментации объектов препятствий дерево и столб на основе нейронных сетей / Сабиров Р.Ф., Валиев А.Р., Медведев В.М., Шафигуллин Г.Т., Галиуллин И.Г. Заявл. 20.10.2021; зарегистр. 01.11.2021; опубл. 01.11.2021, Бюл. № 11. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47257657>.
5. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. *Сикорский О.С.* Обзор свёрточных нейронных сетей для задачи классификации изображений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – №20. – С. 37-42.
7. *Николенко С., Кадуринов А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.
8. *Atole R.R., Park D.* A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 67-70.
9. *Rajmohan R., Pajany M., Rajesh R., Raghu Raman D., Prabu U.* Smart paddy crop disease identification and management using deep convolution neural network and SVM classifier // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2018. – Vol. 118, No. 15. – P. 255-264.
10. *Athanikar G., Badar P.* Potato Leaf Diseases Detection and Classification System // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2016. – Vol. 5, Issue 2. – P. 76-88.
11. *Sladojevic S., Arsenovic M., Anderla A., Culibrk D., and Stefanovic D.* Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2016. – 11 p.
12. *Abdullahi H.S., Zubair O.M.* Advances of image processing in Precision Agriculture: Using deep learning convolution neural network for soil nutrient classification // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). – August 2017. – Vol. 4, Issue 8. – P 7981-7987.
13. *Huang H., Deng J., Lan Y., Yang A., Deng X., Zhang L.* A fully convolutional network for weed mapping of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery // PLoS ONE 13(4): e0196302. – 2018.
14. *Inkyu Sa, Zetao Chen, Marija Popovic, Raghav Khanna, Frank Liebisch, Juan Nieto, Roland Siegwia.* WeedNet: Dense Semantic Weed Classification Using Multispectral Images and MAV for Smart Farming // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2018. – Vol. 3 (1). – P. 588-595.
15. *Potena C., Nardi D., Pretto A.* Fast and Accurate Crop and Weed Identification with Summarized Train Sets for Precision Agriculture // IAS 2016: Intelligent Autonomous Systems. – 2017. – 14. – P 105-121.

16. Yao C., Zhang Y., Zhang Y., and Liu H. Application of convolutional neural network in classification of high resolution agricultural remote sensing images // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII2/W7. – 2017. – P. 989-992.
17. Atole R.R., Park D. A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 67-70.
18. Ganchenko V., Doudkin A. Image Semantic Segmentation Based on Convolutional Neural Networks for Monitoring Agricultural Vegetation // *Communications in Computer and Information Science*, Springer, 2019. – 2019. – Ch. 5. – Vol. 1055. – P. 52-63.
19. Adam: A Method for Stochastic Optimization. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.
20. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7803544/>.
21. Densely Connected Convolutional Networks. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1608.06993.pdf>.
22. Чикрин Д.Е. Методологические основы проектирования инфокоммуникационных систем автомобильных транспортных средств высокой степени автоматизации: дисс. ... д-ра техн. наук, 05.13.01. – Казань, 2021. – 399 с.
23. Егорчев А.А. Верифицируемые системы виртуального моделирования беспилотных транспортных средств: дисс. ... канд. техн. наук, 05.13.01. – Казань, 2021. – 340 с.
24. Kots M.V., Chukanov V.S. U-Net adaptation for multiple instance learning // *Journal of Physics: Conference Series*, Saint Petersburg, 21–22 March 2019. Vol. 1236. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012061. – DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012061. – EDN SJUOKU.
25. Ганченко В.В., Дудкин А.А., Шелег С.В. Распознавание сельскохозяйственной растительности на изображениях земной поверхности на основе сверточной нейронной сети U-Net // *Big Data and Advanced Analytics*. – 2021. – № 7-1. – С. 110-116. – EDN ZDCYJM.
26. Валиев А.Р., Мануэль Бинело, Зиганишин Б.Г., Сабиров Р.Ф., Шафигуллин Г.Т., Галиуллин И.Г. Беспилотный трактор // *Вестник НЦБЖД*. – 2021. – № 4 (50). – С. 69-75.
27. Галиуллин И.Г. Система автономного управления движением машинно-тракторного агрегата с использованием отечественной элементной базы // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2022. – № 6 (110). – С. 92-98. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-92-98. – EDN NZIISF.

REFERENCES

1. Sabirov R.F., Medvedev V.M., Yarullin F.F., Shafigullin G.T. Neyrosetevoye modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov v sel'skom khozyaystve [Neural network modeling of technological processes in agriculture], *Sovremennoye sostoyaniye, problemy i perspektivy razvitiya mekhanizatsii i tekhnicheskogo servisa agropromyshlennogo kompleksa: Mater. mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Instituta mekhanizatsii i tekhnicheskogo servisa, Kazan', 07–08 iyunya 2019 g.* [Current state, problems and prospects for the development of mechanization and technical service of the agro-industrial complex: Proceedings of the international scientific and practical conference of the Institute of mechanization and technical service, Kazan, June 07-08, 2019]. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2019, pp. 182-184. EDN WOJDMP.
2. Chikrin D.E. Universal'nye komplekty avtomatizatsii sel'skokhozyaystvennoy tekhniki dlya robotizirovannykh agrokhozyaystv [Universal kits for automation of agricultural machinery for robotic farms], *Mezhdunarodnaya agropromyshlennaya vystavka «AgroVolga 2021»* [International agro-industrial exhibition "AgroVolga 2021"], 2021.
3. Tormagov T.A., Generalov A.A., Shavin M.Yu., Rapoport L.B. Zadachi upravleniya dvizheniem avtonomnykh kolesnykh robotov v tochnom zemledelii [Problems of motion control of autonomous wheeled robots in precision agriculture], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2022, Vol. 30, No. 1 (116), pp. 39-60. DOI 10.17285/0869-7035.0083. EDN GWCIQX.
4. Sabirov R.F., Valiev A.R., Medvedev V.M., Shafigullin G.T., Galiullin I.G. Svid. o gos. registratsii progr. dlya EVM 2021667661 Ros. Federatsiya. Programmnyy modul' segmentatsii ob'ektov prepyatatviy derevo i stolb na osnove neyronnykh setey [Certificate of state registration of computer programs 2021667661 Russian Federation. Software module for segmentation of obstacle objects tree and pillar based on neural networks], *Appl.* 10/20/2021; registered 11/01/2021; publ. 01.11.2021, Bull. No. 11]. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47257657>.

5. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
6. Sikorskiy O.S. Obzor svertochnykh neyronnykh setey dlya zadachi klassifikatsii izobrazheniy [Review of convolutional neural networks for the problem of image classification], *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems], 2017, No. 20, pp. 37-42.
7. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. Glubokoe obuchenie [Deep learning]. St. Petersburg: Piter, 2018, 480 p.
8. Atole R.R., Park D. A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies, (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 67-70.
9. Rajmohan R., Pajany M., Rajesh R., Raghu Raman D., Prabu U. Smart paddy crop disease identification and management using deep convolution neural network and SVM classifier, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018, Vol. 118, No. 15, pp. 255-264.
10. Athanikar G., Badar P. Potato Leaf Diseases Detection and Classification System, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2016, Vol. 5, Issue 2, pp. 76-88.
11. Sladojevic S., Arsenovic M., Anderla A., Culibrk D., and Stefanovic D. Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016, 11 p.
12. Abdullahi H.S., Zubair O.M. Advances of image processing in Precision Agriculture: Using deep learning convolution neural network for soil nutrient classification, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, August 2017, Vol. 4, Issue 8, pp 7981-7987.
13. Huang H., Deng J., Lan Y., Yang A., Deng X., Zhang L. A fully convolutional network for weed mapping of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery // *PLoS ONE* 13(4): e0196302. – 2018.
14. Inkyu Sa, Zetao Chen, Marija Popovic, Raghav Khanna, Frank Liebisch, Juan Nieto, Roland Siegwa. WeedNet: Dense Semantic Weed Classification Using Multispectral Images and MAV for Smart Farming, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, Vol. 3 (1), pp. 588-595.
15. Potena C., Nardi D., Pretto A. Fast and Accurate Crop and Weed Identification with Summarized Train Sets for Precision Agriculture, *IAS 2016: Intelligent Autonomous Systems*, 2017, 14, pp 105-121.
16. Yao C., Zhang Y., Zhang Y., and Liu H. Application of convolutional neural network in classification of high resolution agricultural remote sensing images, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII2/W7, 2017, pp. 989-992.
17. Atole R.R., Park D. A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies, (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 67-70.
18. Ganchenko V., Doudkin A. Image Semantic Segmentation Based on Convolutional Neural Networks for Monitoring Agricultural Vegetation, *Communications in Computer and Information Science*, Springer, 2019, 2019, Part 5, Vol. 1055, pp. 52-63.
19. Adam: A Method for Stochastic Optimization. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.
20. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7803544/>.
21. Densely Connected Convolutional Networks. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1608.06993.pdf>.
22. Chikrin D.E. Metodologicheskie osnovy proektirovaniya infokommunikatsionnykh sistem avtomobil'nykh transportnykh sredstv vysokoy stepeni avtomatizatsii: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methodological foundations for the design of infocommunication systems for automobile vehicles of a high degree of automation: dr. of eng. sc. diss.], 05.13.01. Kazan', 2021, 399 p.
23. Egorchev A.A. Verifitsiruemye sistemy virtual'nogo modelirovaniya bespilotnykh transportnykh sredstv: dis. ... kand. tekhn. nauk [Verifiable systems for virtual simulation of unmanned vehicles: cand. of eng. sc. diss.], 05.13.01. Kazan', 2021, 340 p.
24. Kots M.V., Chukanov V.S. U-Net adaptation for multiple instance learning, *Journal of Physics: Conference Series*, Saint Petersburg, 21–22 March 2019. Vol. 1236. Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019, pp. 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012061. EDN SJUOKU.

25. *Ganchenko V.V., Dudkin A.A., Sheleg S.V.* Raspoznavanie sel'skokhozyaystvennoy rastitel'nosti na izobrazheniyakh zemnoy poverkhnosti na osnove svertochnoy neyronnoy seti U-Net [Recognition of agricultural vegetation on images of the earth's surface based on the convolutional neural network U-Net], *Big Data and Advanced Analytics*, 2021, No. 7-1, pp. 110-116. EDN ZDCYJM.
26. *Valiev A.R., Manuel' Binelo, Ziganshin B.G., Sabirov R.F., SHafigullin G.T., Galiullin I.G.* Bepilotnyy traktor [Unmanned tractor], *Vestnik NTSBZhD* [Vestnik NTsBZhD], 2021, No. 4 (50), pp. 69-75.
27. *Galiullin I.G.* Sistema avtonomnogo upravleniya dvizheniem mashinno-traktornogo agregata s ispol'zovaniem otechestvennoy elementnoy bazy [The system of autonomous control of the movement of the machine-tractor unit using the domestic element base], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2022, No. 6 (110), pp. 92-98. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-92-98. EDN NZIISF.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Галиуллин Искандер Гаязович – Институт вычислительной математики и информационных технологий КФУ; e-mail: isgaluillin@email.com; г. Казань, Россия; тел.: +79046714294; соискатель ученой степени кандидата наук.

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; тел.: +79172727100; директор; д.т.н.; профессор кафедры анализа данных и технологий программирования.

Егорчев Антон Александрович – e-mail: eanton090@gmail.com; тел.: +79172373047; кафедра анализа данных и технологий программирования; к.т.н.; доцент.

Сабиров Раис Фаритович – Казанский государственный аграрный университет; e-mail: agromehanika116@gmail.com; г. Казань, Россия; тел.: 88435674500; кафедра эксплуатации и ремонта машин; к.т.н.; доцент.

Galiullin Iskander Gayazovich – Institute of Computational Mathematics and Information Technologies at Kazan Federal University; e-mail: isgaluillin@email.com; Kazan, Russia; phone: +79046714294; applicant for the degree of cand. of eng. sc.

Chikrin Dmitry Evgenievich – e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; phone: +79172727100; director; dr. of eng. sc.; professor at the department of data analysis and programming technologies.

Egorchev Anton Alexandrovich – e-mail: eanton090@gmail.com; phone: +79172373047; the department of data analysis and programming technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Sabirov Rais Faritovich – Kazan State Agrarian University; e-mail: agromehanika116@gmail.com; Kazan, Russia; phone: +78435674500; the department of machine operation and repair; cand. of eng. sc.; associate professor.

Раздел II. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-56-64

А.А. Белевцев, А.М. Белевцев, В.А. Балыбердин

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ И ПОСТРОЕНИЯ ДОРОЖНЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ БУДУЩИХ СОБЫТИЙ

Инновационное развитие экономики, особенно в высокотехнологичных областях, стимулирует развитие новых подходов к решению задач стратегического анализа, прогноза и оценки приоритетов развития технологических трендов и технологий, обеспечивающих формирование перспективных планов научно-технических и опытно-конструкторских работ. Известные методы оценки и прогнозирования уровня развития технологий основаны на разработке структурно-функциональной концепции развития исследуемой предметной области, её структурной декомпозиции (сверху вниз) и экспертной оценке на заданную временную перспективу. Такой подход имеет ряд существенных недостатков, поскольку не учитывает глобализацию и высокую динамику формирования новых траекторий развития технологий и формирования технологических фронтов снизу вверх. При этом решение задачи оценки приоритетов, времени и стоимости выполнения работ при прогнозировании развития технологий встречает значительные затруднения так как требует от экспертов конкретных числовых оценок. На основании результатов полученных авторами при проведении исследований и разработок в рассматриваемой области в работе предлагается методика формирования прогноза развития технологических трендов и построения дорожных карт, которая обеспечивает: – формирование количественной прогнозной оценки развития технологических трендов и составляющих технологий, с учетом их связности, на основе конструирования будущих событий; – построение дорожных карт (этапов) развития технологических трендов и технологий для заданной предметной области и групп предметных областей; – проведение прогнозных оценок времени реализации технологий и технологических трендов в условиях неопределенности и неполноты информации, отсутствия апробированных количественных оценок и прототипов. В основу методики положена процедура формирования прогноза развития технологических трендов и технологий на основе перехода от логического графа технологического тренда к динамическому графу. Методика обеспечивает получение количественной прогнозной оценки развития технологических трендов и составляющих их технологий: – в условиях неопределенности и неполноты информации; – отсутствия прототипов технологий. При этом учитывается возможное наличие взаимосвязей отдельных технологий и технологических трендов в процессе разработки.

Технологические тренды; технологии; приоритеты; методики; прогноз.

A.A. Belevtsev, A.M. Belevtsev, V.A. Balyberdin

METHODOLOGY FOR FORECASTING THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL TRENDS AND BUILDING ROAD MAP ON THE BASIS OF CONSTRUCTING FUTURE EVENTS

The innovation economics development, particularly in the high technology sphere, stimulates the new ways of solving for strategic analyses, forecasting and priorities estimation tasks. These tasks provide the forming of perspective research plans. Existing methods for assessing and forecasting the level of technology development are based on the development of a structural and

functional concept of the subject area under study, its structural decomposition (top-down) and expert assessment over a given time horizon. This approach has several significant drawbacks as it does not consider globalization and the high dynamics of forming new trajectories of technology development and technological fronts from bottom to top. In addition, the task of prioritizing, timing, and cost estimation of technology development encounters significant difficulties as it requires experts to provide specific numerical assessments. Based on the results obtained by the authors through research and development in the considered area, this work proposes a methodology for forecasting technological trends and constructing roadmaps, which provides: – formation of a quantitative forecast assessment of the development of technological trends and constituent technologies, taking into account their connectivity, based on the construction of future events; – construction of roadmaps for the development of technological trends and technologies for a given subject area and group of subject areas; – conducting forecast assessments of the time required to implement technologies and technological trends in conditions of uncertainty and incomplete information, absence of validated quantitative assessments and prototypes. The methodology is based on the procedure for forecasting the development of technological trends and technologies based on the transition from a logical graph of technological trends to a dynamic graph. The methodology provides a quantitative forecast assessment of the development of technological trends and their constituent technologies: – in conditions of uncertainty and incomplete information; – in the absence of technology prototypes. At the same time, possible interconnections between individual technologies and technological trends during development are taken into account.

Technological trends; technologies; priorities; methods; forecasting.

Введение. Отличительными особенностями современного этапа развития экономики является резкое обострение борьбы за технологический суверенитет в условиях чрезвычайно высокой динамики формирования новых направлений и траекторий технологического развития, а также в связи с неопределенностями, связанными, как с созданием базисов новых технологий, так и инновационных продуктов и новых рынков сбыта.

В этой связи задача прогноза и построения дорожных карт инновационного развития в условиях нечеткости и неполноты информации является исключительно актуальной. Для решения такой задачи необходимо осуществлять оценку и прогнозирование развития технологий в исследуемой области знаний.

Анализ предметной области. Известные методы оценки и прогнозирования уровня развития технологий основаны на разработке структурно-функциональной концепции развития исследуемой предметной области, её структурной декомпозиции (сверху вниз) и экспертной оценке на заданную временную перспективу [1–7].

Такой подход имеет ряд существенных недостатков, связанных с тем, что он:

- ♦ основывается на декомпозиции известных или заданных технологических направлений и технологий [1–3];
- ♦ не учитывает глобализацию и высокую динамику формирования новых траекторий развития технологий и формирования технологических фронтов снизу вверх, а также неполноту информации [4, 5];
- ♦ не рассматривает взаимосвязи технологий в технологических трендах [6, 7].

При этом задача оценки приоритетов, времени и стоимости выполнения работ встречает значительные затруднения так как требует от экспертов конкретных числовых оценок [1, 4–7].

Постановка задачи. С учетом имеющегося опыта авторов в проведении исследований и разработок в рассматриваемой области методика формирования прогноза развития технологических трендов и построения дорожных карт с учетом вышеперечисленных требований должна обеспечивать:

- ♦ формирование количественной прогнозной оценки развития технологических трендов и составляющих технологий, с учетом их связности, на основе конструирования будущих событий;

- ♦ построение дорожных карт (этапов) развития технологических трендов и технологий для заданной предметной области и групп предметных областей;
- ♦ проведение прогнозных оценок времени реализации технологий и технологических трендов в условиях неопределенности и неполноты информации, отсутствия апробированных количественных оценок и прототипов [8, 9, 13, 14].

Разработка методики. Пусть задана предметная область, P_m ($m=1, M$) для которой сформированы технологические тренды C_n^{Pm} , $n = 1, N$. При этом C_n^{Pm} включает некоторую совокупность $\{c_i^n\}$ технологий технологического тренда.

В общем случае технологии $\{c_i^n\}$ обладают логической связностью [11, 12, 15]. Поэтому необходим переход от технологического тренда C_n^{Pm} к логическому графу технологического тренда G_n^{Pm} .

Этот переход может быть осуществлен на основе уравнений логического вывода [8, 18].

Граф технологического тренда G_n^{Pm} , построенный в соответствии с описанной процедурой логического вывода, обладает следующими свойствами:

- ♦ Это иерархический ориентированный снизу вверх граф, в общем случае, сетевой структуры, для которого известна матрица смежности $K_{ij} = \|k_{ij}\|$ порядка $I \times I$. Здесь

$$k_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{если существует дуга соединяющая } i \text{ с вершиной } j = 1 \dots I \\ 0 & \text{если такой связи нет} \end{cases}$$

Иными словами, при $k_{ij}=1$ технология c_i^n должна быть реализована до того, как начнутся исследования по созданию технологии c_j^n .

- ♦ Корневой вершиной графа является предметная область P_m технологий $\{c_i^n\}$

- ♦ Вершины, для которых $\sum_{j=1}^I k_{ij}=0$, являются исходными и формируют нижний уровень графа.

- ♦ Вершины, имеющие входящие и исходящие дуги, являются стоком для вершин нижнего уровня и истоками для вершин верхнего уровня графа.

Для всех технологий $\{c_i^n\}$ определен перечень характеристик, который можно представить в виде следующего кортежа

$$c_i^n \rightarrow \langle \Phi_i^n, t_i^n, S_i^n, \rho_i^n \rangle.$$

Здесь:

Φ_i^n – функциональные назначения технологий c_i^n ;

t_i^n – время на исследования и разработки технологий c_i^n ;

S_i^n – оценка стоимости работ на исследования и разработку технологии c_i^n ;

ρ_i^n – значение вектора приоритетов технологии c_i^n .

Тогда в основу формирования прогноза развития технологических трендов и технологий, а также построения дорожных карт может быть положена процедура формирования будущих событий на основе перехода от логического графа G_n^{Pm} к динамическому графу $G_n^{Pm}(t)$.

Введем шкалу времени t и дискретный шаг измерения $j=1..I$, которые будут определяться логикой взаимодействия технологий, а также прогнозными оценками времени их реализации. При этом вместо обозначения технологий $c_i^n \in G_n^{Pm}$ вводим c_{ij}^n где дополнительный индекс j будет соответствовать не только количественному значению уровня иерархии на графе, но и времени.

Тогда процедуру перехода от логического графа G_n^{Pm} к динамическому графу $G_n^{Pm}(t)$ и построения дорожных карт можно представить в виде следующей последовательности действий.

1. Формируем по оси ординат шкалу времени t с дискретным шагом измерения $t = 1 \dots T$.

Момент начала отсчета оси времени определяется временем проведения мониторинга и формированием графа G_n^{Pm} т.е. на первом этапе на графе отсутствуют виртуальные вершины [8,18], а также вершины технологий, выявленные на последующих этапах проведения прогнозных исследований (мониторинга) [6, 10, 16, 17].

2. Формируем перечень исходных вершин рассматриваемого тренда графа G_n^{Pm} , который формируется из элементов (технологий) c_{ij}^n , для каждого из которых $\sum_{j=1}^J k_{ij}^n = 0$. То есть в первую строку структуры включаются те технологии, для которых нет предшественников.

Функциональная полнота каждой вершины второго и последующих уровней графа $G_n^{Pm}(t)$ будет определяться функциональной полнотой всех технологий (всех истоков), необходимых для ее создания.

В силу того, что время оценки реализации технологий различно, то момент времени начала работ по созданию технологий более высокого ранга при условии обеспечения функциональной полноты будет равен $\max t_{c_{ij}^n}$, где $\max t_{c_{ij}^n}$ – максимальное значение времени разработки технологий первого уровня, формирующих функциональную полноту c_{i2}^n .

Тогда для всех остальных технологий времена выполнения работ будут равны:

$$\max t_{c_{i1}} = t_{i1}^{ci} + \Delta t_{c_{i1}};$$

где $\Delta t_{c_{i1}}$ – время ожидания

3. Формируем перечень вершин стоков второго уровня.

Второй перечень стоковых вершин формируется на базе элементов множества $C_n^{Pm}(2) - c_{i2}^n$, для всех оставшихся элементов, для которых $\sum_{j=1}^J k_{ij}^n = 0$.

Проводим оценку времени реализации технологий:

$$t_{i2}^{ci} = t_{i2}^{ci} + \max t_{c_{i1}}$$

где t_{i2}^{ci} – время разработки технологии c_{i2}

4. Данная процедура проводится при движении снизу вверх для всех стоковых вершин второго уровня с определением момента времени начала работ по каждой.

5. Последовательно выполняем п.п. 3-4 для всех уровней графа G_n^{Pm} и формируем перечень вершин графа $G_n^{Pm}(t)$, напрямую связанных с корневой вершиной P_m .

6. Для всех вершин c_{ij}^n проверяется наличие связей не только с вершинами более высокого ранга в анализируемом тренде G_n^{Pm} но и с другими трендами предметной области P_m .

7. Определяем прогнозное время создания технологий $\bar{c}_{ij}(t)$ напрямую связанных с корневой вершиной P_m .

8. Формируем траекторию $D_{c_i}^{Pm}$ - дорожную карту технологического тренда $C_n^{Pm}(t)$

9. Для каждой вершины траектории $D_{c_i}^{Pm}$ определяем время завершения работ, вектор приоритетов, функциональную полноту, стоимость и время завершения работ $\{U\Phi H_{c_{ij}}, t_i^n, S_i^n, \rho_{ij}^n\}$

10. Для предметной области P_{m+1} выбираем следующий технологический тренд G_{n+1}^{Pm+1} и переходим к п.2

11. Объединяем дорожные карты $D_{c_i}^{Pm}$, сформированные для всех технологических трендов предметной области P с учетом выявленной связности дорожных карт каждого тренда. Формируем дорожную карту прогноза развития технологий и технологических трендов.

Данная процедура может быть положена в основу методики прогнозирования развития технологических трендов и построения дорожных карт.

Экспериментальные исследования. Рассмотрим вариант реализации предлагаемой методики на примере построения дорожной карты для предметной области P_m – «Технологии разработки, программирования, тестирования и диагностирования ПО для СЦУ».

Для заданной предметной области логический граф технологического тренда G_n^{Pm} представлен на рис. 1.

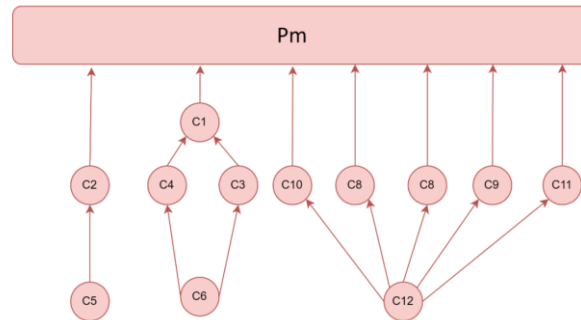


Рис. 1. Логический граф технологического тренда G_n^{Pm}

В табл. 1 представлены оценки времени и функциональные назначения технологий $\{c_i^n\}$ технологического тренда C_n^{Pm}

Таблица 1

Оценка времени и функциональные назначения технологий $\{c_i^n\}$ технологического тренда C_n^{Pm}

Сп	$\Phi_{H_i}^n$	t
C1	Программы безопасных распределенных высокопроизводительных вычислений	3,2
C2	Сверхмощные поисковые системы в распределенных системах	3,1
C3	Программы системы исправления уязвимостей	6,1
C4	Технологии безопасного использования ПО неизвестного происхождения	5,7
C5	Технологии интеграции системных архитектур различных программных сред	4,1
C6	Антивирусные программы	3,2
C7	Технологии распределенного управления	3,7
C8	Технологии ПО устойчивого у кибератакам	3,8
C9	Адаптивное ПО	4,2
C10	Цифровые двойники	1,9
C11	Технологии гомоморфного шифрования	6
C12	Технологии для смешанных широкополосных интегральных схем	5,4

В соответствии с методикой в результате выполнения п.1-7 сформирован динамический граф $G_n^{Pm}(t)$ (рис. 2).

Реализация п.п. 8-10 предлагаемой методики позволяет построить дорожную карту $D_{C_i}^{Pm}$ технологического тренда C_n^{Pm} для предметной области P_m (рис. 2).

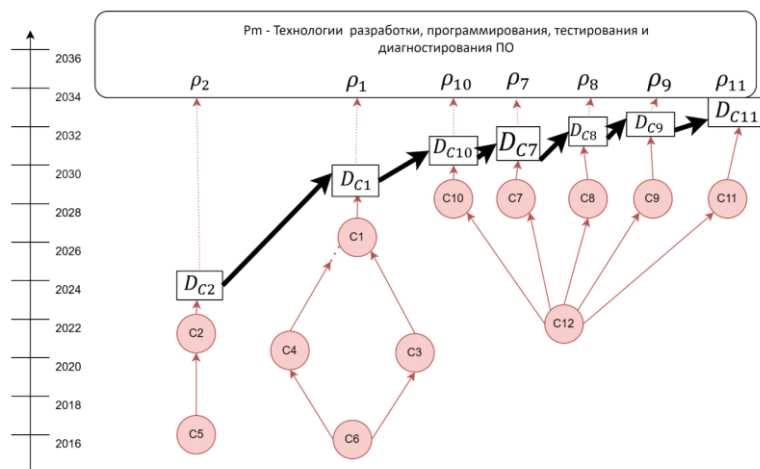


Рис. 2. Динамический граф $G_n^{Pm}(t)$ и дорожная карта $D_{C_i}^{Pm}$

Закключение. Таким образом, в работе показано, что задача прогноза и построения дорожных карт инновационного развития в условиях нечеткости и неполноты информации является исключительно актуальной. При этом известные методы оценки и прогнозирования уровня развития технологий, основанные на разработке структурно-функциональной концепции развития рассматриваемой предметной области, её структурной декомпозиции (сверху вниз) и экспертной оценке на заданную временную перспективу, имеют ряд существенных недостатков, что не обеспечивает их полноценное использование.

С учетом имеющегося опыта авторов в проведении исследований и разработок в рассматриваемой области предложена новая методика формирования прогноза развития технологических трендов и построения дорожных карт с учетом реальных требований рассматриваемой предметной области. В основу методики положена процедура формирования прогноза развития технологических трендов и технологий на основе перехода от логического графа технологического тренда к динамическому графу. Рассмотрен вариант реализации предлагаемой методики на примере построения дорожной карты для предметной области «Технологии разработки, программирования, тестирования и диагностирования программного обеспечения для систем сетецентрического управления».

Методика обеспечивает получение количественной прогнозной оценки развития технологических трендов и составляющих их технологий:

- ◆ в условиях неопределенности и неполноты информации;
- ◆ отсутствия прототипов технологий.

При этом учитывается возможное наличие взаимосвязей отдельных технологий и технологических трендов в процессе разработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю. Развитие военных технологий XXI века: Проблемы, планирование, реализация. – Тверь: Изд-во «Купол», 2009. – 624 с.
2. Saritas O. Systemic foresight methodology. In D. Meissner, L. Gokhberg, & A. Sokolov (Eds.) // Foresight and science, technology and innovation policies: Best practices. – Berlin: Springer, 2013. – P. 83-117.
3. Shibata N., Kajikawa Y., & Sakata I. Detecting potential technological fronts by comparing scientific papers and patents // Foresight. – 2011. – 13 (5). – P. 51-60.

4. Fuller C.M., Biros D.P. and Delen D. An investigation of data and text mining methods for real world deception detection // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – No. 38. – P. 8392-8398.
5. Cobo M.J., Lopez-Herrera A.G., Herrera-Viedma E., Herrera F. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field // *Journal of Informetrics*. – 2011. – Vol. 5. – P. 146-166.
6. Gokhberg L., Fursov K., Miles I., Perani G. Developing and using indicators of emerging and enabling technologies // *Handbook of Innovation Indicators and Measurement* / ed. F. Gault. Cheltenham: Edward Elgar. – 2013. – P. 349-380.
7. Palomino M.A., Vincenti A., Owen R. Optimising web-based information retrieval methods for horizon scanning // *Foresight*. – 2013. – Vol. 15, No. 3. – P. 159-176.
8. Белевцев А.А., Белевцев А.М., Балыбердин В.А. Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 6. – С. 84-94.
9. Балыбердин В.А., Белевцев А.М., Бендерский Г.П. Прикладные методы оценки и выбора решений в стратегических задачах инновационного менеджмента. – 5-е изд. – М.: ИТК «Дашков и К», 2022. – 340 с.
10. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А., Садреев Ф.Г. О разработке интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // *Наукоемкие технологии*. – 2019. – № 3.
11. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А. Об оценке направлений развития информационных технологий для систем сетецентрического управления // Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении: Сб. докладов. – Таганрог, 2017. – С. 8-12.
12. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А., Маркелов Е.Б. Некоторые тенденции развития информационных технологий для систем сетецентрического управления // *Вооружение и экономика*. – 2021. – № 3.
13. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 340 с.
14. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 358 с.
15. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Бендерский Г.П., Белевцев А.А. Анализ направлений развития нано- и IT-технологий для построения специализированных сетевых коммуникационных систем нового поколения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 3.
16. Белевцев А.М., Садреев Ф.Г., Пахомов С.Н. Организация параллельного мониторинга направлений развития науки, техники и технологий в открытых источниках информации // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 5. – С. 86-95.
17. Kim Y., Tian Y., Jeong Y., Jihee R., & Myaeng S.-H. Automatic discovery of technology trends from patent text // In *Proceedings of the 2009 ACM symposium on applied computing*. – 2009. – P. 1480-1487.
18. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А. Методика оценки времени и стоимости реализации технологических трендов в условиях неопределенности и неполноты информации // *Наукоемкие технологии*. – 2019. – № 5.
19. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А., Садреев Ф.Г. Разработка интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // *Наукоемкие технологии*. – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 24-29.
20. Балыбердин В.А., Белевцев А.М., Белевцев А.А. О количественной оценке инновационных проектов // *Избранные научные труды. XV Международная научно-практическая конференция «Управление качеством»*. – М.: МАИ, 2016. – С. 75-79.

REFERENCES

1. Burenok V.M., Ivlev A.A., Korchak V.Yu. Razvitie voennykh tekhnologiy XXI veka: Problemy, planirovanie, realizatsiya [Development of military technologies of the XXI century: Problems, planning, implementation]. Tver': Izd-vo «Kupol», 2009, 624 p.
2. Saritas O. Systemic foresight methodology. In D. Meissner, L. Gokhberg, & A. Sokolov (Eds.), *Foresight and science, technology and innovation policies: Best practices*. Berlin: Springer, 2013, pp. 83-117.

3. Shibata N., Kajikawa Y., & Sakata I. Detecting potential technological fronts by comparing scientific papers and patents, *Foresight*, 2011, 13 (5), pp. 51-60.
4. Fuller C.M., Biros D.P. and Delen D. An investigation of data and text mining methods for real world deception detection, *Expert Systems with Applications*, 2011, No. 38, pp. 8392-8398.
5. Cobo M.J., Lopez-Herrera A.G., Herrera-Viedma E., Herrera F. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field, *Journal of Informetrics*, 2011, Vol. 5, pp. 146-166.
6. Gokhberg L., Fursov K., Miles I., Perani G. Developing and using indicators of emerging and enabling technologies, *Handbook of Innovation Indicators and Measurement* / ed. F. Gault. Cheltenham: Edward Elgar, 2013, pp. 349-380.
7. Palomino M.A., Vincenti A., Owen R. Optimising web-based information retrieval methods for horizon scanning, *Foresight*, 2013, Vol. 15, No. 3, pp. 159-176.
8. Belevtsev A.A., Belevtsev A.M., Balyberdin V.A. Metodika analiza i otsenki prioritetrov tekhnologicheskikh trendov i tekhnologiy [Methods of analysis and evaluation of the priorities of technological trends and technologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6.
9. Balyberdin V.A., Belevtsev A.M., Benderskiy G.P. Prikladnye metody otsenki i vybora resheniy v strategicheskikh zadachakh innovatsionnogo menedzhmenta [Applied Methods of Evaluation and Choice of Solutions in the Strategic Problems of Innovation Management]. 5th ed. Moscow: ITK «Dashkov i K», 2022, 340 p.
10. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Sadreev F.G. O razrabotke intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [On the development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, No. 3.
11. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A. Ob otsenke napravleniy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy dlya sistem setetsentricheskogo upravleniya [On the assessment of directions for the development of information technologies for network-centric control systems], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii: Sb. dokladov* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation "Computer and Information Technologies in Science, Engineering and Management: Collection of Reports]. Taganrog, 2017, pp. 8-12.
12. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Markelov E.B. Nekotorye tendentsii razvitiya informatsionnykh tekhnologiy dlya sistem setetsentricheskogo upravleniya [Some trends in the development of information technologies for network-centric control systems], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2021, No. 3.
13. Saati T.L. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Making decisions. Hierarchy analysis method]. Moscow: Radio i svyaz', 1993. – 340 s.
14. Saati T.L. Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh. Analiticheskie seti [Decision making under dependencies and feedbacks. Analytical networks]. Moscow: LIBROKOM, 2009, 358 p.
15. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A. Analiz napravleniy razvitiya nano- i IT-tekhnologiy dlya postroeniya spetsializirovannykh setevykh kommuni-katsionnykh sistem novogo pokoleniya [Analysis of the directions of development of nano- and IT-technologies for the construction of specialized network communication systems of a new generation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3.
16. Belevtsev A.M., Sadreev F.G., Pakhomov S.N. Organizatsiya parallel'nogo monitoringa napravleniy razvitiya nauki, tekhniki i tekhnologiy v otkrytykh istochnikakh informatsii [Organization of parallel monitoring of directions of development of science, technology and technology in open sources of information], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5, pp. 86-95.
17. Kim Y., Tian Y., Jeong Y., Jihee R., & Myaeng S.-H. Automatic discovery of technology trends from patent text, *In Proceedings of the 2009 ACM symposium on applied computing*, 2009, pp. 1480-1487.

18. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A. Metodika otsenki vremeni i stoimosti realizatsii tekhnologicheskikh trendov v usloviyakh neopredelennosti i nepolnoty informatsii [Methodology for estimating the time and cost of implementing technological trends in conditions of uncertainty and incompleteness of information], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, No. 5.
19. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Sadreev F.G. Razrabotka intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [Development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes] *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 24-29.
20. Balyberdin V.A., Belevtsev A.M., Belevtsev A.A. O kolichestvennoy otsenke innovatsionnykh projektov [On the quantitative assessment of innovative projects], *Izbrannye nauchnye trudy. XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Upravlenie kachestvom»* [Selected Scientific Works. XV International Scientific and Practical Conference "Quality Management"]. Moscow: MAI, 2016, pp. 75-79.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Белевцев Андрей Андреевич – ПАО «Сбербанк»; e-mail: andrey.belevtsev@gmail.com; г. Москва, Россия; старший вице-президент.

Белевцев Андрей Михайлович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Балыбердин Валерий Алексеевич – 3 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; г. Москва, Россия; д.т.н., профессор; заслуженный деятель науки РФ; в.н.с.

Belevtsev Andrey Andrevich – PJSC "Sberbank"; e-mail: andrey.belevtsev@gmail.com; Moscow, Russia; senior vice president.

Belevtsev Andrey Mikhaylovich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

Balyberdin Valeriy Alexeevich – 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; professor; Honored Scientist of the Russian Federation; leading researcher.

УДК 519.688

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-64-74

А.В. Хлуденев

СИНТЕЗ ДОПУСКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Задача назначения допусков дискретных пассивных элементов аналоговых устройств важна при планировании массового серийного производства. Допустимые отклонения параметров от номинальных значений влияют на стоимость, выбор рядов предпочтительных номинальных значений параметров и доступность приобретения этих комплектующих. Значения допусков, а также температурная зависимость параметров элементов и их изменение при старении являются ключевыми факторами, влияющими на работоспособность продукции и выход годных изделий. Решению этой задачи уделяется внимание в научно-технической литературе на протяжении более 40 лет. За это время изменились инструменты для проектирования электронных устройств. Стали широко применяться системы автоматизированного проектирования (САПР) для электроники (англ. electronic design automation (EDA)), обеспечивая сквозной цикл проектирования. Современные EDA имеют ограниченные возможности для допускового проектирования, обеспечивая решение задачи допускового анализа. Пользователям EDA приходится определять допуски элемен-

тов на основе своей интуиции и опыта, посредством трудоемкой интерактивной оптимизации. Использование специализированных программных инструментов для определения допусков без интеграции с EDA профессионального уровня не является приемлемым решением. Целью исследования является обоснование решений для синтеза допусков элементов в цикле сквозного проектирования в среде EDA. В статье рассматриваются методы синтеза допусков, использующие результаты анализа чувствительности. Чувствительности можно определить, используя стандартные инструменты EDA. Рассмотрена реализация этих методов в среде табличного процессора Excel. Для обмена данными между электронной таблицей и базами данных схемы в EDA предложено использовать буфер обмена. Предложенные решения позволяют сократить количество интерактивных операций и затраты времени при назначении допусков. Приведен пример выполнения допускового проектирования аналогового устройства в среде EDA.

Дискретные пассивные элементы; допуски; выход годных изделий; запас работоспособности; система автоматизированного проектирования; инструмент измерения; анализ чувствительности; метод наихудшего случая; статистический метод; электронная таблица.

A.V. Khludenev

TOLERANCE SYNTHESIS BASED ON SENSITIVITY ANALYSIS

The tolerance allocation for passive discrete elements of analog devices is an important task when planning mass serial production. Permissible deviations from rated values affects on the cost, the choice of preferred number series for parameters and the acquisition availability of these components. The element tolerances, as well as the temperature dependence and aging effects, are the key factors affecting the product performances and the yield. The solution of this problem has received attention in the scientific and technical literature for more than 40 years. During this time, the tools for designing electronic devices have changed. Computer-aided design (CAD) systems for electronics - Electronic Design Automation (EDA) have become widely used, providing an end-to-end design flow. Modern EDAs have limited capabilities for tolerance design, providing a solution to the problem of tolerance analysis. EDA users have to determine element tolerances based on their intuition and experience through time-consuming interactive optimization. Using specialized tolerance software tools without integration with professional grade EDA is not an acceptable solution. The purpose of the study is to substantiate decisions for the tolerance synthesis in the end-to-end design flow in the EDA environment. The article discusses methods for determining tolerances using the results of sensitivity analysis. Sensitivities can be obtained using standard EDA tools. The implementation of these methods in the Excel environment is considered. To exchange data between the spreadsheet and the EDA schematic databases is proposed to use the clipboard. The proposed solutions make it possible to reduce the number of interactive operations and time spent when tolerance allocation. An example of analog device tolerance design in the EDA environment is given.

Discrete passive elements; tolerances; production yield; operability margin; computer-aided design; measurement instrument; sensitivity analysis; worst case method; statistical method; spreadsheet.

Введение. Дискретные пассивные компоненты остаются массовыми комплектующими в производстве электронных устройств. Это конденсаторы большой емкости, резисторы с высоким сопротивлением и рассеиваемой мощностью, которые сложно реализовать в виде элементов интегральных схем. Еще сложнее реализовать в интегральном исполнении катушки индуктивности и трансформаторы. Характеристики аналоговых устройств, построенных на интегральных операционных усилителях, определяются параметрами внешних пассивных элементов. В этих случаях часто приходится применять точные пассивные элементы. Применение интегральных аналоговых интерфейсов (англ. analog front end (AFE)) также не позволяет полностью отказаться от использования точных пассивных компонентов.

Допуски пассивных элементов определяют допускаемые отклонения фактических значений сопротивления, емкости, индуктивности от их номинальных значений. Стандартные значения допусков для резисторов устанавливает [1]. Для

конденсаторов постоянной емкости стандартные значения допусков определены в [2]. Этот стандарт также устанавливает ряды предпочтительных номинальных значений для резисторов и конденсаторов. Стандартные значения допусков и коды их маркировки для резисторов и конденсаторов приведены в [3]. Себестоимость производства более точных элементов существенно выше, так как приходится выполнять технологические операции индивидуальной подгонки и разбраковки по группам допусков. Необоснованное применение высокоточных элементов может привести к существенному завышению стоимости комплектующих и снижению конкурентоспособности продукции. Применение компонентов с завышенными допусками приводит к снижению выхода годных изделий. Назначение оптимальных допусков для дискретных пассивных элементов является целью синтеза допусков.

Разработку современных электронных устройств невозможно представить без использования EDA. Пик публикационной активности по тематике допускового проектирования в области электроники приходится на 70–80 годы 20 века [4–7]. Однако инструменты современных EDA позволяют получать лишь оценки разброса выходных параметров и прогнозировать выход годных изделий для назначенных допусков элементов. Задача автоматизации синтеза допусков пассивных элементов продолжает оставаться актуальной [8–14]. В работе [15] обсуждаются вопросы интеграции программ для расчета допусков с системами EDA. В работе [16] предложена инженерная методика допускового проектирования активных RC-фильтров на основе инструментов системы OrCAD PSpice Designer v.17.2 [17]. Практический интерес представляет реализация средств синтеза допусков пассивных элементов, интегрированных с инструментами EDA.

Формализация задачи. Основные свойства аналоговых устройств характеризуются значениями выходных параметров $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. Технические требования формулируются в виде ограничений на допустимые значения Y . Рассмотрим задачу синтеза допусков в простейшей постановке, когда заданы требования в одной из форм:

$$y_{\min} \leq y(X) \leq y_{\max}, \quad (1)$$

$$y(X) \leq y_{\max}, \quad (2)$$

$$y(X) \geq y_{\min}, \quad (3)$$

где $y_{\min}$ минимальное и $y_{\max}$ максимальное допустимые значения выходного параметра y , $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ параметры элементов устройства.

Ограничения вида (1)–(3) в пространстве параметра y формируют область работоспособности. Область работоспособности можно отобразить в пространство параметров X , чтобы сформировать область приемлемости. Фактические значения параметров элементов X распределяются случайным образом около их номинальных значений $X_0 = \{x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m}\}$ в пределах абсолютных производственных допусков $\Delta x_{\max i}$:

$$x_{0i} - \Delta x_{\max i} \leq x_i \leq x_{0i} + \Delta x_{\max i}. \quad (4)$$

Система неравенств вида (4) для всех элементов X определяет допусковую область. Необходимо определить относительные допуски $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, где $t_i = (\Delta x_{\max i} / x_{0i}) \cdot 100\%$, для которых допусковая область находится в пределах области приемлемости. Частичный выход допусковой области за границы области приемлемости приводит к снижению выхода годных изделий при серийном производстве. Чтобы снизить стоимость элементов, следует стремиться находить максимально возможные значения T при заданном выходе годных изделий. Решение задачи существует, если номинальные значения параметров X_0 не расположены на границах области приемлемости. Выполнение этого требования обеспечивает запас работоспособности:

$$a = \min(y(\mathbf{X}_0) - y_{\min}, y_{\max} - y(\mathbf{X}_0)), \quad (5)$$

$$a = y_{\max} - y(\mathbf{X}_0), \quad (6)$$

$$a = y(\mathbf{X}_0) - y_{\min} \quad (7)$$

для ограничений вида (1), (2), (3) соответственно. Для максимизации a в (5) выполняют центрирование $y(\mathbf{X}_0)$ между значениями $y_{\min}$ и $y_{\max}$. Значение запаса работоспособности определяет условия для решения задачи синтеза допусков.

Анализ чувствительности. При выборе методов синтеза допусков необходимо учитывать возможности инструментов EDA. Программа PSpice Advanced Analysis предоставляет пользователям инструмент Sensitivities для расчета полуотносительных чувствительностей выходных параметров, определяемых посредством инструментов измерения [17]. Реализован однокомпонентный метод анализа чувствительности. Выполняется анализ и измерение выходного параметра $y(\mathbf{X}_0)$ и серия m вариантов анализа и измерений $y(\mathbf{X}_i^*)$, где $\mathbf{X}_i^* = \{x_{01}, \dots, x_{0i} + \Delta x_i^*, \dots, x_{0m}\}$, $\Delta x_i^* = x_{0i} \cdot (S_v \cdot t_i^* / 100 \%)$, t_i^* - предварительно назначенное значение допуска, S_v - коэффициент вариации, $i = \overline{1, m}$. Полуотносительные чувствительности определяются при интерполяции для $t_i^* = 1 \%$:

$$S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0) \approx [y(\mathbf{X}_i^*) - y(\mathbf{X}_0)] / (S_v \cdot t_i^*). \quad (8)$$

Возможные причины недоверности результатов рассмотрены в [16].

Предположим, что во всех сечениях по координатам $\mathbf{X}$ функция $y(\mathbf{X})$ является монотонной, изменениями значений чувствительностей в пределах допусковой области можно пренебречь, использование их значений в опорной точке $\mathbf{X}_0$ дает приемлемую ошибку метода. Тогда отклонение $\Delta y = y(\mathbf{X}) - y(\mathbf{X}_0)$ при относительных отклонениях $\delta x_i = (x_i - x_{0i}) / x_{0i} \cdot 100 \%$ параметров m элементов:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^m S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0) \cdot \delta x_i. \quad (9)$$

Случайные значения δx_i ограничены производственными допусками $|\delta x_i| \leq t_i$.

Аналитические методы наихудшего случая. Допуски для наихудшего случая можно получить на основе (9). Полагая, что $\Delta y = a$, $|\delta x_i| = t_i$, знаки δx_i совпадают со знаками чувствительностей $S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)$:

$$a = \sum_{i=1}^m |S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_i. \quad (10)$$

При равных значениях допусков элементов:

$$t_i = a / \sum_{i=1}^m |S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)|. \quad (11)$$

Полагая, что все элементы вносят одинаковый вклад в отклонение a :

$$t_i = a / (m \cdot |S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)|). \quad (12)$$

В инженерной практике часто целесообразно для некоторых элементов допуски назначать, а для остальных элементов определять. Обозначим m_a количество элементов с назначенными допусками t_{A_j} и m_u количество элементов с определяемыми допусками t_{U_i} . Тогда на основе (10):

$$a = \sum_{j=1}^{m_a} |S_{x_{A_j}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{A_j} + \sum_{i=1}^{m_u} |S_{x_{U_i}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{U_i}, \quad (13)$$

$$t_{U_i} = (a - \sum_{j=1}^{m_a} |S_{x_{A_j}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{A_j}) / (m_u \cdot |S_{x_{U_i}}^y(\mathbf{X}_0)|), \quad (14)$$

где $S_{x_{A_j}}^y(\mathbf{X}_0)$ и $S_{x_{U_i}}^y(\mathbf{X}_0)$ – чувствительности к вариациям параметров элементов x_{A_j} и x_{U_i} с назначенными и определяемыми допусками соответственно. Если получены отрицательные или слишком низкие значения t_{U_i} , задача не имеет допустимого решения для назначенных значений t_{A_j} . Полученные допуски необходимо округлить до стандартных значений. В результате округления значения правых частей в (10) и (13) будут отличаться от a .

Численные методы наихудшего случая. Численные методы синтеза основаны на поиске экстремума целевой функции в пространстве допусков $\mathbf{T}$. Целевую функцию можно сформировать на основе (10):

$$F(\mathbf{T}) = (a - \sum_{i=1}^m |S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_i)^2 \rightarrow \min. \quad (15)$$

Если для части элементов допуски целесообразно назначить, то назначенные допуски $\mathbf{T}_A = \{t_{A1}, t_{A2}, \dots, t_{Ama}\}$ необходимо исключить из вектора варьируемых параметров, а для поиска определяемых допусков $\mathbf{T}_U = \{t_{U1}, t_{U2}, \dots, t_{Uma}\}$ целевую функцию можно сформировать на основе (13):

$$F(\mathbf{T}_U) = (a - \sum_{j=1}^{ma} |S_{x_{Aj}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{A_j} - \sum_{i=1}^{mu} |S_{x_{Ui}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{U_i})^2 \rightarrow \min. \quad (16)$$

Целевая функция может быть сформирована для максимизации допусков:

$$F(\mathbf{T}) = \sum_{i=1}^m t_i \rightarrow \max \quad (17)$$

или

$$F(\mathbf{T}) = \min(t_i) \rightarrow \max \quad (18)$$

при использовании (10) в качестве функциональных ограничений.

Задачи нелинейного математического программирования (15), (16) и (18) могут быть решены поисковыми методами параметрической оптимизации. Для решения задачи линейного математического программирования (17) может быть использован симплекс-метод. Аналогично (16) из вектора варьируемых параметров $\mathbf{T}$ в (17) и (18) можно исключить назначенные допуски $\mathbf{T}_A$ и выполнять поиск допусков $\mathbf{T}_U$ при функциональных ограничениях (13). Задачи оптимизации с функциями (15)–(18) следует решать при ограничениях $t_i \geq t_{\min i}$ для всех варьируемых параметров, где $t_{\min i}$ – граничное значение допуска.

Аналитические статистические методы. Если при изготовлении дискретных элементов не выполняют подгонку параметров и сортировку по допускам, распределение вероятностей для δx_i можно аппроксимировать нормальным законом с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{\delta x_i}^2 = t_i^2/9$. Если прецизионные элементы отбирают сортировкой по допускам, то распределение вероятностей δx_i можно аппроксимировать равномерным законом с дисперсией $\sigma_{\delta x_i}^2 = t_i^2/3$ [18]. Для этих и других случаев можно установить соотношение:

$$\sigma_{\delta x_i} = l_i \cdot t_i, \quad (19)$$

задавая соответствующие значения l_i .

Если количество дискретных элементов m велико, а значения отклонений δx_i статистически независимы, при выполнении условий, сформулированных для (9), распределение вероятностей для Δy хорошо аппроксимируется нормальным законом с нулевым средним и дисперсией [18]:

$$\sigma_{\Delta y}^2 = \sum_{i=1}^m (S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0))^2 \cdot \sigma_{\delta x_i}^2. \quad (20)$$

Оценку вероятности выхода годных изделий можно получить с помощью интегральной функции нормированного нормального распределения $F(z)$, где $z = \Delta y / \sigma_{\Delta y}$. Исходя из планируемого относительного выхода продукции Φ^* и свойств нормального распределения, можно задать соотношение:

$$\sigma_{\Delta y} = a / z^*, \quad (21)$$

где $z^* = F^{-1}((\Phi^* + 1)/2)$. В частности, для $\Phi^* = 0.6827$, $z^* = 1$, для $\Phi^* = 0.9545$, $z^* = 2$, для $\Phi^* = 0.9973$, $z^* = 3$.

Специфика определения выходного параметра y может быть причиной, по которой распределение вероятностей Δy будет далеким от нормального закона. В этих случаях можно задать $z^* = \Delta y_{\max}^* / \sigma_{\Delta y}$, где $\Delta y_{\max}^*$ – максимальное отклонение для Φ^* случаев по результатам статистического анализа при использовании прогнозируемых значений допусков.

Предполагая равенство слагаемых в правой части (20) и учитывая (19) и (21), в результате:

$$t_i = a/(z^* \cdot \sqrt{m} \cdot l_i \cdot |S_{xi}^y(\mathbf{X}_0)|). \quad (22)$$

Аналогично (13) баланс дисперсий по группам элементов:

$$\sigma_{\Delta y}^2 = \sum_{i=1}^{m_u} (S_{xU_i}^y(\mathbf{X}_0))^2 \cdot \sigma_{\delta x U_i}^2 + \sum_{j=1}^{m_a} (S_{xA_j}^y(\mathbf{X}_0))^2 \cdot \sigma_{\delta x A_j}^2. \quad (23)$$

Назначая допуски t_{A_j} и задавая коэффициенты $l_{A_j} = \sigma_{\delta x A_j} / t_{A_j}$, $l_{U_i} = \sigma_{\delta x U_i} / t_{U_i}$, можно найти допуски для остальных элементов:

$$t_{U_i} \approx \sqrt{(a/z^*)^2 - \sum_{j=1}^{m_a} (S_{xA_j}^y(\mathbf{X}_0) \cdot l_{A_j} \cdot t_{A_j})^2} / (\sqrt{m_u} \cdot l_{U_i} \cdot |S_{xU_i}^y(\mathbf{X}_0)|). \quad (24)$$

Если получено отрицательное значение в числителе под корнем, задача не имеет решения для заданных значений t_{A_j} .

Численные статистические методы. Используя (20) или (23), можно сформировать целевые функции для поисковой оптимизации допусков:

$$F(\mathbf{T}) = [(a/z^*)^2 - \sum_{i=1}^m (S_{xi}^y(\mathbf{X}_0) \cdot l_i \cdot t_i)^2]^2 \rightarrow \min, \quad (25)$$

или

$$F(\mathbf{T}_U) = [b - \sum_{i=1}^{m_u} (S_{xU_i}^y(\mathbf{X}_0) \cdot l_{U_i} \cdot t_{U_i})^2]^2 \rightarrow \min, \quad (26)$$

$$b = (a/z^*)^2 - \sum_{j=1}^{m_a} (S_{xA_j}^y(\mathbf{X}_0) \cdot l_{A_j} \cdot t_{A_j})^2.$$

Также могут быть применены целевые функции (17) или (18) и в качестве функциональных ограничений (20) или (23).

Реализация в Excel. Все рассмотренные методы могут быть реализованы в среде табличного процессора Excel. Excel предоставляет удобные средства для выполнения однотипных вычислений по формулам (11), (12), (14), (22), (24) при реализации рассмотренных аналитических методов. Инструменты линейной и нелинейной оптимизации надстройки "Поиск решения" позволяет реализовать численные методы оптимизации допусков, используя целевые функции (15)–(18), (25), (26) и задавая прямые и функциональные ограничения.

Импорт значений чувствительностей из базы данных инструмента Sensitivity программы PSpice Advanced Analysis и экспорт найденных значений допусков в базу данных схемы редактора Capture удобно выполнять, используя буфер обмена. Основную сложность для реализации импорта чувствительностей представляет возможное присутствие масштабирующих суффиксов ($m - 10^{-3}$, $u - 10^{-6}$, $n - 10^{-9}$ и т.д.). Поэтому содержимое ячейки Excel с принятым значением чувствительности обрабатывается как строка символов:

- ◆ правый символ строки проверяется на совпадение с масштабирующими суффиксами, используя вложенную функцию "ЕСЛИ";

- ◆ остальные символы преобразуются в число функцией "ЗНАЧЕН";

- ◆ полученное значение умножается на масштабирующий коэффициент.

Операция округления найденных значений допусков до стандартных значений реализована, используя вложенную функцию "ЕСЛИ".

Пример. Модемы в системах связи по линиям электропередачи (англ. power line communication (PLC)) реализуют на основе специализированных интегральных AFE. Между внешними элементами сопряжения с линией электропередачи и входом приемного тракта AFE изготовители рекомендуют устанавливать частотно-избирательные полосовые фильтры [19]. Требования к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) фильтра (рис. 1), зависят от используемого частотного диапазона, определяемого стандартами PLC. Для стандарта CENELEC B [20]:

- ♦ граничные частоты полосы пропускания $f_{pl} = 95$ кГц и $f_{ph} = 125$ кГц;
- ♦ граничные частоты полосы подавления $f_{sl} = 70$ кГц и $f_{sh} = 170$ кГц.

Для двусторонне нагруженного LC фильтра максимальное значение коэффициента передачи в полосе пропускания $H_{pmax} = -5.9$ дБ, на границах полосы подавления $H_{smax} = -36$ дБ. Допустимая неравномерность АЧХ в полосе пропускания - не более 2 дБ ($H_{pmin} = -7.9$ дБ).

Синтез фильтра 6-го порядка (рис. 2) выполнен при аппроксимации АЧХ по Чебышеву с неравномерностью в полосе пропускания 0.5 дБ. Тем самым, сформирован односторонний запас работоспособности $a = 1.5$ дБ. Положение максимумов АЧХ определяется только значениями R1 и R2. При номинальных значениях R1 и R2 максимумы расположены на уровне минус 6 дБ. При выборе резисторов с допуском 1 % предельное положение максимумов не превысит минус 5.93 дБ. В качестве контролируемого выходного параметра у выбрана неравномерность АЧХ в полосе пропускания. При анализе АЧХ в диапазоне частот полосы пропускания для измерения использована функция инструмента Evaluate Measurement PSpice: $\max(\text{db}(v(\text{out})/v(\text{in}))) - \min(\text{db}(v(\text{out})/v(\text{in})))$.

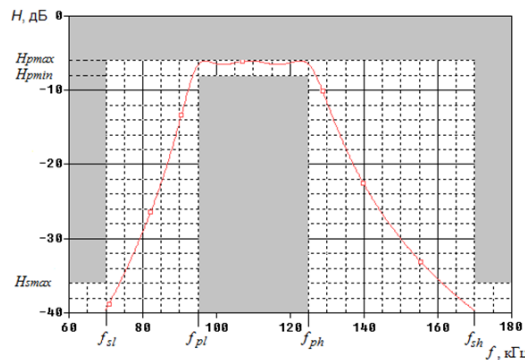


Рис. 1. Технические требования к АЧХ фильтра

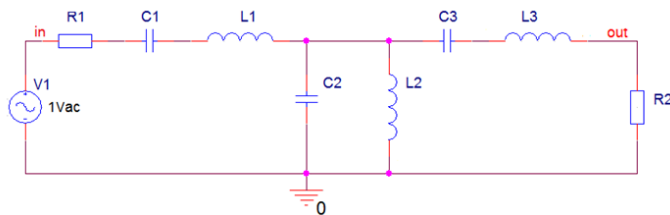


Рис. 2. Полосовой фильтр

Для всех конденсаторов и катушек индуктивности предварительно были заданы допуски 5 %, выполнен анализ чувствительности и статистический анализ методом Монте-Карло. По найденным значениям максимального для $\Phi^* = 1$ и среднеквадратического отклонений у определено значение $z^* = 5.88$. Были заданы допуски для элементов L2, R1, R2. В среде Excel по (24) определены допуски для остальных элементов схемы фильтра, а затем оптимизированы, используя (26). Определены стандартные допуски и стандартные номинальные значения параметров элементов из рядов E24 и E96 (табл. 1).

Таблица 1

Параметры элементов

Элемент	Чувствительность, дБ/%	Допуск по (25) / по (27) / стандартный, %	Номинальное значение	
			Рассчитанное	Стандартное
C1	0.04133	6.28 / 5.02 / 5	1.635 нФ	1.6 нФ + 33 пФ
C2	0.23623	0.63 / 1.03 / 1	37.78 нФ	37.4 нФ + 470 пФ
C3	0.04133	6.28 / 5.02 / 5	1.635 нФ	1.6 нФ + 33 пФ
L1	0.06415	4.05 / 3.02 / 5	1.304 мГн	1.3 мГн
L2	0.16599	3	56.43 мкГн	56 мкГн
L3	0.06415	4.05 / 3.02 / 5	1.304 мГн	1.3 мГн
R1	0.0102	1	154 Ом	154 Ом
R2	0.0102	1	154 Ом	154 Ом

Анализ допусков выполнялся методом Монте-Карло. Значения параметров элементов с допуском 1 % задавались по равномерному закону распределения, параметры остальных элементов по нормальному закону. По результатам 200 испытаний (рис. 3) выход годных изделий составил 68 %. Причиной этого стало искажение АЧХ при найденных стандартных значениях параметров элементов и снижение запаса работоспособности до 0.5 дБ. Попытки оптимизировать АЧХ при варьировании номинальных значений C2 из ряда E96 и остальных параметров из ряда E24, используя метод Discrete engine инструмента Optimizer в программе PSpice Advanced Analysis, не дали приемлемого результата. Для решения проблемы значения C1–C3 были скорректированы набором емкости двух конденсаторов. При повторном анализе Монте-Карло (рис. 4) выход годных изделий составил 98 %.

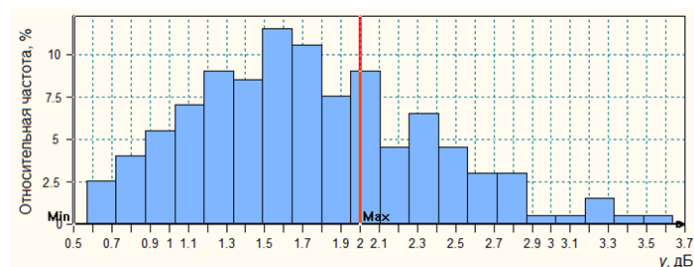


Рис. 3. Результаты допускового анализа

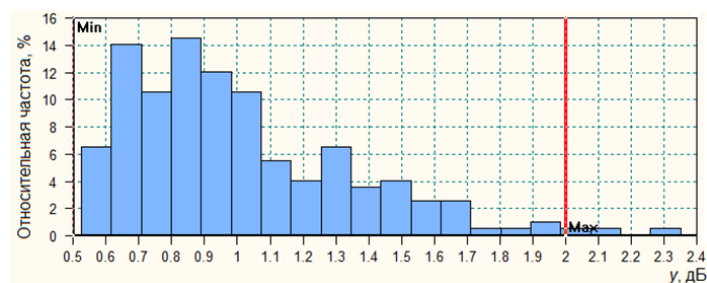


Рис. 4. Результаты повторного допускового анализа

Заключение. Рассмотрены методы синтеза допусков, использующие результаты анализа чувствительности выходного параметра устройства к вариациям параметров пассивных элементов. Предложены модификации аналитических и численных методов синтеза допусков, позволяющие назначать для определенной группы элементов предпочтительные значения допусков. Рассмотрена реализация аналитических и численных методов синтеза допусков на основе табличного процессора Excel.

Преимуществом поисковых методов перед аналитическими методами является возможность нахождения стандартных значений допусков, используя алгоритмы дискретной оптимизации. В надстройке Excel "Поиск решения" доступны только инструменты целочисленной оптимизации, поэтому это преимущество не удалось реализовать. При использовании целевых функций (17) и (18) появляется возможность оптимизации допусков в области работоспособности, сформированной требованиями для нескольких выходных параметров. Для каждого из них требования должны быть представлены в форме функциональных ограничений вида (10), (13), (20) или (23).

Библиотеки активных элементов и функциональных узлов для расширенного анализа PSpice содержат информацию о разбросе параметров их моделей. Инструмент Sensitivity программы PSpice Advanced Analysis предоставляет возможность находить чувствительности выходного параметра к вариациям этих параметров. Это позволяет учитывать в (13) и (23) разброс параметров активных элементов и функциональных узлов, включая их в группу элементов с назначенными допусками.

Предложен способ интеграции программных средств синтеза допусков с инструментами EDA путем импорта значений чувствительностей и экспорта полученных значений допусков через буфер обмена.

Приведен пример допускового проектирования полосового LC фильтра в среде OrCAD PSpice Designer при использовании электронной таблицы Excel. Полученные в результате допускового анализа оценки выхода годных изделий позволяют считать полученные результаты синтеза допусков приемлемыми.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 9664-74 (СТ СЭВ 1809-79) Резисторы. Допускаемые отклонения от номинального значения сопротивления. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 3 с.
2. ГОСТ 28884-90 Ряды предпочтительных значений для резисторов и конденсаторов. – М.: Стандартинформ, 2015. – 12 с.
3. ГОСТ IEC 60062-2014. Коды для маркировки резисторов и конденсаторов. – М.: Стандартинформ, 2006. – 12 с.
4. *Гехер К.* Теория чувствительности и допусков электронных цепей: пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1973. – 200 с.
5. *Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В.* Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Сов. радио, 1973. – 128 с.
6. *Geher K.* Design of electronic circuits for optimal production yield // Period. Polytech. Elec. Eng. – 1984. – Vol. 28, No. 1. – P. 67-82.
7. *Spence R., Soin R.S.* Tolerance design of electronic circuits. – 3rd ed. – New York: Addison-Wesley, 1988. – 215 p.
8. *Foo S. W., Lin Y.* Computer-aided design of a mass production circuit // 6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '99). – IEEE, 1999. – P. 1495-1498. – DOI:10.1109/ICECS.1999.814453.
9. *Foo S.W., Lin Y.* Hybrid method of tolerance design // 6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '99). – IEEE, 1999. – P. 557-560. – DOI: 10.1109/ICECS.1999.812346.

10. Al-Mohammed M., Esteve D., Boucher J. Tolerance allocation for an electronic system using neural network/Monte Carlo approach // *Proc. SPIE* 4540. – 2001. – P. 446-457. – DOI: 10.1117/12.450689.
11. Styblinski M.A. Statistical design optimization // *Computer aided design and design automation* / Wai Kai Chen Ed. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – P. 5-1-5-34.
12. Соколов Б.В., Шевицова Т.Г. Методы определения допусков электрических цепей и инварианты чувствительности // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2010. – № 3. – С. 65-69.
13. Gajda J., Sidor T. Using Monte Carlo analysis for practical investigation of sensitivity of electronic converters in respect to component tolerances // *Electrical and Electronic Engineering*. – 2012. – No. 2. – P. 297-302. – DOI: 10.5923/j.eee.20120205. 09. 2012.
14. Pehl M., Graeb H. Tolerance design of analog circuits using a branch-and-bound based approach // *Journal of Circuits, Systems and Computers*. – 2013. – Vol. 21, No. 8. – P. 1240022-1-1240022-17. – DOI: 10.1142/S0218126612400221.
15. Shilo G., Furmanova N., Kulyaba-Kharitonova T. Software for tolerance design of electronic devices // *International Conference Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2018)*. – 2018. – P. 14-17.
16. Khludenev A. Tolerance design of active RC filters // *2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2021)*. – IEEE, 2021. – 9444367. – DOI: 10.1109/SED51197.2021.9444367.
17. Fitzpatrick D. Analog design and simulation using OrCAD Capture and PSpice. – 2nd ed. – Newnes, 2018. – 438 p.
18. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
19. Mullins E., Mrabet A. Analog front-end design for a narrowband power-line communications modem using the AFE031: Application Report SBOA130A. – Texas Instruments, 2011. – 35 p. – URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sboa130>.
20. Wang B., Cao Z. Design of active power filter for narrow-band power line communications // *2018 2nd International Conference on Material Engineering and Advanced Manufacturing Technology (MEAMT 2018)*. – MATEC Web of Conferences, 2018. – Vol. 189. – 04012. – DOI: 10.1051/matecconf/201818904012.

REFERENCES

1. GOST 9664-74 (ST SEV 1809-79) Rezistory. Dopustimye otkloneniya ot nominal'nogo znacheniya soprotivleniya [Resistors. Tolerances on rated resistance]. Moscow: Izd-vo standartov, 1993, 3 p.
2. GOST 28884-90 Ryady predpochtitel'nykh znacheniy dlya rezistorov i kondensatorov [Preferred number series for resistors and capacitors]. Moscow: Standartinform, 2015, 12 p.
3. GOST IEC 60062-2014. Kody dlya markirovki rezistorov i kondensatorov [Marking codes for resistors and capacitors]. Moscow: Standartinform, 2006, 12 p.
4. Geher K. Teoriya chuvstvitel'nosti i dopuskov elektronnykh tsepey [Theory of sensitivity and electronic network tolerances]: transl. from engl. Moscow: Sov. radio, 1973, 200 p.
5. Fomin A.V., Borisov V.F., Chermoshenskiy V.V. Dopuski v radioelektronnoy apparature [Tolerances in radio-electronic equipment]. Moscow: Sov. radio, 1973, 128 p.
6. Geher K. Design of electronic circuits for optimal production yield, *Period. Polytech. Elec. Eng.*, 1984, Vol. 28, No. 1, pp. 67-82.
7. Spence R., Soin R.S. Tolerance design of electronic circuits, 3rd ed. New York: Addison-Wesley, 1988, 215 p.
8. Foo S. W., Lin Y. Computer-aided design of a mass production circuit, *6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '99)*. IEEE, 1999, pp. 1495-1498. DOI:10.1109/ICECS.1999.814453.
9. Foo S.W., Lin Y. Hybrid method of tolerance design, *6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '99)*. IEEE, 1999, pp. 557-560. DOI:10.1109/ICECS.1999.812346.
10. Al-Mohammed M., Esteve D., Boucher J. Tolerance allocation for an electronic system using neural network/Monte Carlo approach, *Proc. SPIE* 4540, 2001, pp. 446-457. DOI: 10.1117/12.450689.

11. Styblinski M. A. Statistical design optimization in *Computer aided design and design automation*, Wai Kai Chen Ed. Boca Raton: CRC Press, 2009, pp. 5-1-5-34.
12. Sokolov B.V., Shevtsova T.G. Metody opredeleniya dopuskov elektricheskikh tsepey i invariantov chuvstvitel'nosti [Methods for determining the tolerances of electrical circuits and sensitivity invariants], *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass state technical university], 2010, No. 3, pp. 65-69.
13. Gajda J., Sidor T. Using Monte Carlo analysis for practical investigation of sensitivity of electronic converters in respect to component tolerances, *Electrical and Electronic Engineering*, 2012, No. 2, pp. 297-302. DOI: 10.5923/j.eee. 20120205.09. 2012.
14. Pehl M., Graeb H. Tolerance design of analog circuits using a branch-and-bound based approach, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2013, Vol. 21, No. 8, pp. 1240022-1-1240022-17. DOI: 10.1142/S0218126612400221.
15. Shilo G., Furmanova N., Kulyaba-Kharitonova T. Software for tolerance design of electronic devices, *International Conference Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2018)*, 2018, pp. 14-17.
16. Khludenev A. Tolerance design of active RC filters, *2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2021)*. IEEE, 2021, 9444367. DOI:10.1109/SED51197.2021.9444367.
17. Fitzpatrick D. Analog design and simulation using OrCAD Capture and PSpice, 2nd ed. Newnes, 2018, 438 p.
18. Vlach J., Singhal K. Computer methods for circuit analysis and design. New York: Van Nostrand Reinhold, 1983, 594 p.
19. Mullins E., Mrabet A. Analog front-end design for a narrowband power-line communications modem using the AFE031: Application Report SBOA130A. Texas Instruments, 2011, 35 p. Available at: <https://www.ti.com/lit/pdf/sboa130>.
20. Wang B., Cao Z. Design of active power filter for narrow-band power line communications, *2018 2nd International Conference on Material Engineering and Advanced Manufacturing Technology (MEAMT 2018)*, MATEC Web of Conferences, 2018, Vol. 189, 04012. DOI: 10.1051/mateconf/201818904012.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Хлуденев Александр Владимирович – Оренбургский государственный университет; e-mail: avhludenev@yandex.ru; г. Оренбург, Россия, тел.: +73532372874; кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники; к.т.н.; доцент.

Khludenev Alexander Vladimirovich – Orenburg State University; e-mail: avhludenev@yandex.ru; Orenburg, Russia; phone: +73532372874; industrial electronics and information measuring engineering department; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-74-85

И.С. Берешполов, Ю.А. Кравченко, А.Г. Слепцов

АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ*

Статья посвящена решению научной задачи защиты конфиденциальной информации в сети Интернет на основе алгоритма кластеризации значительных объемов данных. Защита конфиденциальной информации компьютерной сети является актуальной темой для исследований, особенно в связи с растущим использованием информационных технологий и увеличением объема данных ценной информации, хранящейся в Интернете. С ростом информационной ответственности необходимость в эффективных методах информацион-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00316, <https://rscf.ru/project/22-21-00316/> в Южном федеральном университете.

ной безопасности компьютерных сетей стала критически важной. В данной научной статье авторы предлагают решение задачи защиты конфиденциальной информации компьютерных сетей на основе алгоритма кластеризации больших данных. Традиционные методы обнаружения вторжений имеют такие ограничения, как способность работать только с одно- или двумерными данными, а также имеют сильную зависимость от предварительных знаний. Авторы для устранения этих ограничений предлагают эвристический алгоритм обнаружения вторжений, который использует кластеризацию на основе облачной модели. Предлагаемый алгоритм использует преимущества как маркированных, так и немаркированных образцов для кластеризации данных, тем самым уменьшая зависимость от априорных знаний. Результаты вычислительного эксперимента, проведенного на предложенном алгоритме, сравнивались с несколькими каноническими алгоритмами обнаружения вторжений. Результаты показали, что предложенный алгоритм улучшил производительность системы обнаружения вторжений, повысил точность обнаружения, снизил частоту ложных тревог и усилил надежность системы. Метод динамического взвешивания, используемый в алгоритме, устранил сложность высокоуровневой обработки данных и позволил алгоритму самообучаться, что привело к формированию относительно стабильной облачной модели. Несмотря на значительное улучшение производительности предложенного алгоритма по сравнению с каноническими алгоритмами кластеризации, результаты исследования также показали, что у алгоритма есть некоторые ограничения, такие как высокий процент ложных срабатываний и чувствительность к данным с определенными видами распределения. Для устранения этих недостатков необходимо дальнейшее усовершенствование алгоритма. В целом, предложенный эвристический алгоритм обнаружения вторжений с кластеризацией на основе облачной модели представляет собой перспективное решение для защиты конфиденциальной информации компьютерных сетей.

Информационная безопасность; конфиденциальная информация; кластеризация; облачная модель; эвристический алгоритм.

I.S. Bereshpolov, Yu.A. Kravchenko, A.G. Sleptsov

DATA CLUSTERING ALGORITHM FOR PROTECTING CONFIDENTIAL INFORMATION ON THE INTERNET

The article is devoted to solving the scientific problem of protecting confidential information in the Internet based on the algorithm for clustering significant amounts of data. The protection of a computer network confidential information is a hot topic for research, especially in connection with the growing use of information technology and the increase in data of valuable information stored in the Internet. With the growth of information responsibility, the need for effective methods of computer networks information security has become critical. In this scientific article, the authors propose a solution to the problem of protecting computer networks confidential information based on the big data clustering algorithm. Traditional intrusion detection methods have limitations such as the ability to work only with one- or two-dimensional data, and also have a strong reliance on prior knowledge. To eliminate these limitations, the authors propose a heuristic intrusion detection algorithm that uses clustering based on a cloud model. The proposed algorithm takes advantage of both labeled and unlabeled samples for data clustering, thereby reducing reliance on a priori knowledge. The results of a computational experiment carried out on the proposed algorithm were compared with several canonical intrusion detection algorithms. The results showed that the proposed algorithm improved the performance of the intrusion detection system, increased the accuracy of detection, reduced the false alarm rate, and enhanced the reliability of the system. The dynamic weighting method used in the algorithm removed the complexity of high-level data processing and allowed the algorithm to learn itself, resulting in a relatively stable cloud model. Despite the significant improvement in the performance of the proposed algorithm compared to the canonical clustering algorithms, the results of the study also showed that the algorithm has some limitations, such as a high false positive rate and sensitivity to data with certain types of distribution. To eliminate these shortcomings, further improvement of the algorithm is required. In general, the proposed heuristic clustering intrusion detection algorithm based on the cloud model is a promising solution for protecting computer networks confidential information.

Information security; confidential information; clustering; cloud model; heuristic algorithm.

Введение. Благодаря своему постоянному развитию, интернет-технологии стали применяться в различных областях и оказали значительное влияние на жизнь людей, а также привели к глобальному росту объемов обрабатываемых и хранимых данных. Очевидно, что в подобных условиях выросла актуальность проблемы повышения эффективности средств обеспечения информационной безопасности [1–3]. Одними из основных задач, решаемых в сфере информационной безопасности, являются классификация и кластеризация данных. В настоящее время разработано множество различных методов и алгоритмов для решения данных задач.

Наиболее уязвимыми с точки зрения обеспечения информационной безопасности являются процессы передачи информации в компьютерной сети. При этом, основными проблемами сетевой информационной безопасности являются следующие:

- 1) уязвимость протоколов TCP/IP;
- 2) слабая защищенность сетевой структуры;
- 3) повышенный риск хищения информации;
- 4) слабая осведомленность о мерах защиты информации [2–7].

Компьютерная сетевая система имеет повышенные риски для информационной безопасности, в основном потому, что состоит из множества локальных сетей, это увеличивает размер такой сети и делает ее уязвимой для атак злоумышленника, которому достаточно только передать хост, после чего он может действовать, проводя атаку для хищения ценной информации. Часто используемое бесплатное программное обеспечение имеет сниженные возможности для шифрования ценной информации, что также делает систему более уязвимой с точки зрения достаточности информационной безопасности.

Помимо этого, некоторые пользователи считают, что брандмауэр доставляет много хлопот и влияет на использование ими некоторого программного обеспечения, поэтому они решают закрыть брандмауэр, в случае отсутствия аутентификации прокси-сервера брандмауэра и соединения через двухточечный протокол канального уровня PPP брандмауэр становится бесполезным, а потенциальные угрозы безопасности могут возникнуть в любой момент.

Есть много факторов, которые угрожают безопасности информации компьютерной сети, среди которых взлом является одним из наиболее распространенных, хакеры представляют большую угрозу для современных компьютерных сетевых систем [2–4, 7–9]. Если сеть атакована хакерами и сервер поврежден, он не может нормально обслуживать пользователей, в результате сеть парализована, что приводит к негативным последствиям.

Система предотвращения вторжений (Intrusion Prevention System, IPS) сочетает в себе функции обнаружения атак, она может контролировать сетевой трафик, своевременно прерывать, корректировать или изолировать источники потенциальной опасности, является активной и эффективной системой информационной защиты [8–10]. Система предотвращения вторжений различает злонамеренную активность и предполагаемые планы атак, постоянно анализируя оперативную сетевую информацию. Механизм IPS проверяет сетевой трафик и последовательно анализирует его с помощью набора входящих сигнатурных данных для выявления планов атак. IPS может удалить подобную вредоносную активность, а затем заблокировать весь будущий трафик с IP-адреса или порта злоумышленника. Реальный трафик может продолжать передаваться без каких-либо явных ограничений и помех. На рис. 1 показано развертывание приложения предотвращения вторжений.

Обычно IPS регистрирует данные об обнаруженных событиях, отправляет сообщение в службу безопасности и составляет необходимые отчеты [11, 12]. IPS может естественным образом получать обновления функций сдерживания вредоносных атак для обеспечения информационной безопасности, чтобы постоянно отслеживать и устранять угрозы, связанные с Интернетом, что может помочь защитить организацию.

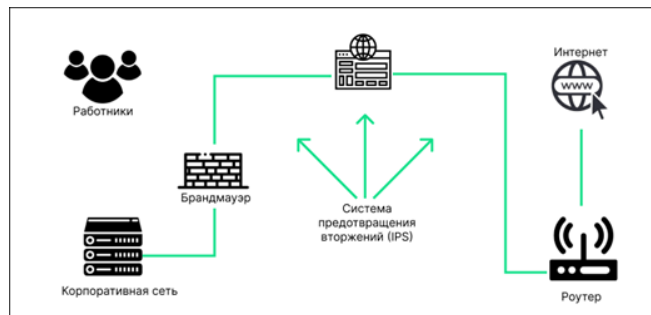


Рис. 1. Развертывание приложения предотвращения вторжений (IPS)

Эффективность систем обеспечения информационной безопасности может быть повышена на основе применения в логике их работы методов машинного обучения. Данные методы позволяют, в отличие от переборных подходов, находить наборы квазиоптимальных решений для обеспечения информационной безопасности на основе применения процедур диверсификации пространства поиска при попадании в «локальные ямы». Рассмотрим основные особенности и преимущества методов машинного обучения.

1. Методы машинного обучения в задачах обеспечения информационной безопасности. Машинное обучение (МО) определяется как дисциплина искусственного интеллекта (ИИ), которая предоставляет машинам возможность автоматически учиться на данных и прошлом опыте, чтобы выявлять закономерности и делать прогнозы с минимальным вмешательством человека. Методы машинного обучения позволяют компьютерам работать автономно без явного программирования. Приложения машинного обучения получают новые данные и могут самостоятельно учиться, эволюционировать и адаптироваться [12–15]. Машинное обучение извлекает полезную информацию из значительных объемов данных, используя алгоритмы для выявления скрытых зависимостей и закономерностей, а также обучения в итеративном режиме. Алгоритмы машинного обучения используют методы вычислений, чтобы учиться непосредственно на данных вместо того, чтобы применять аналитические выражения, которые могут служить математической моделью.

С развитием вычислительной мощности компьютеров машинное обучение проникло во многие области, такие как распознавание образов, интеллектуальный анализ данных и компьютерная графика. Методы машинного обучения имеют собственную классификацию. В зависимости от того, имеют ли данные обучающей выборки, используемые в процессе обучения, информацию о метках, машинное обучение можно разделить на неконтролируемое обучение (обучение без учителя), контролируемое обучение (обучение с учителем) и частично контролируемое обучение (обучение с частичным привлечением учителя) [8–10, 15, 16]. Приведем описание методов в соответствии с представленной классификацией.

Обучение без учителя – это своего рода информация о неклассифицированных данных для анализа и распознавания, в то же время знания, связанные с кластером, могут применяться к неконтролируемому обучению, чтобы анализировать данные выборки и прогнозировать информацию о категории выборки [16]. При неконтролируемом обучении набор известных образцов $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Выборка независима и одинаково распределена, поэтому метод исследования неконтролируемого обучения заключается в определении $(n \times d)$ матрицы, строки которой представляют выборки:

$$X = (x_i^T)_{i \in [n]}.$$

Цель неконтролируемого обучения состоит в том, чтобы обнаружить различную структурную информацию и законы, содержащиеся в матрице. Неконтролируемое обучение не выполняет предварительную подготовку на обучающих выборках, также отсутствует доступная информация о контроле, и невозможно установить библиотеку функций выборок [16–18]. Если классификатор продолжает принимать большое количество краевых тестовых выборок, это может повлиять на точность классификации, что приведет к неправильной классификации.

Обучение с учителем – это традиционный метод машинного обучения, в котором используются предварительные знания, предоставляемые системой (такие как информация об отмеченном классе выборки, информация о парных ограничениях и априорная вероятность) [16–18]. Изучается известный набор обучающих выборок, настраиваются параметры классификатора и устанавливается модель обучения выборки, затем классификация неизвестных выборок осуществляется в соответствии с моделью выборки. В обучении с учителем набор образцов X связан метками с классом образца:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n).$$

Как известно, y_i – метка класса, соответствующая образцу x_i , а пара данных (x_i, y_i) представляет собой обучающий набор образцов, необходимых для построения обучаемого [19]. Обучение под наблюдением с поиском отображения между известным обучающим набором x и меткой y , соответствующим образом строит требуемого обучаемого.

Размеченные данные часто трудно получить при обучении с учителем, а также необходимо создать библиотеку функций. Это ведет к тому, что функции новых данных могут не соответствовать функциям в библиотеке, в результате это может привести к неправильной классификации.

Обучение с частичным привлечением учителя – это метод является средним приближением между обучением без учителя и обучением с учителем, набор данных, используемый в процессе обучения, обычно содержит небольшое количество отмеченной информации [19], через эти образцы идентификационной информации метод реализует изучение неизвестных образцов.

При обучении с частичным привлечением учителя весь набор данных $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ делится на две части: набор известных размеченных данных $X = (x_1, x_2, \dots, x_l)$, соответствующая маркировка $Y = (y_1, y_2, \dots, y_l)$ и наборы данных с неизвестными метками:

$$X_u = (x_{l+1}, x_{l+2}, \dots, x_{l+u}).$$

Основное содержание, которое необходимо изучить при обучении с частичным привлечением учителя, заключается в том, как всесторонне использовать отмеченные образцы и образцы без маркировки.

2. Постановка задачи кластеризации для систем обеспечения информационной безопасности. Класс или кластер – это набор объектов данных, объекты данных в одном кластере похожи друг на друга, в отличие от объектов в других кластерах. С точки зрения машинного обучения кластерный анализ – это тип обучения без учителя [20]. Перед выполнением кластерного анализа неизвестно, на сколько категорий разделятся входные данные. Группировка в кластерах производится с учетом сходства оцениваемых признаков между данными. Выполняется правило максимизации сходства между данными одного кластера, и минимизации сходства между данными разных кластеров.

Методы кластеризации для решения разных задач, также различны, но все они основаны на определенной последовательности этапов. Большинство методов кластеризации состоят из четырех этапов: выбор или извлечение признаков, разра-

ботка или выбор алгоритма кластеризации, подтверждение кластера и интерпретация результатов. Это является процессом преобразования данных в ценные знания. В узком смысле кластеризация включает разработку и выбор алгоритмов решения задачи, процесс подтверждения кластеризации и интерпретацию результатов.

Алгоритм k-средних является одним из классических алгоритмов, работающих на основе определения центроида. Его первым шагом является определение количества кластеров (K). Второй шаг – случайным образом сгенерировать K начальных центров кластеров, т. е. $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$. Третий шаг – присвоить каждый объект данных кластеру с наибольшим сходством. Четвертый шаг – оценка соответствия центров кластеров и их перемещение в случае необходимости [20]. Алгоритм k-средних имеет преимущества легкого понимания, простой реализации и высокой скорости сходимости.

Случайный выбор начальных центров кластеров приводит к множеству начальных центров кластеров в одной группе, особенно когда данные сложные. Более того, сложно найти оптимальный центр кластера за ограниченное количество итераций. Следовательно, алгоритм k-средних легко сходится к локальному оптимуму, что приводит к неудовлетворительным результатам кластеризации.

Таким образом, алгоритм k-средних имеет преимущества простого использования, быстрой сходимости и низких затрат памяти, в то же время, есть весомые недостатки, такие как зависимость производительности алгоритма от инициализированных прототипов кластера, что приводит к нестабильности работы и чувствительности к шумовым выбросам. Рассмотрим разработку полууправляемого алгоритма кластеризации данных для защиты конфиденциальной информации в сети Интернет, который позволяет улучшить показатели кластеризации по сравнению с каноническими алгоритмами.

3. Разработка алгоритма кластеризации данных для защиты конфиденциальной информации в сети Интернет. В алгоритме обнаружения вторжений существует проблема деления порога, значение порога напрямую влияет на результат обнаружения, и на практике он не может гибко реагировать на ситуации вторжения. Кроме того, применение классификаторов общей облачной модели для обнаружения вторжений часто реализуется с помощью генератора правил ассоциации, который работает медленно, учитывая, что свойства сетевых данных не являются исчерпывающими. В практических приложениях подобный генератор правил не может справиться со сложными изменениями сетевой среды. Для повышения качества работы алгоритмов кластеризации, авторы используют комбинированный вариант алгоритма обучения с частичным привлечением учителя с облачной моделью. Такой подход не требует пороговой обработки значений после первоначальной кластеризации, что позволяет извлекать соответствующие данные непосредственно из небольшого количества идентификационной информации и создавать классификатор облачной модели, используя метод динамического взвешивания. При этом, использование гибкого обнаружения данных в реальном масштабе времени делает метод взвешивания более точным. Происходящий в дальнейшем процесс обучения корректирует настройки облачной модели, повышая ее способность адаптироваться к изменяющейся сетевой среде.

Относительная близость облаков отражает степень сходства между облаками и полностью выражает случайность и неоднозначность оценки языковых понятий. Предположим, есть два облака $A1(Ex1, En1, He1)$ и $A2(Ex2, En2, He2)$ в дискурсивном пространстве U , при этом определено, что $D_{1,2} = |Ex1 - Ex2|$, тогда $D_{1,2}$ отражает относительную близость двух облаков.

В рамках разработки полууправляемого алгоритма кластеризации данных для защиты конфиденциальной информации опишем процедуру *взвешенного обнаружения вторжений*. Генератор обратного облака получает цифровые характери-

стики облака из реального обучающего набора, формирует правила суждения, реализует нормальное распределение. На практике этот алгоритм требует большого количества обучающих данных и времени обучения [21–22]. Цифровые собственные значения облака, полученные из обучающих данных, не отражают реальной ситуации на момент вторжения, а расчет весов атрибутов слишком субъективен, так же сложно определить пороговое значение при обнаружении вторжений.

Сначала используем для кластеризации набора данных алгоритм обучения с частичным привлечением учителя, затем результаты кластеризации располагаются в порядке возрастания размера кластеров, при этом кластеры предварительно отсеиваются в соответствии с информацией тега.

Поскольку относительная близость облака обладает большей объективностью, авторы ссылаются на эту характеристику для настройки весов атрибутов, предполагая, что «нормальное» облако имеет значение A_1 при обнаружении вторжений, «аномальное» облако имеет значение A_2 , тогда при построении модели облака для каждого атрибута измерения размер $D_{1,2}$ отражает степень различия между «нормальными» облаками и «аномальными» облаками. Динамическое взвешивание может в полной мере использовать неявную информацию самих данных, а метод взвешивания является более научным.

Шаги процедуры обнаружения вторжений, основанной на алгоритме обучения с частичным привлечением учителя при кластеризации данных, следующие:

- 1) используйте алгоритм обучения с частичным привлечением учителя для кластеризации набора данных S ;
- 2) расположите результаты кластеризации в порядке возрастания размеров кластеров;
- 3) в сочетании с информацией о метках данных, начальные «нормальные» кластеры и «аномальные» кластеры отсеиваются как C_n и C_a соответственно, остальные данные размещаются в C_r ;
- 4) для каждого измерения данных в C_n соответствующее цифровое собственное значение облака $(Exl_i, Enl_i, Hel_i), i = 1, \dots, d$ получается с использованием обратного генератора облаков;
- 5) для каждого измерения данных в C_a , используйте генератор обратного облака, чтобы получить соответствующее цифровое собственное значение облака $(Ex2_i, En2_i, He2_i), i = 1, \dots, d$;
- 6) используйте следующую формулу для расчета веса каждого атрибута:

$$w_i = \frac{|Exl_i - Ex2_i|}{\sum_{j=1}^d |Exl_i - Ex2_i|};$$

- 7) возьмите объект данных x из C_r в соответствии с -условием прямого генератора облаков с использованием формулы, рассчитываются модели распределения «аномальных» и «нормальных» облаков:

$$\mu_j = \sum_{i=1}^d w_i \cdot \left[\frac{-(x - Exj_i)}{2 \cdot Enj_i} \right], j = 1, 2;$$

если $\mu_1 > \mu_2$, то x принадлежит к «нормальному» кластеру, обозначим его C_n , после возврата к шагу (4) для обновления «нормальной» облачной модели перейдите к шагу (6) для пересчета веса каждого атрибута, в противном случае, назначьте x из C_a и вернитесь к шагу (5). После обновления «аномальной» облачной модели перейдите к шагу (6), чтобы пересчитать вес каждого атрибута, пока не закончится классификация всех данных.

Опишем результаты вычислительного эксперимента, подтверждающего эффективность предложенного полууправляемого алгоритма кластеризации данных для защиты конфиденциальной информации в сети Интернет.

4. Результаты вычислительного эксперимента. Для проведения вычислительного эксперимента было выбрано 500 записей идентификационных данных, 10000 записей в качестве тестовых данных, среди них 758 DoS атак, 15 атак R2L, 42 атаки U2R и 92 атаки зондирования.

В вычислительном эксперименте использовалась экспериментальная модель на базе MATLAB и набор данных KDDCUP99 (набор данных для 3-го международного конкурса средств обнаружения знаний и интеллектуального анализа данных, который проводился совместно с KDD-99 5-ой международной конференцией по обнаружению знаний и интеллектуальному анализу данных). Эта база содержит стандартный набор данных для аудита, который включает широкий спектр вторжений, смоделированных в сетевой среде, и содержит атрибуты символьных данных, которые не могут быть распознаны MATLAB. Поэтому необходимо перенумеровать значения атрибутов символьного типа и использовать набор натуральных чисел для перенумерации значений, взяв в качестве примера `protocol_type` – `tcp`, `udp` и `icmp` замены на натуральные числа 1, 2 и 3, соответственно. Таким образом, исходные данные станут числовым типом.

Существует два типа числовых переменных: один представляет собой непрерывную переменную характеристики атрибута, а другой – переменную дискретной характеристики атрибута. Для непрерывных признаков переменных атрибутов атрибутивные характеристики могут иметь разные метрики, если перед экспериментом данные не были предварительно обработаны.

Для вышеуказанных 10000 записей были использованы алгоритм кластеризации k -средних и предложенный полууправляемый алгоритм. Были выполнены тесты данных обнаружения вторжений. Рис. 2 и 3 показывают среднюю частоту обнаружения и частоту ложных срабатываний для алгоритма кластеризации k -средних и предложенного полууправляемого алгоритма.

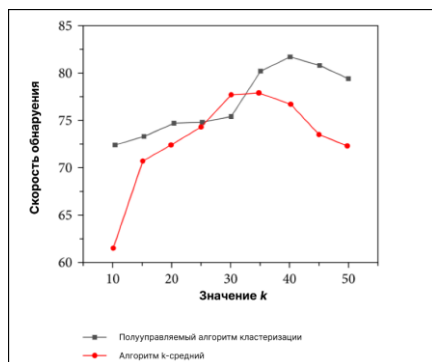


Рис. 2. Сравнение результатов скорости обнаружения

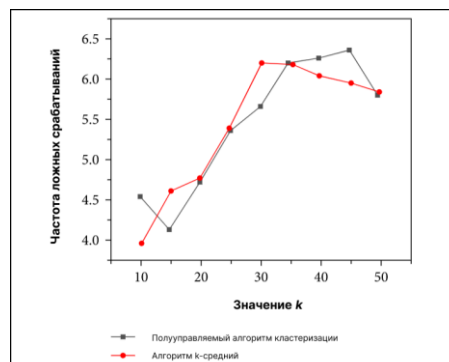
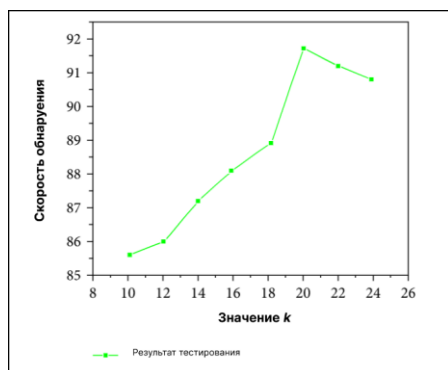
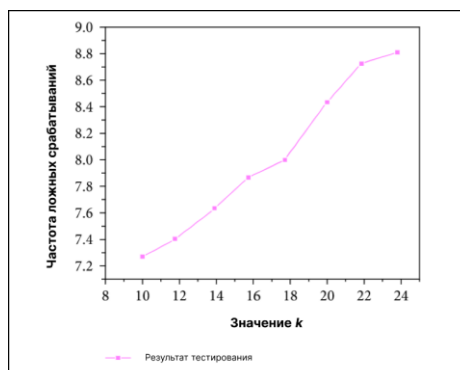


Рис. 3. Сравнение частоты ложных срабатываний

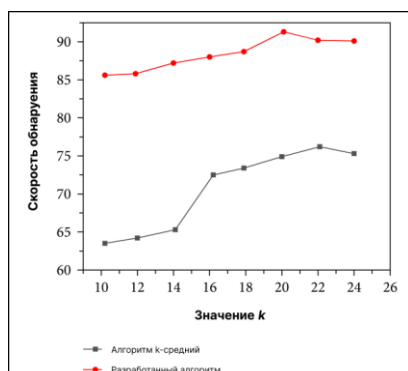
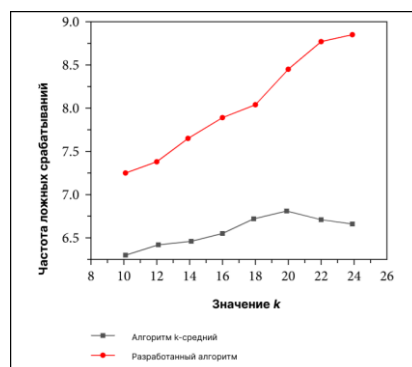
Из рис. 2 и 3 видно, что скорость предложенного алгоритма кластеризации выше, чем у алгоритма k -средних, а также улучшены характеристики по частоте ложных срабатываний алгоритма. Таким образом, предложенный алгоритм кластеризации данных для защиты конфиденциальной информации в сети Интернет повышает устойчивость системы и эффективность решения задачи кластеризации.

Рис. 4 и 5 показывают среднюю частоту обнаружения и частоту ложных срабатываний при различных k -значениях.

Рис. 4. Скорость обнаружения при разных k -значенияхРис. 5. Частота ложных срабатываний при разных k -значениях

Из экспериментальных результатов, представленных на рис. 4 и 5, видно, что при k постепенном увеличении значения ложная тревога также увеличивается. Однако, когда $k=20$, скорость обнаружения максимальна. Из этого можно сделать вывод, что при значении $k=20$ предложенный алгоритм кластеризации, основанный на облачной модели, может обеспечить лучший результат обнаружения вторжений, его уровень обнаружения достигает 91,76%, а уровень ложных тревог составляет 8,54%.

В предложенном авторами алгоритме кластеризации на основе облачной модели частота обнаружения и частота ложных срабатываний при различных значениях k сравниваются с алгоритмом k -средних, как показано на рис. 6 и 7.

Рис. 6. Сравнение результатов скорости обнаружения при разных значениях k Рис. 7. Сравнение результатов частоты ложных срабатываний при разных значениях k

Как видно из приведенных рисунков, в случае разных значений k предложенный алгоритм значительно эффективней алгоритма k -средних по частоте обнаружения. Частота ложных срабатываний несколько выше, чем у k -средних.

В целом, скорость обнаружения атак у предложенного алгоритма значительно выше, чем у канонических методов, а частота ложных срабатываний незначительно выше, чем у k -средних, это подтверждает повышение эффективности решения поставленной задачи для предложенного алгоритма кластеризации данных для защиты конфиденциальной информации в сети Интернет.

Заключение. В данной статье представлена разработка алгоритма обнаружения вторжений, который использует кластеризацию на основе облачной модели. Предлагаемый алгоритм использует преимущества как маркированных, так и немаркированных образцов для кластеризации данных, тем самым уменьшая зависимость от априорных знаний.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент. Результаты вычислительного эксперимента, проведенного на предложенном алгоритме, сравнивались с несколькими каноническими алгоритмами обнаружения вторжений. Результаты показали, что предложенный алгоритм улучшил производительность системы обнаружения вторжений, повысил точность обнаружения, снизил частоту ложных тревог и усилил надежность системы. Метод динамического взвешивания, используемый в алгоритме, устранил сложность высокоуровневой обработки данных и позволил алгоритму самообучаться, что привело к формированию относительно стабильной облачной модели.

Несмотря на значительное улучшение производительности предложенного алгоритма по сравнению с каноническими алгоритмами кластеризации, результаты исследования также показали, что у алгоритма есть некоторые ограничения, такие как высокий процент ложных срабатываний и чувствительность к данным с определенными видами распределения. Для устранения этих недостатков необходимо дальнейшее усовершенствование алгоритма. В целом, предложенный эвристический алгоритм обнаружения вторжений с кластеризацией на основе облачной модели представляет собой перспективное решение для защиты конфиденциальной информации компьютерных сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kravchenko Y.A., Bova V.V., Kursitys I.O. Models for Supporting of Problem-Oriented Knowledge Search and Processing // *Intelligent Information Technologies for Industry*. – 2016. – Vol. 1. – P. 287-295.
2. Липинский А.П. Обеспечение конфиденциальности информации, получаемой при производстве следственных действий // *Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право*. – 2021. – Т. 31, № 5. – С. 856-860.
3. Бабиева Н.А. Информационная безопасность личности и вопросы защиты конфиденциальной информации // *Сборники конференций НИЦ Социосфера*. – 2016. – № 31. – С. 66-68.
4. Кравченко Ю.А., Нацкевич А.Н., Курситис И.О. Бустинг биоинспирированных алгоритмов для решения задачи кластеризации // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. – 2018. – Т. 1. – С. 777-780.
5. Лобчикова А.С. Защита конфиденциальной информации при ее передаче по открытым каналам связи // *Новая наука: Проблемы и перспективы*. – 2017. – Т. 2, № 3. – С. 147-149.
6. Садуллаев У.Б. Проблемы защиты конфиденциальной информации // *Ростовский научный журнал*. – 2019. – № 1. – С. 196-203.
7. Дуля И.С. Применение методов глубокого обучения к задаче кластеризации временных рядов // *Аллея науки*. – 2021. – Т. 1, № 5 (56). – С. 974-978.
8. Бова В.В., Кулиев Э.В., Щеглов С.Н. Метод семантической кластеризации распределенных ресурсов знаний с динамическими компонентами на основе контентной фильтрации // *Информатика, вычислительная техника и инженерное образование*. – 2019. – № 1 (34). – С. 30-42.
9. Козлова О.А. Методы кластеризации в задачах оценки технического состояния телекоммуникационного оборудования // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. – 2014. – Т. 1. – С. 95-96.
10. Соловьев А.С. Оценки, анализ, кластеризация и управление в иерархических структурах // *Экономика и социум*. – 2021. – № 4-2 (83). – С. 404-419.
11. Бойко Е.А. Кластеризация социальных сетей с помощью алгоритма кластеризации BSP // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – Т. 3, № 11 (57). – С. 34-36.

12. Giordano J., O'Reilly M., Taylor H., Dogra N. Confidentiality and autonomy: The challenge(s) of offering research participants a choice of disclosing their identity // *Qualitative Health Research*. – 2007. – 17. – P. 264-275.
13. He Z., Cai Z., and Yu J. Latent-data privacy preserving with customized data utility for social network data // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2017. – Vol. PP, No. 99. – P. 1-10.
14. Omran M.G.H., Engelbrecht A.P., Salman A. An overview of clustering methods // *Intelligent Data Analysis*. – 2007. – Vol. 11, No. 6. – P. 583-605.
15. Crotty B.H., Mostaghimi A. Confidentiality in the digital age // *BMJ*. – 2014. – Vol. 348.
16. Алексеев Д.М., Минюк А.Н., Шумилин А.С. Защита конфиденциальной информации в облачной медицинской информационной системе // *Инновационная наука*. – 2020. – № 6.
17. Egoshin N.S. et al. A Model of Threats to the Confidentiality of Information Processed in Cyber-space Based on the Information Flows Model // *Symmetry*. – 2020. – Vol. 12, No. 11. – P. 1840.
18. Livraga G., Viviani M. Data confidentiality and information credibility in on-line ecosystems // *Proceedings of the 11th International Conference on Management of Digital EcoSystems*. – 2019. – P. 191-198.
19. Ge J., Liu J. Security assessment algorithm of navigation control system based on big data // *Journal of coastal research*. – 2019. – Vol. 93. – P. 1026-1033.
20. Deng H. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison // *International Journal of Approximate Reasoning*. – 1999. – 21 (3). – P. 215-231
21. Danilowicz C., Nguyen N. Consensus Methods for Solving Inconsistency of Replicated Data in Distributed Systems // *Distributed and Parallel Databases*. – 2003. – Vol. 14. – P. 53-69.
22. Paixao M.P., Silva L. Elias G. Clustering Large-Scale Distributed Software Component Repositories // *Proc. the Fourth Int'l Conf. Advances in Databases Knowledge and Data Applications*. – 2012. – P. 124-129.

REFERENCES

1. Kravchenko Y.A., Bova V.V., Kursitys I.O. Models for Supporting of Problem-Oriented Knowledge Search and Processing, *Intelligent Information Technologies for Industry*, 2016, Vol. 1, pp. 287-295.
2. Lipinskiy A.P. Obespechenie konfidentsial'nosti informatsii, poluchaemoy pri proizvodstve sledstvennykh deystviy [Ensuring the confidentiality of information obtained in the course of investigative actions], *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Ekonomika i pravo* [Bulletin of the Udmurt University. Series Economics and Law], 2021, Vol. 31, No. 5, pp. 856-860.
3. Babieva N.A. Informatsionnaya bezopasnost' lichnosti i voprosy zashchity konfidentsial'noy informatsii [Information security of the individual and issues of confidential information protection], *Sborniki konferentsiy NITS Sotsiosfera* [Collections of conferences of the Research Center Sociosphere], 2016, No. 31, pp. 66-68.
4. Kravchenko Yu.A., Natskevich A.N., Kursitys I.O. Busting bioinspirirovannykh algoritmov dlya resheniya zadachi klasterizatsii [Boosting bioinspired algorithms for solving the clustering problem], *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International Conference on Soft Computing and Measurements], 2018, Vol. 1, pp. 777-780.
5. Lobchikova A.S. Zashchita konfidentsial'noy informatsii pri ee peredache po otkrytym kanalamsvyazi [Protecting confidential information during its transmission over open communication channels], *Novaya nauka: Problemy i perspektivy* [New Science: Problems and Perspectives], 2017, Vol. 2, No. 3, pp. 147-149.
6. Sadullaev U.B. Problemy zashchity konfidentsial'noy informatsii [Problems of protection of confidential information], *Rostovskiy nauchnyy zhurnal* [Rostov scientific journal], 2019, No. 1, pp. 196-203.
7. Dulya I.S. Primenenie metodov glubokogo obucheniya k zadache klasterizatsii vremennykh ryadov [Application of deep learning methods to the problem of time series clustering], *Alleya nauki* [Alley of Science], 2021, Vol. 1, No. 5 (56), pp. 974-978.
8. Bova V.V., Kuliev E.V., Shcheglov S.N. Metod semanticheskoy klasterizatsii raspredelennykh resursov znaniy s dinamicheskimi komponentami na osnove kontentnoy fil'tratsii [The method of semantic clustering of distributed knowledge resources with dynamic components based on content filtering], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, Computer Science and Engineering Education], 2019, No. 1 (34), pp. 30-42.

9. Kozlova O.A. Metody klasterizatsii v zadachakh otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya telekommunikatsionnogo oborudovaniya [Clustering methods in the problems of assessing the technical condition of telecommunication equipment], *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International Conference on Soft Computing and Measurements], 2014, Vol. 1, pp. 95-96.
10. Solov'ev A.S. Otsenki, analiz, klasterizatsiya i upravlenie v ierarkhicheskikh strukturakh [Evaluation, analysis, clustering and management in hierarchical structures], *Ekonomika i sotsium* [Economy and Society], 2021, No. 4-2 (83), pp. 404-419.
11. Boyko E.A. Klasterizatsiya sotsial'nykh setey s pomoshch'yu algoritma klasterizatsii BSP [Clustering of social networks using the BSP clustering algorithm], *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies], 2012, Vol. 3, No. 11 (57), pp. 34-36.
12. Giordano J., O'Reilly M., Taylor H., Dogra N. Confidentiality and autonomy: The challenge(s) of offering research participants a choice of disclosing their identity, *Qualitative Health Research*, 2007, 17, pp. 264-275.
13. He Z., Cai Z., and Yu J. Latent-data privacy preserving with customized data utility for social network data, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, Vol. PP, No. 99, pp. 1-10.
14. Omran M.G.H., Engelbrecht A.P., Salman A. An overview of clustering methods, *Intelligent Data Analysis*, 2007, Vol. 11, No. 6, pp. 583-605.
15. Crotty B.H., Mostaghimi A. Confidentiality in the digital age, *BMJ*, 2014, Vol. 348.
16. Alekseev D.M., Minyuk A.N., Shumilin A.S. Zashchita konfidentsial'noy informatsii v oblachnoy meditsinskoy informatsionnoy sisteme [Protection of confidential information in a cloud-based medical information system], *Innovatsionnaya nauka* [Innovative Science], 2020, No. 6.
17. Egoshin N.S. et al. A Model of Threats to the Confidentiality of Information Processed in Cyberspace Based on the Information Flows Model, *Symmetry*, 2020, Vol. 12, No. 11, pp. 1840.
18. Livraga G., Viviani M. Data confidentiality and information credibility in on-line ecosystems, *Proceedings of the 11th International Conference on Management of Digital EcoSystems*, 2019, pp. 191-198.
19. Ge J., Liu J. Security assessment algorithm of navigation control system based on big data, *Journal of coastal research*, 2019, Vol. 93, pp. 1026-1033.
20. Deng H. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison, *International Journal of Approximate Reasoning*, 1999, 21 (3), pp. 215-231.
21. Danilowicz C., Nguyen N. Consensus Methods for Solving Inconsistency of Replicated Data in Distributed Systems, *Distributed and Parallel Databases*, 2003, Vol. 14, pp. 53-69.
22. Paixao M.P., Silva L., Elias G. Clustering Large-Scale Distributed Software Component Repositories, *Proc. the Fourth Int'l Conf. Advances in Databases Knowledge and Data Applications*, 2012, pp. 124-129.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент С.Г. Буланов.

Берешполов Игорь Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: bereshpolov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования, аспирант.

Кравченко Юрий Алексеевич – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; доцент.

Слепцов Алексей Геннадьевич – e-mail: alslepcov@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Bereshpolov Igor Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: bereshpolov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design, postgraduate.

Kravchenko Yuriy Alekseevich – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; the department of computer aided design; dr. of eng. sc.; associate professor.

Sleptsov Aleksey Gennadievich – e-mail: alslepcov@sfedu.ru; the department of computer aided design; postgraduate.

Е.Е. Полупанова, А.С. Олейник**СОСТАВЛЕНИЕ РАЦИОНА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

Данная работа посвящена решению задачи составления рациона питания с помощью генетического алгоритма. Задача составления рациона питания является задачей комбинаторной оптимизации. Основная цель решения задачи составления рациона питания заключается в нахождении оптимального плана питания в соответствии с особыми потребностями человека. В статье приводится постановка задачи составления рациона питания и её математическая модель. Так как задача составления рациона питания является NP-трудной и входные данные могут потребовать больших вычислительных затрат для точного алгоритма, разумно применить эвристический подход в решении данной проблемы. В статье подробно освещены основные используемые понятия теории генетических алгоритмов, последовательность шагов разработанного генетического алгоритма составления рациона питания, блок-схема генетического алгоритма. Для исследования генетического алгоритма составления рациона питания, было разработано клиент-серверное приложение под управлением операционной системы Android. Результатом работы генетического алгоритма составления рациона питания является найденное меню на семь дней, которое выводится и хранится в приложении. Клиент-серверная архитектура приложения была выбрана с целью экономии ресурсов телефона пользователя. В статье приводятся описание пользовательского интерфейса приложения на платформе Android с возможностью регулировки различных параметров алгоритма. Также в статье проведен анализ эффективности работы полученного алгоритма: оценка точности и времени работы разработанного генетического алгоритма при различных конфигурациях. По результатам экспериментов удалось определить оптимальные значения настраиваемых параметров генетического алгоритма (число хромосом, количество итераций, вероятность мутации), позволяющих получать достаточно хорошие результаты за приемлемое время. Характерными чертами реализованного генетического алгоритма составления рациона питания является относительно небольшое время работы, даже при больших входных данных. Кроме того, разработанное решение имеет высокую экономическую ценность ввиду применения алгоритма на практике, например, в работе врачей-диетологов, фитнес-тренеров, а также для простых пользователей с избыточным весом.

Задача о составлении рациона питания; генетический алгоритм; метод генетического поиска; эвристический подход; эволюционный алгоритм; клиент-серверное приложение; Android-приложение.

E.E. Polupanova, A.S. Oleinik**COMPILING A DIET BASED ON A GENETIC ALGORITHM**

This work is devoted to solving the problem of compiling a diet using a genetic algorithm. The task of compiling a diet is a combinatorial optimization problem. The main purpose of solving the problem of compiling a diet is to find a suitable combination of dishes to perform the distribution in accordance with the special needs of a person. The article provides a statement of compiling a diet problem and its mathematical model. Since the task of compiling a diet is NP-hard and the input data may require large computational costs for an accurate algorithm, it is reasonable to apply a heuristic approach to solving this problem. The article highlights in detail the main concepts of the theory of genetic algorithms, the sequence of steps of the developed genetic algorithm for compiling the diet, the flowchart of the genetic algorithm. To research the genetic algorithm of compiling a diet there was developed a client-server application running the Android operating system. The result of the genetic algorithm for compiling a diet is the seven days menu, which is displayed and stored in the application. The client-server architecture of the application was chosen in order to save the user's phone resources. The description of the Android-application

user interface with the ability to adjust various parameters of the algorithm is given in the article. Also the analysis of the obtained algorithm efficiency is highlighted: an estimation of the accuracy and operating time of the developed genetic algorithm with different configurations of the algorithm. Based on the results of the experiments, it was possible to determine the optimal values of the configurable parameters of the genetic algorithm (the number of chromosomes, the number of iterations, the probability of mutation), allowing to obtain good results in an acceptable time. The characteristic features of the implemented genetic algorithm of compiling a diet is a relatively short operating time, even in a large input data. In addition, the developed solution has a high economic value due to the application of the algorithm in practice, for example, in the work of nutritionists, fitness trainers, as well as for ordinary overweight users.

The task of compiling a diet; genetic algorithm; genetic search method; heuristic approach; evolutionary algorithm; client-server application; Android application.

Введение. В настоящее время около 60% населения экономически развитых стран имеет избыточную массу тела, 25–30% – ожирение. Аналогичная тенденция отмечается и у детей: избыточная масса тела отмечается у 15–25%. Основной причиной появления лишнего веса является неправильные пищевые привычки и несбалансированный выбор продуктов. Ввиду этого разработка алгоритма составления рациона питания является перспективной темой для исследования. А так как данная задача является комбинаторной и NP-трудной, логично для её решения использовать эвристический алгоритм [1–4].

Генетические алгоритмы является весьма актуальным и известным направлением в области оптимизации и моделирования. При помощи генетических алгоритмов решаются множество задач на графах, задачи назначения и распределения объектов, задачи упаковки, многие NP-трудные проблемы [2, 3]. Генетический алгоритм относится к классу эвристических алгоритмов, то есть алгоритмов, для которых сходимость к глобальному решению не доказана, но экспериментально установлено, что в большинстве случаев они дают хорошее решение [2].

В данной статье рассматривается генетический алгоритм составления рациона питания, приводятся экспериментальные исследования разработанного алгоритма.

Математическая постановка задачи. Задача составления рациона питания заключается в том, что, имея базу данных продуктов, в которой указаны их характеристики и составляющие, найти подходящую комбинацию для выполнения распределения в соответствии с особыми потребностями человека [5–10]. Математически, данную задачу можно сформулировать следующим образом: имеются характеристики пользователя, а именно рост, желаемый вес, возраст, пол и коэффициент его физических нагрузок [11, 12]. Коэффициент физических нагрузок отображает размер физической активности пользователя, который непосредственно влияет на необходимый ему объём калорий. Наиболее часто встречающаяся градация коэффициента физических нагрузок [13–15], изображенная на рис. 1.

Минимальные физические нагрузки (сидячая работа)	1,2-1,3
Небольшая дневная активность или легки упражнения 1-3 раза в неделю	1,4-1,5
Тренировки в фитнес-зале 4-5 раз в неделю или работа средней тяжести	1,6-1,7
Интенсивные тренировки 4-5 раз в неделю	1,8-1,9
Ежедневные тренировки	2-2,1
Ежедневные интенсивные тренировки или обычные тренировки 2 раза в день	2,2-2,3
Интенсивные тренировки 2 раза в день или тяжёлая физическая работа	2,4-2,5

Рис. 1. Возможное значения коэффициента физических нагрузок

Имея эти данные, на основе модифицированного уравнения Харриса-Бенедикта высчитывается дневная норма калорий пользователя [16–20]. Формулы её расчёта (1) и (2) представлены ниже.

$$НК_m = ((10 * m) + (6.25 * h) - (5 * a) + 5) * k, \quad (1)$$

$$НК_ж = ((10 * m) + (6.25 * h) - (5 * a) - 161) * k, \quad (2)$$

где $НК_m$ – норма калорий для мужчин;
 $НК_ж$ – норма калорий для женщин;
 m – желаемый вес в килограммах;
 h – рост в сантиметрах;
 a – возраст;
 k – коэффициент физической нагрузки.

Используя эти данные, алгоритм на выходе выдаст меню на 7 дней, общее количество калорий, потребляемое каждый день, максимально приближенно к дневной норме калорий пользователя. Для оценки качества решения используется результирующая функция (3)

$$F_p = |7 * НК_п - \sum_{i=1}^7 (K_z + K_o + K_y)|, \quad (3)$$

где F_p – результирующая функция всего решения;
 $НК_п$ – дневная норма калорий пользователя;
 K_z – сумма калорий, употребляемых на завтрак;
 K_o – сумма калорий, употребляемых на обед;
 K_y – сумма калорий, употребляемых на ужин.

Для поиска оптимального решения задачи составления рациона питания необходимо минимизировать представленную выше целевую функцию.

Решение задачи составления рациона питания генетическим алгоритмом. Определим основные понятия генетического алгоритма.

Популяция – множество элементов, каждый из которых представляет собой одну хромосому или особь, т.е. популяция состоит из возможных альтернативных решений.

Хромосома – популяционная единица определенной длины, которая представляет собой совокупность генов и является возможным решением задачи.

Родитель – хромосома, потомки которой используются для создания новой популяции.

Селекция – процесс, посредством которого хромосомы (альтернативные решения), имеющие более высокое значение целевой функции (с «лучшими признаками») получают большую возможность для воспроизводства потомком, чем худшие хромосомы.

Целевая функция – функция, определяющая характеристику хромосомы (особи), которая называется приспособленностью. Функция должна удовлетворять следующему условию: чем «лучше» хромосома (особь), тем выше значение целевой функции (приспособленности).

Мутация – конструкция, позволяющая на основе преобразования родительской хромосомы, или ее части, создавать хромосому потомка.

Кроссинговер (скрещивание) – процесс обмена генами хромосом (альтернативных решений) с целью создания новых [2].

Приведем последовательность шагов генетического алгоритма для решения задачи составления рациона питания.

1) Формируется первая популяция генетического алгоритма, где каждая особь (хромосома) представляет собой модель, в которой хранится рацион питания на неделю, разделённый по дням, общее количество калорий решения, а также значение фитнес функции, а вместе, они образует популяцию решений.

2) Хромосомы (решения) оцениваются целевой функцией, вычисляется их приспособленность.

3) Для выбора родительских особей используется турнирный способ. Он заключается в том, что из популяции выбирается две группы особей, по 5 особей в каждой. Родителями становятся особи с наилучшими значениями результирующей функции по 1 из каждой группы. Ниже, на рис. 2, представлен пример возможной турнирной схемы [8].

4) Для реализации оператора скрещивания используется двухточечный кроссинговер. Результатом скрещивания являются новые хромосомы, которые сохраняются в списке для новой популяции.

5) После выполнения оператора кроссинговера отрабатывает оператор мутации. В ходе его работы есть шанс мутации особи, который задаётся пользователем алгоритма. Особи с низким значением фитнес функции мутируют значительно сильнее.

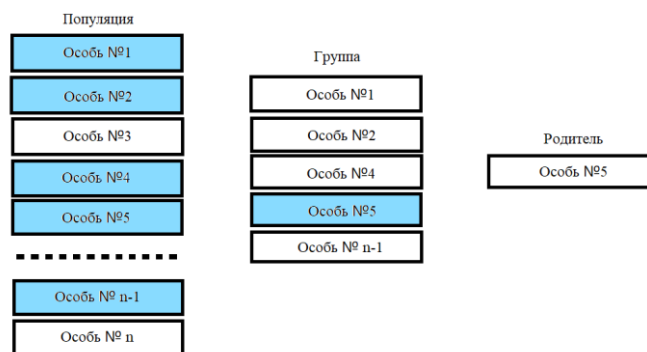


Рис. 2. Пример турнирной схемы

6) Хромосомы (решения) в новой популяции оцениваются целевой функцией, вычисляется их приспособленность, а самое лучшее решение запоминается отдельно.

7) Шаги алгоритма повторяются, начиная с шага 3, или происходит остановка алгоритма по заданному условию – было создано заданное количество поколений.

На рис. 3 изображена блок-схема разработанного генетического алгоритма.



Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма составления рациона питания

Для исследования генетического алгоритма составления рациона питания, было разработано клиент-серверное приложение под операционную систему Android. Результатом работы является найденное меню на 7 дней, которое выводится и хранится в приложении. Клиент-серверная архитектура приложения выбрана с целью экономии ресурсов телефона пользователя.

Основные вычисления рациона питания, а именно работа генетического алгоритма происходят на сервере. На нём также хранится база данных с таблицей блюд, в которых указаны основные их характеристики, часть которой изображена на рис. 4.

	id	name	calorage	protein	fat	carbohydrate
▶	1	Абрикосовый джем	209.556	0.459	0.055	51.491
	2	Варенье грушевое	214.600	0.100	0.100	56.800
	3	Варенье из абрикосов по-венгерски	241.500	0.300	0.040	64.000
	4	Варенье из айвы	221.800	0.100	0.100	58.700
	5	Варенье из арбузных корок	219.900	0.200	0.030	58.400
	6	Варенье из барбариса	203.700	0.000	0.000	54.300
	7	Варенье из брусники	160.800	0.400	0.300	41.900
	8	Варенье из брусники	244.300	0.200	0.100	64.600
	9	Варенье из брусники и яблок	247.100	0.200	0.100	65.400
	10	Варенье из брусники по-белорусски	191.100	0.200	0.100	50.400
	11	Варенье из брусники с корицей и г...	243.700	0.200	0.100	64.400
	12	Варенье из вишни без косточек	219.400	0.300	0.070	58.000
	13	Варенье из водяники	217.800	0.060	0.050	57.900
	14	Варенье из голубики и малины	229.100	0.200	0.100	60.500

Рис. 4. Информация о блюдах

Созданное приложение поддерживает регистрацию пользователей, которые после авторизации в приложении должны заполнить свои персональные характеристики, необходимые для работы генетического алгоритма составления рациона питания. На рис. 5 можно увидеть, как выглядит окно для их ввода.

Параметры пользователя:

Рост (в см)

Желаемый вес (в кг)

Возраст

Пол Мужской

Коэффициент физической нагрузки

Параметры генетического алгоритма:

Размер популяции 200

Вероятность мутации хромосомы 20

Количество итераций алгоритма 200

СОСТАВИТЬ РАЦИОН

Рис. 5. Окно ввода параметров

После отправления запроса на сервер о составлении рациона и получении ответа, в приложении будет отображаться меню из блюд на 7 дней, пример которого можно увидеть на рис. 6. Для каждого блюда приведены его калорийность на 100 грамм, количество содержащихся в нём жиров, белков и углеводов, а также необходимый размер порции. При нажатии на блюдо отобразиться окно с описанием ингредиентов и способом приготовления.

Завтрак		
Манная каша на клюквенном соке 200 г.		
112.7 кКал на 100г		
Белки: 1.9г.	Жиры: 4.6г.	Углеводы: 17.1г.
Гренки острые 100 г.		
269.3 кКал на 100г		
Белки: 15.4г.	Жиры: 13.2г.	Углеводы: 23.6г.
Какао с молоком 200 г.		
102.8 кКал на 100г		
Белки: 2.9г.	Жиры: 2.9г.	Углеводы: 17.2г.
Обед		
Борщ 300 г.		
57.7 кКал на 100г		
Белки: 3.8г.	Жиры: 2.9г.	Углеводы: 4.3г.
Котлеты по-гречески 300 г.		
178.1 кКал на 100г		
Белки: 6.4г.	Жиры: 6.7г.	Углеводы: 24.6г.
Салат "Весна" 200 г.		
90.3 кКал на 100г		
Белки: 3.5г.	Жиры: 7.4г.	Углеводы: 3.1г.
Ужин		
Салат из редиски со сметаной 200 г.		
1	2	3
4	5	6
7		

Рис. 6. Пример найденного алгоритмом рациона на день

Анализ эффективности алгоритма. Было проведено исследование зависимости значения найденного значения целевой функции от количества хромосом. График, отображающий эту зависимость, изображен на рис. 7. Можно заключить, что в промежутке от 50 до 200 хромосом значение целевой функции найденного решения улучшается со значительной скоростью, а вот в промежутке от 200 до 350 хромосом скорость улучшения фитнес функции крайне маленькая. Отсюда можно сделать вывод, что оптимально использовать популяцию размерности 200-250 хромосом.



Рис. 7. График зависимости значения целевой функции найденного решения от количества хромосом

Также исследовалась зависимость значения целевой функции найденного решения от количества итераций. График, демонстрирующий эту зависимость, представлен на рис. 8. Значительный прирост значений целевой функции найденного решения получается при количестве итераций, равном 250. Дальнейшее улучшение хоть и имеется, но обладает значительно меньшими темпами.



Рис. 8. График зависимости значения целевой функции от количества итераций генетического алгоритма

Дополнительно была изучена зависимость значения целевой функции от величины шанса мутации особи. График данной зависимости продемонстрирован на рис. 9. Наилучший шанс мутации особи в генетическом алгоритме равен 20-25%. Дальнейшее увеличение шанса мутации приводит только к ухудшению значения фитнес функции найденного решения.

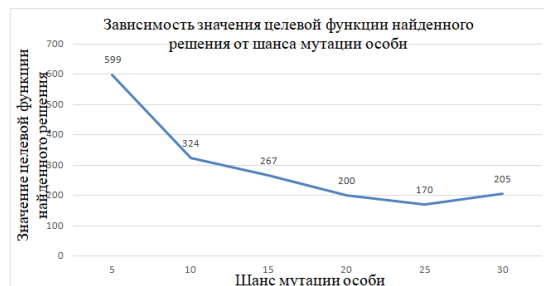


Рис. 9. График зависимости значения найденной целевой функции от шанса мутации особи

Также была установлена зависимость времени работы алгоритма от количества хромосом в генетическом алгоритме, которая отображена на рис. 10. Из графика на рис. 10 можно сделать вывод, что временная сложность алгоритма близка к линейной – $O(n)$.

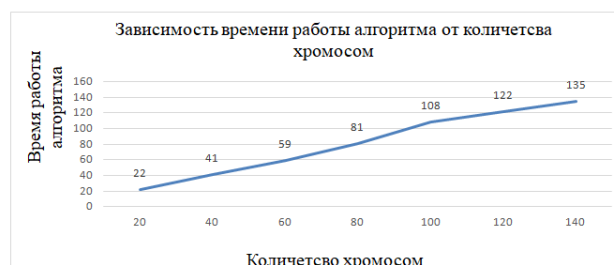


Рис. 10. Зависимость времени работы алгоритма от количества хромосом

Из графиков, представленных на рис. 7-10, можно сделать вывод, что для получения достаточно хорошего значения за небольшое время в качестве параметров генетического алгоритма стоит устанавливать 200 хромосом, 100-120 итераций, а шанс мутации особей в популяции брать равным 20-25%.

Заключение. В работе рассматривается проблема составления правильного, сбалансированного рациона питания. Приведены теоретические сведения о решаемой задаче, а также математическая постановка. В качестве метода решения данной задачи предлагается использовать генетический алгоритм. Ввиду того, что он является эвристическим алгоритмом, нахождение оптимального рациона питания не будет занимать очень много времени, в отличие от точного алгоритма.

На основе разработанного генетического алгоритма составления рациона питания реализовано мобильное клиент-серверное Android - приложение, а также проведён анализ результатов его работы, который выявил эффективность разработанного алгоритма.

Характерными чертами реализованного генетического алгоритма составления рациона питания является относительно небольшое время работы, даже при больших входных данных, а также удобный для пользователя вывод полученных результатов.

В ходе экспериментов было установлено, что алгоритм обладает достаточно хорошей масштабируемостью, что очень важно для алгоритмов, работающих с большими объёмами информации. При большом размере популяции, генерируется больше решений за один шаг алгоритма – тем самым увеличивается вероятность нахождения максимума. Помимо этого, максимальное (одно из максимальных) значений целевой функции обычно находится в первой трети всех итераций – это означает, что, повышая размер популяции, можно уменьшить число итераций, что в свою очередь стабилизирует время работы алгоритма без потери качества результата.

В перспективе можно адаптировать предложенную реализацию генетического алгоритма составления рациона питания под возможности многоядерных процессоров для сокращения времени работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 446 с.
2. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы / под ред. В.М. Курейчика. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физмалит, 2006. – 320 с.
3. *Саймон Д.* Алгоритмы эволюционной оптимизации. – М.: Изд-во: ДМК Пресс, 2020. – 1002 с.
4. *Xu X., Rong H., Trovati M. et al.* CS-PSO: chaotic particle swarm optimization algorithm for solving combinatorial optimization problems // *Soft Computing*. – 2018. – Vol. 22. – DOI: 10.1007/s00500-016-2383-8.
5. *Syahputra M.F., Felicia V., Rahmat R.F., Budiarto R.* Scheduling Diet for Diabetes Mellitus Patients using Genetic Algorithm // *Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Computing and Applied Informatics*, Medan, Indonesia, 2016. – Vol. 801. – DOI: 10.1088/1742-6596/801/1/012033.
6. *Catalán-Salgado E., Zagal-Flores R., Torres-Fernandez Y., and Paz-Nieves A.* Diet Generator Using Genetic Algorithms // *Research in Computing Science*, Mexico, 2014. – Vol. 75. – DOI 10.13053/rcs-75-1-7.
7. *Clark A.B., Coates A.M., Davidson Z.E., Bonham M.P.* Dietary Patterns under the Influence of Rotational Shift Work Schedules: A Systematic Review and Meta-Analysis // *Advances in Nutrition*. – 2023. – Vol. 14. – DOI: 10.1016/j.advnut.2023.01.006.
8. *St-Pierre N.R., Cobanov B.* A Model to Determine the Optimal Sampling Schedule of Diet Components // *Journal of Dairy Science*. – 2007. – Vol. 90. – DOI: doi.org/10.3168/jds.2006-727.

9. Rahman R., Ramli R., Jamari Z., Ku Ruhana Ku-Mahamud. Evolutionary Algorithm with Roulette-Tournament Selection for Solving Aquaculture Diet Formulation // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2016. – Vol. 2016. – DOI: 10.1155/2016/3672758.
10. Sowah R.A., Bampoe-Addo A.A., Armoo S.K., Saalia F.K., Gatsi F., Sarkodie-Mensah B. Design and Development of Diabetes Management System Using Machine Learning // *International Journal of Telemedicine and Applications*. – 2020. – Vol. 2020. – DOI: 10.1155/2020/8870141.
11. Cao Z., Sasaki A., Oh T., Miyatake N., Tsushita K., Higuchi M., Sasaki S., Tabata I. Association between dietary intake of micronutrients and cardiorespiratory fitness in Japanese men // *Journal of Nutritional Science*. – 2012. – Vol. 1. – DOI: 10.1017/jns.2012.16.
12. Hoill Jung, Kyungyong Chung. Knowledge-based dietary nutrition recommendation for obese management // *Information Technology and Management*. – 2016. – Vol. 17. – DOI: 10.1007/s10799-015-0218-4.
13. Thompson F.E., Subar A.F. Chapter 1 - Dietary Assessment Methodology, Nutrition in the Prevention and Treatment of Disease. – 4th ed. United States. 2017. – DOI: 10.1016/B978-0-12-802928-2.00001-1.
14. Zuo L., He F., Tinsley G.M., Pannell B.K., Ward E., Arciero P.J. Comparison of High-Protein, Intermittent Fasting Low-Calorie Diet and Heart Healthy Diet for Vascular Health of the Obese // *Clinical and Translational Physiology*. – 2016. – Vol. 7. – DOI: 10.3389/fphys.2016.00350.
15. Ho M., Ho J.W.C., Fong D.Y.T., Lee C.F., Macfarlane D.J., Cerin E., Lee A.M., Leung S., Chan W.Y.Y., Leung I.P.F., Lam S.H.S., Chu N., Taylor A.J., Cheng K. Effects of dietary and physical activity interventions on generic and cancer-specific health-related quality of life, anxiety, and depression in colorectal cancer survivors: a randomized controlled trial // *Journal of Cancer Survivorship*. – 2020. – Vol. 14. – DOI: 10.1007/s11764-020-00864-0.
16. Hall K.D., Ayuketah A., Brychta R., Walter P.J., Yang S., Zhou M. Ultra-Processed Diets Cause Excess Calorie Intake and Weight Gain: An Inpatient Randomized Controlled Trial of Ad Libitum Food Intake // *Cell Metabolism*. – 2019. – Vol. 30. – DOI: 10.1016/j.cmet.2019.05.008.
17. Saslow L.R., Kim S., Daubenmier J.J., Moskowitz J.T., Phinney S.D., Goldman V., Murphy E.J., Cox R.M., Moran P., Hecht F.M. A Randomized Pilot Trial of a Moderate Carbohydrate Diet Compared to a Very Low Carbohydrate Diet in Overweight or Obese Individuals with Type 2 Diabetes Mellitus or Prediabetes, Research Article, Plos One, 2014. – DOI: 10.1371/journal.pone.0091027.
18. Hermawan H., Hutomo R.C., Sufiatul M., Prihatini M. Menu Design For Pregnant Women Diet For Stunting Prevention Using Genetic Algorithm // *International Journal of Electrical Engineering and Information Technology*. – 2021. – Vol. 4. – DOI: 10.29138/ijeit.v4i1.1253.
19. Gumustekin S., Senel T., Ali Cengiz M. A Comparative Study on Bayesian Optimization Algorithm for Nutrition Problem // *Journal of Food and Nutrition Research*. – 2014. – Vol. 2. – DOI: 10.12691/jfnr-2-12-15.
20. Sufahani S., Mohamad M., Roslan R., Kamardan M.G., Che-Him N., Ali M., Khalid K., Nazri E.M., Ahmad A. Applied Mathematical Optimization Technique on Menu Scheduling for Boarding School Student Using Delete-Reshuffle-Reoptimize Algorithm // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 995. – DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012002.

REFERENCES

1. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search optimization algorithms. Nature-inspired algorithms; tutorial]. 2nd ed. Moscow: Izd.vo MGTU im. N.E. Bauman, 2017, 446 p.
2. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms], ed. by V.M. Kureychika. 2nd ed. Moscow: Fizmalit, 2006, 320 p.
3. Saymon D. Algoritmy evolyutsionnoy optimizatsii [Evolutionary optimization algorithms]. Moscow: Izd-vo: DMK Press, 2020, 1002 p.
4. Xu X., Rong H., Trovati M. et al. CS-PSO: chaotic particle swarm optimization algorithm for solving combinatorial optimization problems, *Soft Computing*, 2018, Vol. 22. DOI: 10.1007/s00500-016-2383-8.
5. Syahputra M.F., Felicia V., Rahmat R.F., Budiarto R. Scheduling Diet for Diabetes Mellitus Patients using Genetic Algorithm, *Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Computing and Applied Informatics, Medan, Indonesia, 2016*, Vol. 801. DOI: 10.1088/1742-6596/801/1/012033.

6. Catal'an-Salgado E., Zagal-Flores R., Torres-Fernandez Y., and Paz-Nieves A. Diet Generator Using Genetic Algorithms, *Research in Computing Science, Mexico*, 2014, Vol. 75. DOI 10.13053/rcs-75-1-7.
7. Clark A.B., Coates A.M., Davidson Z.E., Bonham M.P. Dietary Patterns under the Influence of Rotational Shift Work Schedules: A Systematic Review and Meta-Analysis, *Advances in Nutrition*, 2023, Vol. 14. DOI: 10.1016/j.advnut.2023.01.006.
8. St-Pierre N.R., Cobanov B. A Model to Determine the Optimal Sampling Schedule of Diet Components, *Journal of Dairy Science*, 2007, Vol. 90. DOI: doi.org/10.3168/jds.2006-727.
9. Rahman R., Ramli R., Jamari Z., Ku Ruhana Ku-Mahamud. Evolutionary Algorithm with Roulette-Tournament Selection for Solving Aquaculture Diet Formulation, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, Vol. 2016. DOI: 10.1155/2016/3672758.
10. Sowah R.A., Bampoe-Addo A.A., Armoo S.K., Saalia F.K., Gatsi F., Sarkodie-Mensah B. Design and Development of Diabetes Management System Using Machine Learning, *International Journal of Telemedicine and Applications*, 2020, Vol. 2020. DOI: 10.1155/2020/8870141.
11. Cao Z., Sasaki A., Oh T., Miyatake N., Tsushita K., Higuchi M., Sasaki S., Tabata I. Association between dietary intake of micronutrients and cardiorespiratory fitness in Japanese men // *Journal of Nutritional Science*. – 2012. – Vol. 1. – DOI: 10.1017/jns.2012.16.
12. Hoill Jung, Kyungyong Chung. Knowledge-based dietary nutrition recommendation for obese management, *Information Technology and Management*, 2016, Vol. 17. DOI: 10.1007/s10799-015-0218-4.
13. Thompson F.E., Subar A.F. Chapter 1 - Dietary Assessment Methodology, *Nutrition in the Prevention and Treatment of Disease*. 4th ed. United States. 2017. DOI: 10.1016/B978-0-12-802928-2.00001-1.
14. Zuo L., He F., Tinsley G.M., Pannell B.K., Ward E., Arciero P.J. Comparison of High-Protein, Intermittent Fasting Low-Calorie Diet and Heart Healthy Diet for Vascular Health of the Obese, *Clinical and Translational Physiology*, 2016, Vol. 7. DOI: 10.3389/fphys.2016.00350.
15. Ho M., Ho J.W.C., Fong D.Y.T., Lee C.F., Macfarlane D.J., Cerin E., Lee A.M., Leung S., Chan W.Y.Y., Leung I.P.F., Lam S.H.S., Chu N., Taylor A.J., Cheng K. Effects of dietary and physical activity interventions on generic and cancer-specific health-related quality of life, anxiety, and depression in colorectal cancer survivors: a randomized controlled trial, *Journal of Cancer Survivorship*, 2020, Vol. 14. DOI: 10.1007/s11764-020-00864-0.
16. Hall K.D., Ayuketah A., Brychta R., Walter P.J., Yang S., Zhou M. Ultra-Processed Diets Cause Excess Calorie Intake and Weight Gain: An Inpatient Randomized Controlled Trial of Ad Libitum Food Intake, *Cell Metabolism*, 2019, Vol. 30. DOI: 10.1016/j.cmet.2019.05.008.
17. Saslow L.R., Kim S., Daubenmier J.J., Moskowitz J.T., Phinney S.D., Goldman V., Murphy E.J., Cox R.M., Moran P., Hecht F.M. A Randomized Pilot Trial of a Moderate Carbohydrate Diet Compared to a Very Low Carbohydrate Diet in Overweight or Obese Individuals with Type 2 Diabetes Mellitus or Prediabetes, *Research Article, Plos One*, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0091027.
18. Hermawan H., Hutomo R.C., Sufiatul M., Prihatini M. Menu Design For Pregnant Women Diet For Stunting Prevention Using Genetic Algorithm, *International Journal of Electrical Engineering and Information Technology*, 2021, Vol. 4. DOI: 10.29138/ijeit.v4i1.1253.
19. Gumustekin S., Senel T., Ali Cengiz M. A Comparative Study on Bayesian Optimization Algorithm for Nutrition Problem, *Journal of Food and Nutrition Research*, 2014, Vol. 2. DOI: 10.12691/jfmr-2-12-15.
20. Sufahani S., Mohamad M., Roslan R., Kamardan M.G., Che-Him N., Ali M., Khalid K., Nazri E.M., Ahmad A. Applied Mathematical Optimization Technique on Menu Scheduling for Boarding School Student Using Delete-Reshuffle-Reoptimize Algorithm, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 995. DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012002.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Марков.

Полупанова Елена Евгеньевна – Кубанский государственный университет; e-mail: jjenka@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79284013301; кафедра вычислительных технологий; к.т.н.; доцент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0364-1132>.

Олейник Александр Сергеевич – e-mail: wastocryter@mail.ru; тел.: +89186725060; кафедра вычислительных технологий; магистрант.

Polupanova Elena Evgenievna – Kuban State University; e-mail: jienka@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79284013301, the department of computational technologies; cand. of eng. sc.; associate professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0364-1132>.

Oleynik Alexander Sergeevich – e-mail: wastocryter@mail.ru; phone: +89186725060, the department of computational technologies; master's degree student.

УДК 621.396.96

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-96-107

К.Е. Румянцев, П.Д. Миронова**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ
СИНХРОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА СМЕЖНОЙ ПАРЫ
СЕГМЕНТОВ С МАКСИМАЛЬНЫМ СУММАРНЫМ ОТСЧЁТОМ**

Предложен алгоритм обнаружения синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом. Указанный алгоритм учитывает недостатки альтернативного алгоритма обнаружения синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем, состоящие в необходимости знания уровня фоновой и шумовой воздействия, который определяет пороговый уровень и вероятность ошибочного обнаружения сигнальной пары сегментов. Исследована зависимость вероятности ошибки обнаружения синхросигнала от среднего числа сигнальных фотонов в синхросигнале при различных значениях числа сегментов во временном кадре. Так, вероятность ошибочного обнаружения синхросигнала в течение кадра значительно уменьшается по мере роста среднего числа фотонов в синхросигнале. Например, при увеличении среднего числа сигнальных фотонов в синхросигнале с 1 до 5 вероятность ошибки обнаружения синхросигнала снижается в 37 раз. Необходимо отметить слабое влияние числа пар сегментов на вероятность ошибочного обнаружения, что указывает на слабое влияние импульсов темнового тока на вероятностные характеристики предложенного алгоритма обнаружения синхросигналов. Получены аналитические выражения для точного и экспресс-расчёта вероятностных характеристик обнаружения, учитывающие вероятность нахождения синхросигнала на границе двух смежных сегментов в связи с равенством длительностей синхросигнала и временного сегмента. Результаты расчёта по точным выражениям вероятности обнаружения синхросигнала показали, что при отношении сигнал/шум равном 10 и выше влиянием шумовых импульсов на вероятность обнаружения синхросигнала можно пренебречь. Отмечено, вероятность обнаружения будет тем больше, чем больше число регистрируемых событий, или, другими словами, чем больше сумма средних чисел сигнальных фотонов и импульсов темнового тока. Расчёт вероятности обнаружения синхросигнала по упрощённым выражениям показывает незначительное отклонение от расчётов по точным формулам, которое не превышает 5,3 %, причём расчёт по приближённым выражениям даёт заниженный результат. Полученные приближённые аналитические выражения могут применяться для экспресс-расчёта вероятности обнаружения синхросигнала в паре сегментов.

Квантовое распределение ключа; синхронизация; максимальный суммарный отсчёт; вероятностные характеристики.

K.E. Rumyantsev, P.D. Mironova**PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE SYNC DETECTION
ALGORITHM BASED ON THE SELECTION OF AN ADJACENT PAIR
OF SEGMENTS WITH THE MAXIMUM TOTAL COUNT**

An algorithm for detecting sync signals based on the selection of an adjacent pair of segments with the maximum total count is proposed. This algorithm takes into account the shortcomings of an alternative algorithm for detecting a sync signal based on comparing the sum of samples from an adjacent pair of segments with a threshold level, consisting in the need to know the

level of background and noise influence, which determines the threshold level and the probability of erroneous detection of a signal pair of segments. The dependence of the probability of an error in detecting a sync pulse on the average number of signal photons in a sync pulse is studied for various values of the number of segments in a time frame. Thus, the probability of erroneous detection of a sync pulse during a frame decreases significantly as the average number of photons in a sync pulse increases. For example, by increasing the average number of signal photons in a sync pulse from 1 to 5, the probability of a sync detection error is reduced by a factor of 37. It should be noted that the number of pairs of segments has a weak effect on the probability of erroneous detection, which indicates a weak effect of dark current pulses on the probabilistic characteristics of the proposed algorithm for detecting sync signals. Analytical expressions are obtained for accurate and express calculation of probabilistic characteristics of detection, taking into account the probability of finding a sync pulse at the boundary of two adjacent segments due to the equality of the duration of the sync pulse and the time segment. The results of calculation using exact expressions for the probability of detecting a sync pulse showed that when the signal-to-noise ratio is equal to 10 and higher, the influence of noise pulses on the probability of detecting a sync pulse can be neglected. It has been noted that the greater the number of recorded events, or, in other words, the greater the sum of the average numbers of signal photons and dark current pulses, the greater the detection probability. The calculation of the probability of detecting a sync pulse using simplified expressions shows a slight deviation from calculations using exact formulas, which does not exceed 5,3%, and the calculation using approximate expressions gives an underestimated result. The resulting approximate analytical expressions can be used for express calculation of the probability of detecting a sync pulse in a pair of segments.

Quantum key distribution; synchronization; maximum total count; probabilistic characteristics.

Введение. Обеспечение стабильного и эффективного процесса квантового распределения ключей (КРК) невозможно без стабильной и точной работы подсистемы синхронизации, которая управляет временными настройками работы приёмопередающей и кодирующей станций системы КРК [1–21].

В [12–16] предложены и исследованы алгоритмы обнаружения синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем. Недостаток алгоритма обнаружения синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем состоит в том, что необходимо знать уровень фоновое и шумовое воздействия, который определяет пороговый уровень k_{th} и вероятность ошибочного обнаружения сигнальной пары сегментов $p_{th.b}$. Это требует адаптации порогового уровня к фактической мощности фоновое и шумовое воздействия.

Другим существенным недостатком алгоритма обнаружения на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем является большое среднее время, затрачиваемое на обнаружение синхроимпульса, при высоком уровне срабатываний $p_{th.b}$.

При использовании алгоритма, основанного на сравнении отсчётов (в противоположность тесту сравнения суммы отсчётов с пары сегментов с порогом), задание порога не требуется. Решение об обнаружении принимается после истечения фиксированного времени. Здесь вероятность обнаружения в паре сегментов определяется вероятностью того, что суммарное число фотонов в этой паре превышает отсчёты в остальных парах сегментов. Следовательно, здесь не требуется контроль (измерения) мощности фоновое излучения и частоты генерации импульсов темнового тока (ИТТ).

В [3] предложено для расчёта вероятности обнаружения синхроимпульса использовать формулу для расчёта вероятности выделения слова при тестовой процедуре в М-ричной системе коммуникации с позиционно-импульсной модуляцией и блочным кодированием. В формуле производится замена счётного интервала на длительность пары сегментов при синхронизации и удваивается среднее число шумовых импульсов. Это позволило получить расчётные соотношения для вероятности обнаружения синхроимпульса для двух правил принятия решения.

Алгоритм обнаружения синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом

Правило 1. В случае равенства максимальных отсчётов в двух парах сегментов в течение одного временного кадра в качестве сигнальной случайно выбирается одна из них.

Здесь вероятность отсутствия ошибки в течение одного временного кадра рассчитывается по формуле

$$p_{D1} = \frac{\exp(-\bar{n}_s - N_w \cdot \bar{k}_b)}{N_w} + \rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ Pos(k, \bar{k}_s) \left[\sum_{j=0}^{k-1} Pos(j, \bar{k}_b) \right]^{N_w-1} \cdot \frac{1}{N_w} \cdot \frac{1}{Pos(k, \bar{k}_b)} \cdot \left[\sum_{j=0}^{k-1} Pos(j, \bar{k}_b) \right] \left[\left(1 + \frac{Pos(k, \bar{k}_b)}{\sum_{j=0}^{k-1} Pos(j, \bar{k}_b)} \right)^{N_w} - 1 \right] \right\}. \quad (1)$$

Первый член учитывает случай, когда во всех парах сегментов фиксируются нулевые отсчёты (отсутствие фотонов). Второе слагаемое учитывает случай отсутствия равенства отсчётов, а также все случаи равенства отсчётов.

Правило 2. Равенство максимальных отсчётов в любых двух парах сегментов в течение одного временного кадра трактуется как ошибка обнаружения.

Следовательно, обнаружение импульса имеет место лишь тогда, когда отсчёт в одной из пар сегментов надёжно превышает значения отсчётов со всех других пар сегментов. В противном случае необходимо повторное обнаружение в следующем временном кадре.

Выражение для вероятности обнаружения синхроимпульса в течение временного кадра существенно упрощается [3]

$$p_{D1} = \sum_{k_1=1}^{\infty} \left\{ Pos(k_1, \bar{k}_s) \cdot \left[\sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_2, \bar{k}_b) \right]^{N_w-1} \right\} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ Pos(k, \bar{k}_s) \cdot \left[\frac{\Gamma(k-1, \bar{k}_b)}{\Gamma(k-1)} \right]^{N_w-1} \right\}. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены зависимости вероятности ошибочного обнаружения синхроимпульса в течение временного кадра от среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе $\bar{n}_s$ для различного числа сегментов N_w при $\bar{n}_b=0,001$. Выбор числа сегментов N_w , кратным 2, обоснован цифровой реализацией блока управления. Выбор среднего числа шумовых импульсов $\bar{n}_b=0,001$ ориентирован на применение в волоконно-оптической системе фотодетектора с частотой генерации ИТТ 3,3 МГц при длительности оптического импульса 300 пс.

Вероятность ошибочного обнаружения синхроимпульса в течение кадра значительно уменьшается по мере роста среднего числа фотонов в синхроимпульсе. Так, если при $\bar{n}_s = 0,1$ и $N_w=8$ вероятность ошибки обнаружения синхроимпульса равна 0,90, то при $\bar{n}_s = 1$ она падает до 0,37, а при $\bar{n}_s = 5$ – уже до 0,01. При этом отметим слабое влияние числа пар сегментов на вероятность ошибочного обнаружения: при $\bar{n}_s = 2$ и увеличении N_w с 8 до 64 вероятность ошибки обнаружения незначительно меняется с 0,14 до 0,17. Последнее указывает на слабое влияние ИТТ на вероятностные характеристики анализируемой системы.

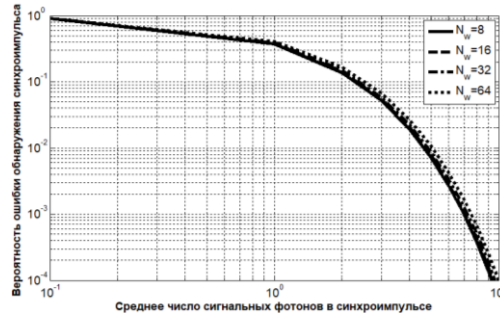


Рис. 1. Вероятности ошибочного обнаружения синхроимпульса в течение кадра при среднем числе ИТТ 0,001 за длительность сегмента в волоконно-оптической линии

Отметим, что лавинные фотодиоды (ЛФД), используемые в приёмной аппаратуре при КРК, имеют существенно меньший уровень шумов. Например, в случае применения однофотонного ЛФД с частотой ИТТ менее 100 Гц среднее число шумовых импульсов за длительность оптического импульса 300 пс не превышает $\bar{n}_b = 3 \cdot 10^{-10}$. Следовательно, в системах КРК можно полагать $\bar{k}_b \cong 0$. Тогда

$$p_{D1} = \sum_{k=1}^{\infty} \{Pos(k, \bar{k}_s) \cdot [1]^{N_w-1}\} = \sum_{k=1}^{\infty} Pos(k, \bar{k}_s) = 1 - Pos(k=0, \bar{k}_s) \quad (3)$$

$$= 1 - \exp(-\bar{k}_s) = 1 - \exp(-\bar{n}_s).$$

В системах КРК передаваемый квантовый импульс имеет среднее число фотонов в импульсе 0,1...0,5, а после распространения на 50 км будет ослаблен минимум в 10 раз до 0,01...0,05. Учитывая это, возможно использование приближённой формулы для экспресс-расчёта предельной вероятности обнаружения синхроимпульса в течение временного кадра

$$p_{D1} = 1 - \exp(-\bar{n}_s) = \bar{n}_s - \frac{\bar{n}_s^2}{2} + \frac{\bar{n}_s^3}{6}.$$

Погрешность не превышает 21 % при расчёте по формуле

$$p_{D1} \approx \bar{n}_s,$$

даже при $\bar{n}_s = 0,5$, падая до 5 % при $\bar{n}_s = 0,1$.

На рис. 2 представлены графики зависимостей вероятностей ошибки обнаружения синхроимпульса от среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе для атмосферной оптической системы при $\bar{n}_b=0,2$ для сравнения с предшествующим алгоритмом на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем [23].

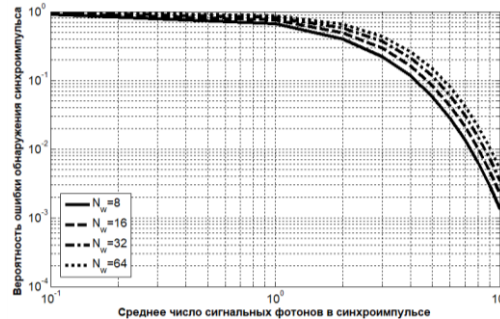


Рис. 2. Вероятности ошибочного обнаружения синхроимпульса в течение кадра при среднем числе фоновых фотонов 0,2 за длительность сегмента

Сравнительный анализ графиков показывает, что вероятность ошибочного обнаружения синхроимпульса в алгоритме на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом зависит от суммы средних чисел сигнальных и шумовых импульсов и числа сегментов в кадре, в то время как в предложенном ранее алгоритме обнаружения синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем вероятность ошибочного обнаружения сигнальной пары сегментов зависит только от среднего числа шумовых импульсов.

Действительно при $\bar{n}_b=0,2$ вероятность ошибочного обнаружения 0,005 достигается при $N_w=8$ путём выбора порогового уровня $k_{th}=2$ (алгоритм обнаружения синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем), либо путём увеличения среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе до $\bar{n}_s=8,5$ (алгоритм обнаружения синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом).

Остановимся на ограничениях использования для расчёта вероятности обнаружения синхроимпульса формулы для расчёта вероятности выделения слова при тестовой процедуре в М-ричной системе коммуникации с позиционно-импульсной модуляцией и блочным кодированием. Приём сигналов с позиционно-импульсной модуляцией предполагает фиксацию временного интервала, внутри которого может присутствовать сигнальный импульс. Он не может одновременно принадлежать двум соседним временным интервалам. В противоположность этому в анализируемой системе КРК это возможно.

Обратимся к рис. 3. Временной кадр, равный по длительности периоду следования синхроимпульсов T_s , разбит на N_w временных сегментов с длительностью τ_w , равной длительности синхроимпульса τ_s . Как и ранее временные сегменты анализируются попарно (1, 2), (2, 3), ..., $(N_w - 1, N_w)$, $(N_w, 1)$. Пусть центр тяжести синхроимпульса располагается в i -м сегменте с левой стороны от его середины. При этом среднее число фотонов, регистрируемое в $(i-1)$ -м и в i -м сегментах, определим как $\bar{n}_{s1}$ и $\bar{n}_{s2}$, причём всегда $\bar{n}_s = \bar{n}_{s1} + \bar{n}_{s2}$.

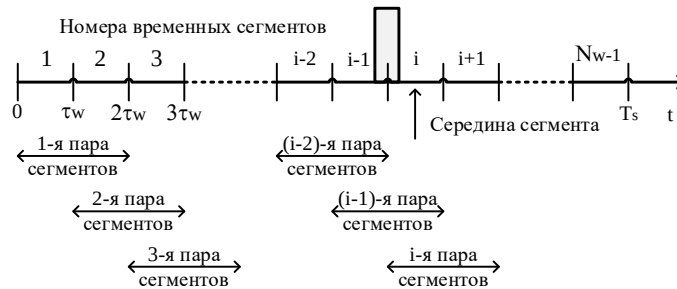


Рис. 3. Поиск максимального отсчёта в парах сегментов в течение временного кадра

Поскольку сигнальные фотоны могут приниматься в $(i-1)$ -м и i -м сегментах, то обнаружение синхроимпульса может быть в $(i-2)$ -й, $(i-1)$ -й и i -й паре сегментов при условии, что отсчёт в одной из этих пар надёжно превышает отсчёты со всех других пар сегментов. В противном случае повторно анализируется следующий временной кадр.

Заметим, что среднее число событий, регистрируемых в $(i-2)$ -й, $(i-1)$ -й и i -й парах сегментов соответственно равны $\bar{k}_{s1} = \bar{n}_{s1} + 2 \cdot \bar{n}_b$, $\bar{k}_s = \bar{n}_s + 2 \cdot \bar{n}_b$ и $\bar{k}_{s2} = \bar{n}_{s2} + 2 \cdot \bar{n}_b$.

Выражение для вероятности обнаружения синхроимпульса в течение временного кадра складывается из трёх составляющих

$$p_{D1} = p_{D11} + p_{D12} + p_{D13}, \quad (4)$$

определяющих соответственно вероятности обнаружения синхроимпульса в (i-2)-й, (i-1)-й или i-й паре сегментов.

Если центр тяжести синхроимпульса располагается на границе между (i-1)-м и i-м сегментами, то

$$\overline{k_{s1}} = \overline{n_s}/2 + 2 \cdot \overline{n_b}, \quad \overline{k_s} = \overline{n_s} + 2 \cdot \overline{n_b} \quad \text{и} \quad \overline{k_{s2}} = \overline{n_s}/2 + 2 \cdot \overline{n_b}.$$

Тогда формулы упрощаются

$$p_{D11} = p_{D13} = \sum_{k_1=1}^{\infty} \left\{ Pos(k_1, \overline{k_{s1}}) \left[\left(\sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_2, \overline{k_b}) \right)^{N_w-3} \left(\sum_{k_3=0}^{k_1-1} Pos(k_3, \overline{k_s}) \right) \cdot \left(\sum_{k_4=0}^{k_1-1} Pos(k_4, \overline{k_{s2}}) \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

$$p_{D12} = \sum_{k_1=1}^{\infty} \left\{ Pos(k_1, \overline{k_s}) \left[\left(\sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_2, \overline{k_b}) \right)^{N_w-3} \cdot \left(\sum_{k_3=0}^{k_1-1} Pos(k_3, \overline{k_{s1}}) \right)^2 \right] \right\}. \quad (6)$$

На рисунке 4 представлены зависимости вероятности обнаружения синхроимпульса в паре сегментов от среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе при количестве временных сегментов $N_w=8$ и среднем числе ИТТ $\overline{n_b} = 10^{-7}$, что характерно для волоконно-оптической системы. Отметим, количество итераций при суммировании сокращено до $k_1 = 1 \dots 1000$ для увеличения быстродействия программы для расчёта указанных характеристик.

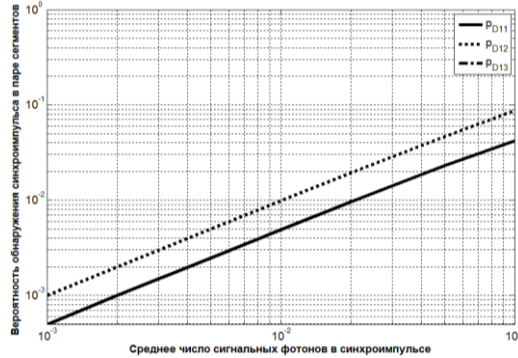


Рис. 4. Вероятность обнаружения синхроимпульса в паре сегментов

Из рисунка видно, увеличение вероятности обнаружения синхроимпульса в паре сегментов прямо пропорционально увеличению среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе. Так, при увеличении среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе в 100 раз (с 0,001 до 0,1) вероятность обнаружения синхроимпульса увеличивается в 84,2 раза (0,0005 против 0,0421) для (i-2)-й и i-й пар сегментов и в 86,5 раза (0,001 против 0,0865) для (i-1)-й пары сегментов. Также отметим, различие вероятности обнаружения синхроимпульса в (i-1)-й паре сегментов и вероятности обнаружения в (i-2)-й или i-й паре сегментов составляет ~ 2 раза.

Для волоконно-оптических систем КРК $\overline{k_s} \cong \overline{n_s}$, $\overline{k_{s1}} = \overline{k_{s2}} \cong \overline{n_s}/2 = \overline{k_s}/2$. и $(\exp(-\overline{k_b}))^{N_w-3} \cong \exp(-(N_w-3) \cdot \overline{k_b})$.

Учитывая, что для волоконно-оптических систем справедливо условие $\overline{n_s} < 1$, получим

$$p_{D11} = p_{D13} = \frac{\overline{k_s}}{2} \cdot \exp(-(N_w-3) \cdot \overline{k_b}) \cdot \exp(-2 \cdot \overline{k_s}), \quad (7)$$

$$p_{D12} = \overline{k_s} \cdot \exp(-(N_w-3) \cdot \overline{k_b}) \cdot \exp(-2 \cdot \overline{k_s}). \quad (8)$$

Откуда $p_{D12} = 2 \cdot p_{D11} = 2 \cdot p_{D13}$ и $p_{D12} = p_{D11} + p_{D13}$.

Наконец

$$p_{D1} = p_{D11} + p_{D12} + p_{D13} = 2 \cdot p_{D12}. \quad (9)$$

Действительно, как отмечено ранее, вероятность обнаружения синхроимпульса в (i-2)-й или i-й паре сегментов в 2 раза больше, чем вероятность обнаружения в (i-1)-й паре сегментов.

На рис. 5 представлены зависимости вероятности обнаружения синхроимпульса в паре сегментов от среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе при количестве временных сегментов $N_w=8$ и среднем числе ИТТ за длительность сегмента $\overline{n_b} = 10^{-7}$, полученные по упрощённым выражениям.

Расчёт вероятности обнаружения синхроимпульса по упрощённым выражениям показывает незначительное отклонение от точных расчётов, которое составляет не более 5,3 %, причём расчёт по приближённым выражениям даёт заниженный результат. Таким образом, полученные приближённые аналитические выражения могут применяться для экспресс-расчёта вероятности обнаружения синхроимпульса в паре сегментов.

На рис. 6 представлены результаты расчёта по точным выражениям (5)-(6) вероятности обнаружения синхроимпульса в (i-1)-й паре сегментов p_{D12} при различных значениях среднего числа ИТТ $\overline{n_b}$ за длительность сегмента от среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе $\overline{n_s}$ при количестве временных сегментов $N_w=8$.

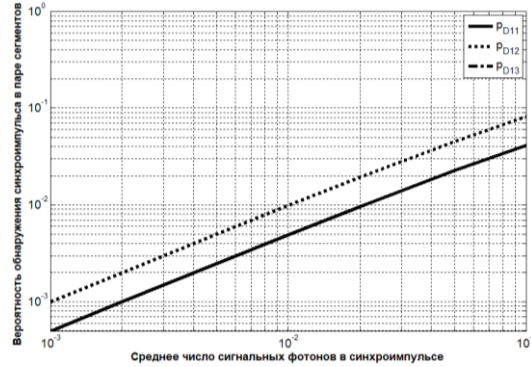


Рис. 5. Вероятность обнаружения синхроимпульса в паре сегментов (экспресс-расчёт)

При $\overline{n_b} \leq 10^{-5}$ различие в вероятности обнаружения синхроимпульса стремится к 0 при различных средних числах сигнальных фотонов в синхроимпульсе, следовательно, при $\overline{n_b} \leq 10^{-5}$ влиянием ИТТ на вероятность обнаружения синхроимпульса можно пренебречь. Однако при $\overline{n_b} \geq 10^{-4}$ влияние ИТТ на вероятность обнаружения синхроимпульса значительно увеличивается, что обусловлено соизмеримостью средних чисел сигнальных фотонов и ИТТ.

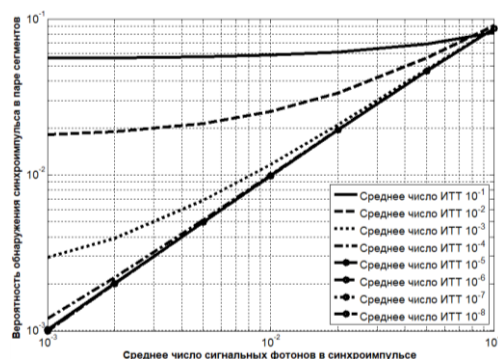


Рис. 6. Вероятность обнаружения синхроимпульса в сигнальной (i-1)-й паре сегментов (точный расчёт)

Отметим, чем меньше $\bar{n}_b$, тем быстрее возрастает вероятность обнаружения синхроимпульса. Так, при $\bar{n}_b = 0,1$ различие в вероятности обнаружения составляет 1,46 раза при увеличении $\bar{n}_s$ от 0,001 до 0,1. При уменьшении среднего числа ИТТ до $\bar{n}_b = 10^{-8}$ различие в вероятности обнаружения составляет уже 86,5 раза при увеличении $\bar{n}_s$ от 0,001 до 0,1.

Графики на рисунке 6 показывают, что влиянием шумовых импульсов на вероятность обнаружения синхроимпульса можно пренебречь уже при отношении $SNR = \bar{n}_s / \bar{n}_b > 10$.

Учитывая, что вероятность обнаружения синхроимпульса в (i-1)-й паре сегментов при расчёте по точным аналитическим выражениям зависит от суммы средних чисел сигнальных фотонов и ИТТ, вероятность обнаружения будет тем больше, чем больше число регистрируемых событий, или, другими словами, чем больше сумма средних чисел сигнальных фотонов и ИТТ, что и подтверждают графики на рис. 6.

На рис. 7 представлены результаты экспресс-расчёта по (7)-(8) вероятности обнаружения синхроимпульса в (i-1)-й паре сегментов p_{D12} при количестве временных сегментов $N_w=8$ и различных значениях среднего числа ИТТ $\bar{n}_b$ за длительность сегмента от среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе $\bar{n}_s$.

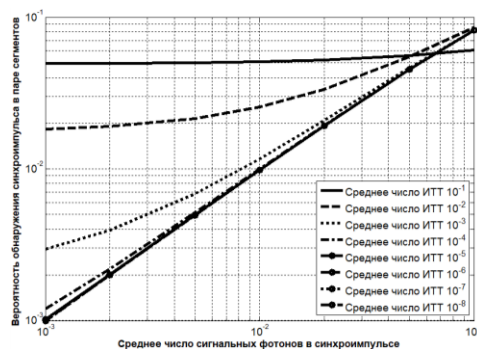


Рис. 7. Вероятность обнаружения синхроимпульса в сигнальной (i-1)-й паре сегментов (экспресс-расчёт)

Проводя сравнительный анализ полученных результатов при расчёте по точным выражениям и экспресс-расчёте, отклонение вероятности обнаружения синхроимпульса при реализации алгоритма на основе ЛФД со средним числом ИТТ $\bar{n}_b = 10^{-7}$ составляет не более 5,6%.

Выводы. Предложен алгоритм обнаружения синхросигнала подсистемы синхронизации приёмопередающей и кодирующей станций КРК, отличительной особенностью которого является обнаружение синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом. Преимуществом указанного алгоритма, по сравнению с ранее предложенным алгоритмом обнаружения синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем, является отсутствие необходимости знания уровня фоновых и шумовых воздействий, определяющего пороговый уровень и вероятность ошибочного обнаружения сигнальной пары сегментов в предшествующем алгоритме, что значительно упрощает и сокращает время подготовительного этапа перед процессом синхронизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lindsey W.C.* Synchronization Systems in Communication and Control. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1972.
2. *Стиффлер Дж.* Теория синхронной связи: пер. с англ. / под ред. Э.М. Габидулина. – М.: Связь, 1975.
3. *Гальярди Р.М., Карп Ш.* Оптическая связь: пер. с англ. / под ред. А.Г. Шереметьева. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
4. *Виттерби А.Д., Омура Дж.К.* Принципы цифровой связи и кодирования: пер. с англ. / под ред. К.Ш. Зигангирова. – М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.
5. *Yilong Geng, Shiyu Liu, and Zi Yin.* Exploiting a Natural Network Effect for Scalable, Fine-grained Clock Synchronization // NSDI'18: Proceedings of the 15th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. – 2018. – P. 81-94.
6. *Govindan Kannan Pravein., Joshi Raj., Chan Mun Choon.* Precise Time-synchronization in the Data-Plane Using Programmable Switching ASICs // Proceedings of the 2019 ACM Symposium on SDN Research, ACM. – 2019. – P. 8-20. – DOI: 10.1145/3314148.3314353.
7. *Румянцев К.Е.* Системы квантового распределения ключа: монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 264 с.
8. *Румянцев К.Е.* Синхронизация в системе квантового распределения ключа с автоматической компенсацией поляризационных искажений // Телекоммуникации. – 2017. – № 2. – С. 32-40.
9. *Румянцев К.Е., Плёткин А.П.* Синхронизация системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8. – С. 81-96.
10. *Plenkin A., Rumyantsev K., Rudinsky E.* Comparative analysis of single-photon synchronization algorithms in the quantum key distribution system // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – 2017. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110047.
11. *Rumyantsev K.E., Rudinsky E.A.* Time synchronization method in quantum key distribution system with automatic compensation of polarization distortions // Proceedings of the 2nd International Conference on Multimedia and Image Processing (ICMIP). – 2017. – P. 346-349. – DOI: 10.1109/ICMIP.2017.68.
12. *Mironov Y.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E.* Study of the characteristics of the synchronization algorithm for a quantum key distribution system based on comparing the number of samples from an adjacent pair of time windows with a threshold level // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1069. – 2021. – Paper 012011. – P. 1-8. – DOI: 10.1088/1757-899X/1069/1/012011.
13. *Mironov Y., Mironova P., Rumyantsev K.* Characteristics of a two-stage synchronization algorithm in the system of quantum key distribution with dividing a fiber-optic line into sections with decreasing length // ACM International Conference Proceeding Series. – 2020. – Paper №3433596. – P. 1-5. – DOI: 10.1145/3433174.3433595.
14. *Mironov Y.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E.* Methodology for calculating the average time of entry into synchronism of stations of the system of quantum key distribution with sequential polling of fiber-optic line sections with decreasing length by the graphic-analytical method // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 224. – P. 1-9. – DOI: 10.1051/e3sconf/202022401032.
15. *Mironov Y.K., Rumyantsev K.E.* Single-Photon Algorithm for Synchronizing the System of Quantum Key Distribution with Polling Sections of a Fiber-Optic Line // Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies. – 2020. – P. 87-97. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4451-4_8.

16. Rumyantsev K.Y., Bamatgireeva K.B., Mironov Y.K. Single Photon Algorithm of Search of a Pulse Radiation Source // *Communications in Computer and Information Science*. – 2019. – 958. – P. 95-108. – DOI: 10.1007/978-981-13-3804-5_8.
17. Курочкин В.Л. и др. Экспериментальные исследования в области квантовой криптографии // *Фотоника*. – 2012. – Т. 5. – С. 54-66.
18. Румянцев К.Е., Плёткин А.П. Безопасность режима синхронизации системы квантового распределения ключей // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 5 (166). – С. 135-153.
19. Миронов Я.К. Моделирование этапа тестирования двухэтапного временного алгоритма синхронизации при нахождении однофотонного источника излучения в сигнальном участке ВОЛС // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции*. – 2022. – С. 19-21.
20. Mironov Y.K., Rumyantsev K.E. Providing the Required Probability of Synchronization Error When Splitting a Fiber-Optic Line into Sections with Decreasing Length in a Quantum Key Distribution System // *Proceedings - 2021 3rd International Conference on System Reliability and Safety Engineering, SRSE 2021*. – 2021. – P. 145-149. – DOI: 10.1109/SRSE54209.2021.00032.
21. Миронов Я.К. Синхронизация станций системы квантового распределения ключа с последовательным опросом участков волоконно-оптической линии с убывающей длиной // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Матер. VII Всероссийской научно-технической конференции*. – 2021. – С. 109-112.
22. Миронов Я.К., Миронова П.Д., Румянцев К.Е. Вероятностные характеристики порогового алгоритма обнаружения синхрои импульсов в системе квантового распределения ключа на основе информации со смежной пары временных сегментов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 4 (207). – С. 221-229.
23. Миронов Я.К., Миронова П.Д., Румянцев К.Е. Исследование характеристик алгоритма синхронизации системы квантового распределения ключа на основе сравнения числа отсчетов со смежной пары временных окон с пороговым уровнем // *Сб. докладов II Всероссийской научной конференции (с приглашением зарубежных ученых)*. – 2020. – С. 219-226.
24. Миронова П.Д. Синхронизация станций системы квантового распределения ключа на основе порогового теста для отсчетов со смежной пары временных сегментов // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Матер. VII Всероссийской научно-технической конференции*. – 2021. – С. 107-109.
25. Миронова П.Д. Алгоритм синхронизации станций системы квантового распределения ключа на основе порогового теста для отсчетов со смежной пары временных сегментов с учетом дисперсионных и поляризационных свойств ВОЛС // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Матер. VIII Всероссийской научно-технической конференции*. – 2022. – С. 22-25.
26. Rumyantsev K.E., Linenko P.D., Shakir H.H.-Sh. Evaluation of the Influence of the Dispersion Properties of a Fiber-Optic Line on the Efficiency of an Algorithm for Single-Photon Synchronization of Quantum Key Distribution System // *Conference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2019*. – 2019. – P. 392-395. – DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792769.

REFERENCES

1. Lindsey W.C. Synchronization Systems in Communication and Control. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1972.
2. Stiffler Dzh. Teoriya sinkhronnoy svyazi [Synchronous communication theory]: transl. from engl., ed. by E.M. Gabidulina. Moscow: Svyaz', 1975.
3. Gal'yardi R.M., Karp Sh. Opticheskaya svyaz' [Optical communication]: transl. from engl., ed. by A.G. Sheremet'eva. Moscow: Svyaz', 1978, 424 p.
4. Viterbi A.D., Omura Dzh.K. Printsipy tsifrovoy svyazi i kodirovaniya [Principles of digital communication and coding]: transl. from engl., ed. by K.Sh. Zigangirova. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 536 p.
5. Yilong Geng, Shiyu Liu, and Zi Yin. Exploiting a Natural Network Effect for Scalable, Fine-grained Clock Synchronization, *NSDI'18: Proceedings of the 15th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation*, 2018, pp. 81-94.

6. Govindan Kannan Pravein., Joshi Raj., Chan Mun Choon. Precise Time-synchronization in the Data-Plane Using Programmable Switching ASICs, *Proceedings of the 2019 ACM Symposium on SDN Research, ACM*, 2019, pp. 8-20. DOI: 10.1145/3314148.3314353.
7. Rumyantsev K.E. Sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha: monografiya [Systems of quantum key distribution: monograph]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011, 264 p.
8. Rumyantsev K.E. Sinkhronizatsiya v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha s avtomaticheskoy kompensatsiey polarizatsionnykh iskazheniy [Synchronization in a quantum key distribution system with automatic compensation of polarization distortions], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2017, No. 2, pp. 32-40.
9. Rumyantsev K.E., Plenkin A.P. Sinkhronizatsiya sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha pri ispol'zovanii fotonnykh impul'sov dlya povysheniya zashchishchennosti [Synchronization of the system of quantum key distribution when using photon pulses to increase security], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 8, pp. 81-96.
10. Plenkin A., Rumyantsev K., Rudinsky E. Comparative analysis of single-photon synchronization algorithms in the quantum key distribution system, *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, 2017, pp. 1-5. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110047.
11. Rumyantsev K.E., Rudinsky E.A. Time synchronization method in quantum key distribution system with automatic compensation of polarization distortions, *Proceedings of the 2nd International Conference on Multimedia and Image Processing (ICMIP)*, 2017, pp. 346-349. DOI: 10.1109/ICMIP.2017.68.
12. Mironov Y.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E. Study of the characteristics of the synchronization algorithm for a quantum key distribution system based on comparing the number of samples from an adjacent pair of time windows with a threshold level, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1069, 2021, Paper 012011, pp. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/1069/1/012011.
13. Mironov Y., Mironova P., Rumyantsev K. Characteristics of a two-stage synchronization algorithm in the system of quantum key distribution with dividing a fiber-optic line into sections with decreasing length, *ACM International Conference Proceeding Series*, 2020, Paper No. 3433596, pp. 1-5. DOI: 10.1145/3433174.3433595.
14. Mironov Y.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E. Methodology for calculating the average time of entry into synchronism of stations of the system of quantum key distribution with sequential polling of fiber-optic line sections with decreasing length by the graphic-analytical method, *E3S Web of Conferences*, 2020, Vol. 224, pp. 1-9. DOI: 10.1051/e3sconf/202022401032.
15. Mironov Y.K., Rumyantsev K.E. Single-Photon Algorithm for Synchronizing the System of Quantum Key Distribution with Polling Sections of a Fiber-Optic Line, *Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies*, 2020, pp. 87-97. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4451-4_8.
16. Rumyantsev K.Y., Bamatgireeva K.B., Mironov Y.K. Single Photon Algorithm of Search of a Pulse Radiation Source, *Communications in Computer and Information Science*, 2019, 958, pp. 95-108. DOI: 10.1007/978-981-13-3804-5_8.
17. Kurochkin V.L. i dr. Eksperimental'nye issledovaniya v oblasti kvantovoy kriptografii [Experimental research in the field of quantum cryptography], *Fotonika* [Photonics], 2012, Vol. 5, pp. 54-66.
18. Rumyantsev K.E., Plenkin A.P. Bezopasnost' rezhima sinkhronizatsii sistemy kvantovogo raspredeleniya klyuchey // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 5 (166), pp. 135-153.
19. Mironov Ya.K. Modelirovanie etapa testirovaniya dvukhetapnogo vremennogo algoritma sinkhronizatsii pri nakhozhdении одnofotonного источника излучения в signal'nom uchastke VOLS [Simulation of the testing stage of a two-stage time synchronization algorithm when a single-photon radiation source is in the signal section of the FOCL], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Fundamental and Applied Aspects of Computer Technologies and Information Security: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference], 2022, pp. 19-21.
20. Mironov Y.K., Rumyantsev K.E. Providing the Required Probability of Synchronization Error When Splitting a Fiber-Optic Line into Sections with Decreasing Length in a Quantum Key Distribution System, *Proceedings - 2021 3rd International Conference on System Reliability and Safety Engineering, SRSE 2021*, 2021, pp. 145-149. DOI: 10.1109/SRSE54209.2021.00032.

21. Mironov Ya.K. Sinkhronizatsiya stantsiy sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha s posledovatel'nyim oprosom uchastkov volokonno-opticheskoy linii s ubyvyayushchey dlinoy [Synchronization of stations of the quantum key distribution system with sequential polling of sections of a fiber-optic line with decreasing length], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: Mater. VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Fundamental and applied aspects of computer technology and information security: materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference], 2021, pp. 109-112.
22. Mironov Ya.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E. Veroyatnostnye kharakteristiki porogovogo algoritma obnaruzheniya sinkhroimpul'sov v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove informatsii so smezhnoy pary vremennykh segmentov [Probabilistic Characteristics of a Threshold Sync Detection Algorithm in a Quantum Key Distribution System Based on Information from an Adjacent Pair of Time Segments], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (207), pp. 221-229.
23. Mironov Ya.K., Mironova P.D., Rumyantsev K.E. Issledovanie kharakteristik algoritma sinkhronizatsii sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove sravneniya chisla otschetov so smezhnoy pary vremennykh okon s porogovym urovnem [Investigation of the characteristics of the synchronization algorithm of the quantum key distribution system based on the comparison of the number of samples from an adjacent pair of time windows with a threshold level], *Sb. dokladov II Vse-rossiyskoy nauchnoy konferentsii (s priglasheniem zarubezhnykh uchenykh)* [Collection of reports of the II All-Russian scientific conference (with the invitation of foreign scientists)], 2020, pp. 219-226.
24. Mironova P.D. Sinkhronizatsiya stantsiy sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove porogovogo testa dlya otschetov so smezhnoy pary vremennykh segmentov [Synchronization of stations of the quantum key distribution system based on a threshold test for readings from an adjacent pair of time segments], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: Mater. VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Fundamental and applied aspects of computer technology and information security: materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference], 2021, pp. 107-109.
25. Mironova P.D. Algoritm sinkhronizatsii stantsiy sistemy kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove porogovogo testa dlya otschetov so smezhnoy pary vremennykh segmentov s uchetom dispersionnykh i polarizatsionnykh svoystv VOLS [Synchronization algorithm for stations of a quantum key distribution system based on a threshold test for readings from an adjacent pair of time segments, taking into account the dispersion and polarization properties of FOCL], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: Mater. VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Fundamental and applied aspects of computer technology and information security: materials of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference], 2022, pp. 22-25.
26. Rumyantsev K.E., Linenko P.D., Shakir H.H.-Sh. Evaluation of the Influence of the Dispersion Properties of a Fiber-Optic Line on the Efficiency of an Algorithm for Single-Photon Synchronization of Quantum Key Distribution System, *Conference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2019*, 2019, pp. 392-395. DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792769.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент Л.А. Албогачиева.

Румянцев Константин Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: rke2004@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281827209; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Миронова Полина Демьяновна – e-mail: linenkopdem@gmail.com; тел.: 89081924053; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; ассистент; аспирант.

Rumyantsev Konstantin Evgenievich – Southern Federal University; e-mail: rke2004@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281827209; the department of information security of telecommunication systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Mironova Polina Demyanovna – e-mail: linenkopdem@gmail.com; phone: +79081924053; the department of information security of telecommunication systems; assistant; graduate student.

Е.Е. Полупанова, А.А. Рыбалко**АЛГОРИТМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ГИБРИДИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА**

Задача коммивояжера является задачей комбинаторной оптимизации. В статье приводится постановка данной задачи и предлагается графовая математическая модель, в которой вершины соответствуют городам, а рёбра – это пути между городами, причем предполагается, что граф взвешен. Решение задачи коммивояжера состоит в нахождении гамильтонова цикла минимального веса в полном взвешенном графе. Задача является NP-трудной, поэтому для решения данной задачи используется эвристический подход для получения решения задачи на больших объёмах входных данных. Эвристика заключается в применении для решения задачи коммивояжера гибридации двух алгоритмов: алгоритма имитации отжига и алгоритма ближайшего соседа. Для решения задачи коммивояжера используется последовательная схема гибридации. Основная идея заключается в том, что на стартовом наборе решений запускается метод ближайшего соседа, а затем лучшее решение, полученное на первом этапе, подается на вход алгоритму имитации отжига. В статье подробно освещены построение, блок-схемы гибридного алгоритма, алгоритма имитации отжига и метода ближайшего соседа. Далее в статье приводится описание пользовательского интерфейса приложения, написанного на Typescript. Приложение использует реальную карту местности для решения задачи коммивояжера. В последней части статьи освещается сравнительный анализ эффективности работы алгоритмов: сравнение точности и времени работы разработанного гибридного алгоритма, алгоритма имитации отжига и метода ближайшего соседа на различных входных наборах данных. Удалось установить, что разработанный гибридный алгоритм находится на втором месте по скорости работы и на первом по качеству решения среди реализованных алгоритмов. Кроме того, разработанное решение имеет высокую экономическую и практическую ценность ввиду того, что приложение для решения задачи коммивояжера, а следовательно, приложение для навигации по маршруту может заменить существующие аналоги или же оно может быть использовано в каких-либо узконаправленных областях, а также в логистике.

Задача коммивояжера; гибридный алгоритм; метод ближайшего соседа; алгоритм имитации отжига; веб-приложение; маршруты; навигатор; Typescript; react-leaflet.

E.E. Polupanova, A.A. Rybalko**SEQUENTIAL HYBRIDIZATION ALGORITHM FOR THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM SOLVING**

The traveling salesman problem is a combinatorial optimization problem. The article presents a statement of this problem and proposes a graph mathematical model in which vertices correspond to cities, and edges are paths between cities, and it is assumed that the graph is weighted. The solution of the traveling salesman problem consists in finding the minimum weight Hamiltonian cycle in a complete weighted graph. The problem is NP-hard, so a heuristic approach is used to solve this problem and speed up the solution of the problem on large volumes of input data. The heuristic consists in applying hybridization of two algorithms to solve the traveling salesman problem: the annealing simulation algorithm and the nearest neighbor algorithm. Sequential hybridization scheme is used to solve the traveling salesman problem. The basic idea is that the nearest neighbor method is launched on the initial set of solutions, and then the best solution of the first stage is fed to the annealing simulation algorithm. The article details the construction, flowcharts of the hybrid algorithm, the annealing simulation algorithm, and the nearest neighbor method. The article goes on to describe the user interface of the application written in Typescript. The application uses an area map as a solution to the traveling salesman problem. In the last part of the article, a comparative analysis of the algorithms' performance is highlighted: a comparison of the accuracy and operating time of the developed hybrid algorithm, the annealing

simulation algorithm, and the nearest neighbor method for different input data sets. It was established that the developed hybrid algorithm is in second place in terms of speed and in first place in terms of solution quality among the implemented algorithms. In addition, the developed solution has a high economic and practical value because an application for solving the traveling salesman problem, and therefore an application for route navigation, can replace existing analogues or it can be used in any narrowly focused areas, as well as in logistics.

Traveling salesman problem; hybrid algorithm; nearest neighbor method; annealing simulation algorithm; web application; route; navigator; Typescript; react-leaflet.

Введение. Алгоритмы поисковой оптимизации нужны для решения тех или иных комбинаторных задач с целью получения решения задачи, максимально приближенного к оптимальному, за приемлемое время. Они используются при решении NP-полных проблем, таких как задача коммивояжера [1], задача упаковки ранца и др. Именно поэтому эти алгоритмы всегда были востребованы и сейчас они активно развиваются.

Алгоритмов поисковой оптимизации на сегодняшний день достаточно много и все они подразделяются на множество видов, таких как биоинспирированные, роевые, популяционные, генетические, стохастические и другие [2–4].

В соответствии с классификацией Ванга (X. Wang) выделяют три категории гибридных алгоритмов: вложенные (embedded) алгоритмы, алгоритмы типа препроцессор/постпроцессор (preprocessor/postprocessor), коалгоритмы (co-algorithms) [2].

В типе препроцессор/постпроцессор выделяют два класса методов гибридизации: последовательная и конвейерная.

В данной работе рассматривается гибридный алгоритм, построенный на алгоритме имитации отжига и методе ближайшего соседа, использующий принципы последовательной гибридизации, а также приводятся экспериментальные исследования реализованных алгоритмов.

Постановка задачи. Задача коммивояжера формулируется следующим образом: коммивояжер, выходящий из какого-нибудь города, желает посетить $(n - 1)$ других городов и вернуться к исходному [1], n – число городов.

Предлагается графовая математическая модель, в которой вершины соответствуют городам, а рёбра – это пути между городами. Предполагается, что граф взвешен, т.е. каждому ребру графа соответствует некоторый вес $c > 0$, и между каждой парой вершин существует ребро, т.е. граф полный.

Таким образом, решение задачи коммивояжера – это нахождение гамильтонова цикла минимального веса в полном взвешенном графе.

Данная задача возникает в обширном классе таких приложений, как, например, распознавание траекторий, образов, построение оптимальных схем движения и т.д. [5].

Существуют симметричная и ассиметричная задачи коммивояжера. Симметричная задача предполагает, что граф неориентированный. В ассиметричной задаче необходимо учитывать направление рёбер графа, так как работаем с ориентированным графом. В данной работе рассматривается решение ассиметричной задачи коммивояжера. Виды данной задачи подробно описаны в [6].

Алгоритм полного перебора решений задачи имеет сложность $O(n!)$. При малых n задача решается за приемлемое время, но если, к примеру, $n=100$, то задача будет решаться сотню миллионов лет. Однако, благодаря стохастическим алгоритмам оптимизации задачу можно решить за приемлемое время.

Задача коммивояжера является NP-трудной, то есть не доказано существования алгоритма точного решения задачи за экспоненциальное время. Поэтому на практике, для решения данной задачи, часто применяют эвристические методы [7–15]. Под эвристическими алгоритмами (“эвристиками”) чаще всего понимают

алгоритмы, для которых отсутствует либо неизвестна оценка точности [16]. В то же время порой именно эвристики являются единственным способом получить решение, максимально близкое к оптимальному, за приемлемое время.

Математическая постановка задачи. Математически, данную задачу можно сформулировать следующим образом: дан граф $H = (V, E)$, где V – непустое множество вершин, E – непустое множество рёбер. Каждому ребру (i, j) , где $i, j \in V$, можно сопоставить критерий выгодности маршрута $len_{ij} \geq 0$, который может быть расстоянием между городами, временем или стоимостью поездки.

Гамильтоновым циклом называется маршрут, включающий ровно по одному разу каждую вершину графа.

Решением задачи будет кратчайший гамильтонов цикл в графе. Для оценки качества решения используется целевая функция (1):

$$F_{len} = \left| \sum_{i=1}^{n-1} (m_{\phi(i)\phi(i+1)}) + m_{\phi(n-1)\phi(0)} \right|, \quad (1)$$

где F_{len} – целевая функция всего решения;

$M = (m_{ij})$ – это матрица размера $n \times n$, где (m_{ij}) – вес ребра (i, j) .

$\phi = (\phi_i)$ – это матрица размера n , где (ϕ_i) – индекс пункта в маршруте ϕ .

Целью задачи коммивояжера является минимизация представленной выше целевой функции.

Алгоритм имитации отжига. Алгоритм имитации отжига был предложен Н. Метрополисом в 1953 г. За основу работы был взят принцип процесса отжига металлов, который применяют в металлургии. Алгоритм относится к вероятностным методам решения. Метод отжига служит для поиска глобального минимума некоторой функции [17]. Ключевым моментом в таких подходах является случайный выбор одного из нескольких возможных решений вместо анализа каждого [18]. Алгоритм относят к методам глобального поиска.

Классический алгоритм имитации отжига предполагает следующие шаги:

а) задать начальное решение s и начальную температуру $T = T_{max}$, где T_{max} – максимальная температура;

б) пока $T > 0$, повторить N раз следующие действия:

1) выбрать новое решение s' из окрестности решений s ;

2) рассчитать изменение целевой функции (длины маршрута) $\Delta E = E(s') - E(s)$;

3) если $\Delta E \leq 0$, принять $s = s'$; иначе: посчитать $P_k = \exp(-\Delta E/T)$, сгенерировать число P из интервала $[0, 1]$ и если $P_k > P$, то принять новое решение $s = s'$; иначе проигнорировать его;

в) уменьшить температуру T , приняв $T = \alpha T$, где α – коэффициент понижения температуры, выбираемый из интервала $(0, 1)$ и если достигнут критерий останова, выйти из цикла, иначе перейти к шагу б).

Из формулы вероятности принятия нового решения $\exp(-\Delta E/T)$ видим, что эта вероятность зависит от текущей температуры и от разницы между целевыми функциями текущего и нового решений, и чем выше температура и меньше изменение целевой функции, тем больше вероятность того, что новое решение будет принято за текущее. Постепенно температура понижается и вероятность принятия нового решения существенно уменьшается.

Алгоритм имитации отжига не отбрасывает новое решение, которое хуже текущего, а принимает его с некоторой вероятностью. Именно это свойство алгоритма помогает ему выбираться из локальных оптимумов и достигать глобальных оптимумов [19].

Блок-схема алгоритма имитации отжига представлена на рис. 1.

Рассмотрим подробно шаги алгоритма имитации отжига:

а) задать максимальную температуру, начальный путь, количество итераций общего цикла, в котором понижается температура – N , и количество итераций отжига при определённой температуре – L . Берём $T = T_{\max}$.

б) пока счётчик итераций меньше или равен N выполнить L заданных итераций отжига.

1) С помощью псевдослучайных чисел $n1$ и $n2$ инвертируем путь в текущем пути от $n1$ до $n2$ и получаем новый путь – кандидат.

2) Считаем длину нового пути.

3) Если длина нового пути меньше или равна длине текущего, то принять новый путь в качестве текущего. Иначе, сгенерировать псевдослучайное число R из промежутка $[0, 1]$ и принять новое решение с вероятностью $P_k = \exp(-\Delta E/T)$, т.е. если $P_k > R$, то принимаем решение, иначе пропускаем его.

в) уменьшаем температуру в соответствии с установленным законом.

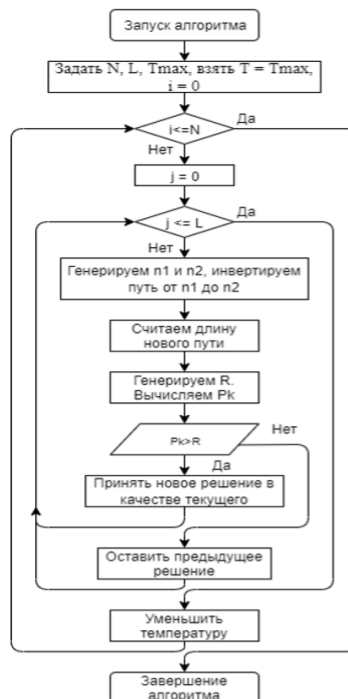


Рис. 1. Блок-схема алгоритма имитации отжига

Метод ближайшего соседа. Метод ближайшего соседа является жадным алгоритмом, т. е. он не всегда даёт оптимальные решения. Однако из-за его простоты, этот алгоритм отличается высокой скоростью работы. Алгоритм сильно зависит от топологии задачи. Например, если вершины графа выстроятся в круг, то тогда алгоритм найдет точное решение задачи.

Классический метод ближайшего соседа предполагает следующие шаги:

а) из всех не посещённых вершин выбрать одну вершину V и пометить её, как посещённую;

б) выбрать ближайшую к V вершину U ;

в) выбрать вершину U , как текущую и отметить её, как посещённую;

г) если посещены все вершины, то завершить алгоритм, иначе вернуться к шагу б).

Изначальный алгоритм был немного улучшен тем, что сравниваются пути от каждой вершины графа.

На рис. 2 представлена блок-схема метода ближайшего соседа.

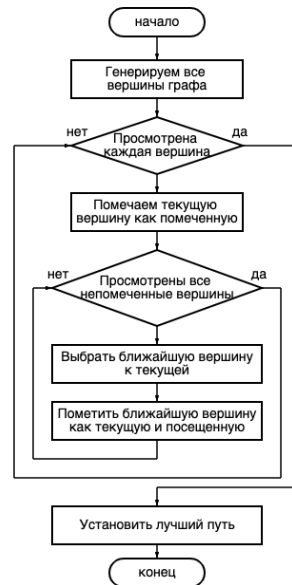


Рис. 2. Блок-схема метода ближайшего соседа

Гибридный алгоритм. В данной работе был разработан последовательный гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера: сначала запускается метод ближайшего соседа, а затем на найденном решении запускается алгоритм имитации отжига, улучшая тем самым полученный результат.

На рис. 3 представлена блок-схема гибридного алгоритма. В блоке алгоритма имитации отжига при запуске алгоритма начальным решением выступает лучшее решение метода ближайшего соседа.

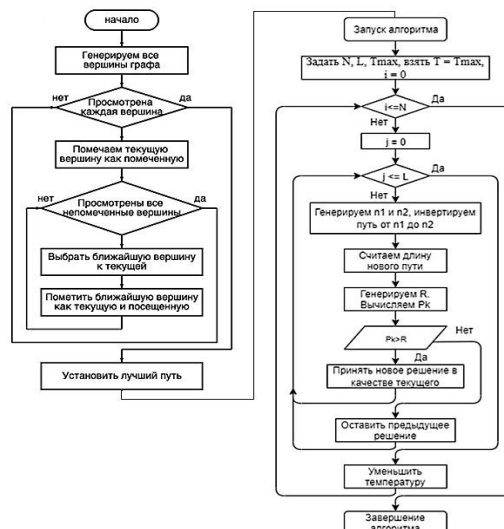


Рис. 3. Блок-схема гибридного алгоритма

Приложение. Для решения задачи коммивояжера и исследования реализованных алгоритмов было разработано веб-приложение. В качестве языка разработки был выбран Typescript – этот язык полностью идентичен языку Javascript, но поддерживает типизацию, благодаря чему программы писать намного проще и удобнее.

В качестве технологии отображения карты была выбрана библиотека react-leaflet, которая предоставляет широкие возможности для работы с картой. Библиотека работает в связке с библиотекой React.js – библиотекой для построения интерфейсов [20].

Основная идея приложения – пользователь отмечает желаемые точки на карте, тем самым создавая пункты маршрута; по нажатию кнопки расчёта запускается гибридный алгоритм, который определяет кратчайший путь передвижения на автомобиле. Алгоритм работает с матрицей продолжительности (времени), в которой элемент определяется продолжительностью (в секундах) прохождения пути от точки i к точке j .

Расчёт матрицы продолжительности происходит на удаленном сервере при помощи библиотеки OSRM – (Open Source Routing Machine) с использованием мультиуровневого алгоритма Дейкстры. В расчёте матрицы учитывается дистанция, приоритетность дорог, правила дорожного движения, и не учитываются какие-либо динамические факторы – текущие погодные условия, пробки и т.д.

Все точки маршрута хранятся в состоянии `points`, каждая точка (объект класса `LatLng`) хранит широту, долготу и функцию расчёта дистанции от неё самой, до какой-либо другой точки.

Этапы работы построения маршрута:

- 1) отсылаем запрос на сервер OSRM с массивом `points`;
- 2) получаем ответ от сервера – вычисленную матрицу продолжительности на основе массива `points`;
- 3) запуск гибридного алгоритма на основе матрицы продолжительности;
- 4) по сети от сервера OSRM получаем информацию о старом и новом маршрутах;
- 5) с помощью метода `createRoute` рисуем оптимальный маршрут на карте;
- 6) отображаем информацию о старом и новом маршрутах.

На рис. 4 представлен маршрут, построенный для 100 точек при помощи гибридного алгоритма, а на рис. 5 – модальное окно с информацией о старом и новом маршрутах.

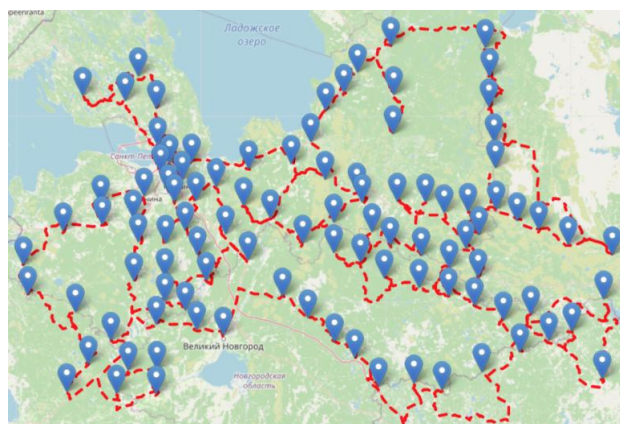


Рис. 4. Маршрут для 100 точек, построенный при помощи гибридного алгоритма

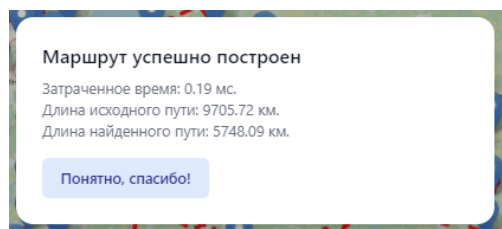


Рис. 5. Модальное окно с информацией о старом и новом маршрутах

Библиотека leaflet-routing-machine при построении маршрута предоставляет список всех событий маршрута, которым он должен следовать.

На рис. 6 представлен фрагмент списка инструкций маршрута для 100 вершин. Эти инструкции на английском языке имитируют реальный навигатор, но без озвучивания и отслеживания местоположения пользователя в реальном времени.

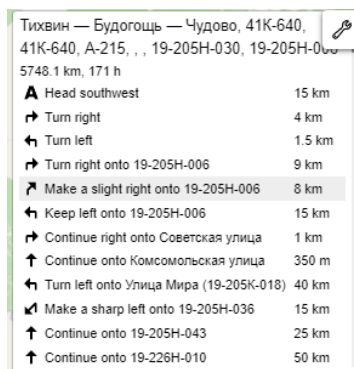


Рис. 6. Фрагмент списка событий маршрута для 100 вершин

Анализ эффективности реализованных алгоритмов. На рис. 7 представлен график зависимости времени работы от числа вершин для алгоритма имитации отжига, метода ближайшего соседа и гибридного алгоритма. Из графика видно, что гибридный алгоритм по скорости выполнения уступает методу ближайшего соседа, но обгоняет алгоритм имитации отжига.

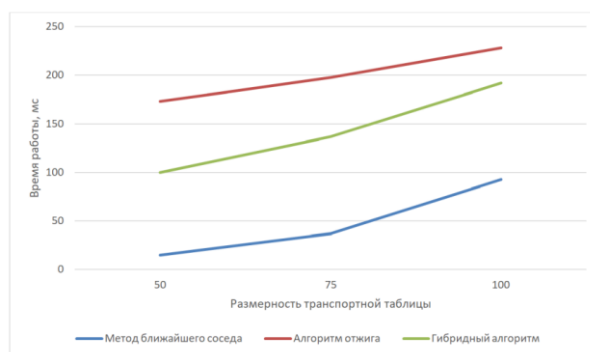


Рис. 7. Зависимость времени работы от числа вершин для алгоритма имитации отжига, алгоритма ближайшего соседа и гибридного алгоритма

Сложность алгоритма имитации отжига – $O(n)$, метода ближайшего соседа – $O(n^2)$, гибридного алгоритма – $O(n^2)$, где n – число вершин.

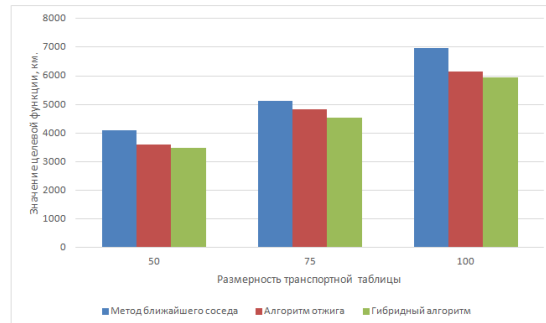


Рис. 8. Фрагмент списка событий маршрута для 100 вершин

На рис. 8 представлена диаграмма зависимости значения целевой функции от числа вершин. По диаграмме видно, что гибридный алгоритм опережает по качеству решения алгоритм имитации отжига и алгоритм ближайшего соседа.

Заключение. Задача коммивояжера является NP-трудной, поэтому для её решения в работе был предложен эвристический подход для получения решения на больших объёмах входных данных. Суть эвристики заключалась в применении для решения задачи коммивояжера гибридизации двух алгоритмов: алгоритма ближайшего соседа и алгоритма имитации отжига.

Алгоритм имитации отжига отличается от всех эвристических алгоритмов тем, что он допускает в процессе поиска шаги, приводящие к увеличению целевой функции. Метод ближайшего соседа, в свою очередь, относится к числу жадных алгоритмов, т.е. на каждом шаге выбирает наилучшее решение. Гибридизация алгоритмов заключалась в последовательном применении сначала метода ближайшего соседа, а затем на найденном решении алгоритма имитации отжига для улучшения полученного результата.

Для демонстрации работы гибридного алгоритма реализовано приложение для расчёта оптимального маршрута и решения задачи коммивояжера при помощи алгоритмов оптимизации на реальной карте местности с использованием библиотеки react-leaflet.

В результате экспериментальных исследований удалось установить, что гибридный алгоритм опережает по качеству алгоритм имитации отжига, но уступает методу ближайшего соседа по скорости решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мудров В.И. Задача о коммивояжёре. – М.: Знание, 1969. – 64 с.
2. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
3. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2006. – 368 с.
4. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. – М.: Изд-во: ДМК Пресс, 2020. – 1002 с.
5. Борознов В.О. Исследование решения задачи коммивояжера // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 2. – С. 147-151.
6. Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / под ред. А.В. Колесникова. – М.: ИПИ РАН, 2011. – 295 с.

7. *Morán-Mirabal L.F., González-Velarde J.L., Resende M.G.C.* Randomized heuristics for the family traveling salesperson problem // *International Transactions in Operational Research*. – 2014. – Vol. 21, Issue 1. – P. 41-57. – DOI: 10.1111/itor.12026.
8. *Nagata Y.* High-Order Entropy-Based Population Diversity Measures in the Traveling Salesman Problem // *Evolutionary Computation*. – 2020. – Vol. 28, Issue 4. – P. 595-619. – DOI: 10.1162/evco_a_00268.
9. *Pop P., Matei O., Pinte C.* A two-level diploid genetic based algorithm for solving the family traveling salesman problem // *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018. – P. 340-346. – DOI: 10.1145/3205455.3205545.
10. *Bernardino R., Paías A.* Solving the family traveling salesman problem // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – Vol. 267, Issue 2. – P. 453-466. – DOI: 10.1016/j.ejor.2017.11.063.
11. *Cacchiani V., Muritiba A.E.F., Negreiros M., Toth P.* A multistart heuristic for the equality generalized traveling salesman problem // *Networks*. – 2011. – Vol. 57, Issue 3. – P. 231-239. – DOI: 10.1002/net.20421.
12. *Garn W.* Balanced dynamic multiple travelling salesmen: Algorithms and continuous approximations // *Computers & Operations Research*. – 2021. – Vol. 136. – Article 105509. – DOI: 10.1016/j.cor.2021.105509.
13. *Рыбалко А.А., Полупанова Е.Е.* Полиалгоритм решения задачи коммивояжера // *Современные проблемы математики, информатики и моделирования: Матер. III Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных; Краснодар: Краснодарский ЦНТИ - филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России, 2021. – Т. 1. – С. 208-213.*
14. *Полупанова Е.Е., Поляков А.С.* Популяционный алгоритм решения задачи коммивояжера // *Современные информационные технологии и ИТ-образование; Москва: Фонд содействия развитию интернет-медиа, ИТ-образования, человеческого потенциала Лига интернет-медиа, 2021. – Т. 17, № 2. – С. 324-333.*
15. *Курейчик В.М., Гогохия Л.Р.* Решения задачи коммивояжера с применением генетического оператора старения // *Тр. международного научно-технического конгресса "интеллектуальные системы и информационные технологии - 2020" ("ИС & ИТ-2020", "is&it'20")*; научное издание: в 2-х т. – 2020. – С. 7-16.
16. *Сергиенко И.В., Гуляницкий Л.Ф., Сиренко С.И.* Классификация прикладных методов комбинаторной оптимизации // *Кибернетика и системный анализ*. – 2009. – № 5. – С. 71-83.
17. *Метод отжига*. – URL: <http://www.math.spbu.ru/user/gran/sb1/lopatin.pdf> (дата обращения: 10.05.2023).
18. *Курсанов М.Н.* Графы в Maple. Задачи, алгоритмы, программы. – М.: Изд-во Физматлит, 2007. – 167 с.
19. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 343 с.
20. *React.js*. – URL: <https://ru.reactjs.org/> (дата обращения: 07.05.2023).

REFERENCES

1. *Mudrov V.I.* Zadacha o kommivoyazhere [The problem of a traveling salesman]. Moscow: Znanie, 1969, 64 p.
2. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2014, 446 p.
3. *Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M.* Geneticheskie algoritmy: ucheb. posobie [Genetic algorithms: training manual]. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit, 2006, 368 p.
4. *Saymon D.* Algoritmy evolyutsionnoy optimizatsii [Evolutionary optimization algorithms]. Moscow: Izd-vo: DMK Press, 2020, 1002 p.
5. *Boroznov V.O.* Issledovanie resheniya zadachi kommivoyazhera [Investigation of the solution of the traveling salesman problem], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Sciences and Informatics], 2009, No. 2, pp. 147-151.
6. *Kolesnikov A.V., Kirikov I.A., Listopad S.V.* Reshenie slozhnykh zadach kommivoyazhera metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem [Listopad Solving complex problems of a traveling salesman by methods of functional hybrid intelligent systems], ed. by A.V. Kolesnikova. Moscow: IPI RAN, 2011, 295 p.

7. Morán-Mirabal L.F., González-Velarde J.L., Resende M.G.C. Randomized heuristics for the family traveling salesperson problem, *International Transactions in Operational Research*, 2014, Vol. 21, Issue 1, pp. 41-57. DOI: 10.1111/itor.12026.
8. Nagata Y. High-Order Entropy-Based Population Diversity Measures in the Traveling Salesman Problem, *Evolutionary Computation*, 2020, Vol. 28, Issue 4, pp. 595-619. DOI: 10.1162/evco_a_00268.
9. Pop P., Matei O., Pinte C. A two-level diploid genetic based algorithm for solving the family traveling salesman problem, *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018, pp. 340-346. DOI: 10.1145/3205455.3205545.
10. Bernardino R., Paías A. Solving the family traveling salesman problem, *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 267, Issue 2, pp. 453-466. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.11.063.
11. Cacchiani V., Muritiba A.E.F., Negreiros M., Toth P. A multistart heuristic for the equality generalized traveling salesman problem, *Networks*, 2011, Vol. 57, Issue 3, pp. 231-239. DOI: 10.1002/net.20421.
12. Garn W. Balanced dynamic multiple travelling salesmen: Algorithms and continuous approximations, *Computers & Operations Research*, 2021, Vol. 136, Article 105509. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105509.
13. Rybalko A.A., Polupanova E.E. Polialgoritm resheniya zadachi kommvoyazhera [Polyalgorithm of solving the traveling salesman problem], *Sovremennye problemy matematiki, informatiki i modelirovaniya: Mater. III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh; Krasnodar: Krasnodarskiy TSNTI - filial FGBU "REA" Minenergo Rossii, 2021* [Modern problems of mathematics, computer science and modeling – materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Krasnodar, Krasnodar Central Research Institute - Branch of the Federal State Budgetary Institution "REA" of the Ministry of Energy of Russia, 2021], Vol. 1, pp. 208-213.
14. Polupanova E.E., Polyakov A.S. Populyatsionnyy algoritm resheniya zadachi kommvoyazhera [Population algorithm for solving the traveling salesman problem], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie; Moskva: Fond sodeystviya razvitiyu internet-media, IT-obrazovaniya, chelovecheskogo potentsiala Liga internet-media, 2021* [Modern Information Technologies and IT Education; Moscow, Foundation for the Promotion of Internet Media, IT Education, Human Potential, Internet Media League, 2021], Vol. 17, No. 2, pp. 324-333.
15. Kureychik V.M., Gogokhiya L.R. Resheniya zadachi kommvoyazhera s primeneniem geneticheskogo operatora stareniya [Goghia Solving the traveling salesman problem using the genetic operator of aging], *Tr. mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa "intellektual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii - 2020" ("IS & IT-2020", "is&it'20")*: nauchnoe izdanie [Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies - 2020" ("IS & IT-2020", "is&it'20"). scientific publication]: in 2nd vol., 2020, pp. 7-16.
16. Sergienko I.V., Gulyanitskiy L.F., Sirenko S.I. Klassifikatsiya prikladnykh metodov kombinatornoy optimizatsii [Classification of applied methods of combinatorial optimization], *Kibernetika i sistemnyy analiz* [Cybernetics and system analysis], 2009, No. 5, pp. 71-83.
17. Metod otzhiga [Annealing method]. Available at: <http://www.math.spbu.ru/user/gran/sb1/lopatin.pdf> (accessed 10 May 2023).
18. Kirsanov M.N. Grafy v Maple. Zadachi, algoritmy, programmy [Graphs in Maple. Tasks, algorithms, programs]. Moscow: Izd-vo Fizmatlit, 2007, 167 p.
19. Osovskiy S. Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii [Neural networks for information processing]. Moscow: Finansy i statistika, 2002, 343 p.
20. React.js. Available at: <https://ru.reactjs.org/> (accessed 07 May 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Марков.

Полупанова Елена Евгеньевна – Кубанский государственный университет; e-mail: jjienka@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79284013301; кафедра вычислительных технологий; к.т.н.; доцент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0364-1132>.

Рыбалко Александр Андреевич – e-mail: alexmobilepost@gmail.ru; тел.: +79282563456, кафедра вычислительных технологий; магистрант.

Polupanova Elena Evgenievna – Kuban State University; e-mail: jienka@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79284013301; the department of computational technologies; cand. of eng. sc.; associate professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0364-1132>.

Rybalko Alexandr Andreevich – e-mail: alexmobilepost@gmail.ru; phone: +79282563456, the department of computational technologies; master's degree student.

УДК 004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-118-125

Е.С. Подоплелова

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ РАНЖИРОВАНИЯ

Данная работа посвящена отбору и сравнению популярных традиционных методов многокритериального принятия решений. В статье представляется обзор существующих работ последних лет на тему их сравнения, выделены основные критерии, а также наиболее значимые результаты. Далее, был рассмотрен пример реализации СППР (системы поддержки принятия решений) по рекомендации такого метода пользователю, который включает описание не только основных методов, но и их модификаций, выделяя исчерпывающую таксономию методов многокритериального анализа в целом. Для отбора методов в этой статье были использованы международные базы научных публикаций: Science Direct, Google Scholar и IEEE Xplore. Были произведены определенные настройки поиска для получения работ, соответствующих запросу. На следующем этапе описывается задача ранжирования альтернатив для демонстрации результатов применения выбранных методов. В качестве метода распределения весов критериев использовался метод анализа иерархий (МАИ). Результаты вычислений представлены в таблицах и графически. Метрикой оценки было принято считать устойчивость метода к количеству альтернатив и критериев, а также чувствительность к весам критериев. На текущем шаге исследования были отобраны следующие методы: TOPSIS, WASPAS, VIKOR, PROMETHEE и ELECTRE. В результате исследования были определены оптимальные методы (по соотношению вычислительной сложности к устойчивости) для их дальнейшего использования в разработке СППР, метод ELECTRE было принято использовать как дополнительный инструмент при большом количестве альтернатив для отсеивания наименее привлекательных. PROMETHEE показал высокую чувствительность к изменению весов и сложности вычислений, поэтому был исключен из дальнейших этапов разработки. VIKOR и TOPSIS показали наилучшую устойчивость при простоте вычислений.

Методы многокритериального принятия решений; система поддержки принятия решений; TOPSIS; VIKOR; Метод анализа иерархий; ELECTRE, PROMETHEE; ранжирование альтернатив.

E.S. Podoplelova

SELECTION OF MULTI-CRITERIA ANALYSIS METHODS ON THE EXAMPLE OF THE PROBLEM OF RANKING

This work is devoted to the selection and comparison of popular traditional methods of multi-criteria decision making. The article presents an overview of the existing works of recent years on the topic of their comparison, highlights the main criteria, as well as the most significant results. Further, an example of the implementation of a DSS (decision support system) was considered on the recommendation of such a method to the user, which includes a description of not only the main methods, but also their modifications, highlighting an exhaustive taxonomy of multi-criteria analysis methods in general. For the selection of methods in this article, international databases of scientific publications were used: Science Direct, Google Scholar and IEEE Xplore. Certain search settings have been made to retrieve jobs that match the query. The next step de-

scribes the task of ranking alternatives to demonstrate the results of applying the selected methods. As a method for distributing the weights of the criteria, the method of analysis of hierarchies (AHP) was used. The calculation results are presented in tables and graphically. The evaluation metric was considered to be the stability of the method to the number of alternatives and criteria, as well as sensitivity to the weights of the criteria. At the current stage of the study, the following methods were selected: TOPSIS, WASPAS, VIKOR, PROMETHEE and ELECTRE. As a result of the study, optimal methods were determined (in terms of the ratio of computational complexity to stability) for their further use in the development of DSS, the ELECTRE method was used as an additional tool with a large number of alternatives to screen out the least attractive ones. PROMETHEE showed high sensitivity to changes in weights and complexity of calculations, therefore it was excluded from further development stages. VIKOR and TOPSIS showed the best stability with the simplicity of calculations.

Methods of multi-criteria decision making; decision support system; TOPSIS; VIKOR; Hierarchy analysis method; ELECTRE; PROMETHEE; ranking of alternatives.

Введение. Принятие решений является неотъемлемой частью как естественного, так и искусственного интеллекта. Вопрос о том, что именно считать искусственным интеллектом стоит остро до сих пор. Однако, в любом случае невозможно представить это понятие без процесса принятия решений. На каждом этапе анализа должно приниматься какое-либо решение. Например, в теории игр это решение о следующем шаге, в компьютерном зрении нужно принять решение и ответить на вопрос об изображении на картинке. В рамках сложных экономических процессов от принятия верного решения или выбора наилучшей альтернативы зависит дальнейшее развитие. В реальной жизни принятие решений всегда осуществляется в динамической, быстроизменяющейся среде, включающей множество факторов. Для этого были разработаны методы многокритериального принятия решений, которые используются, чаще всего, в рамках задач выбора, сортировки или ранжирования альтернатив, имеющихся у ЛПР.

Для начала, предлагается рассмотреть работы авторов, связанные с тематикой данного исследования. В работах [1, 2] представлена разработка таксономии для СППР по рекомендации метода MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) для ЛПР. Авторы представили новую методологию выбора методов анализа решений по множеству критериев (MCDA). Он реализован в программном обеспечении для выбора метода анализа решений по множеству критериев (MCDA-MSS), системе поддержки принятия решений, которая помогает лицу, принимающему решения, выбрать наиболее подходящий метод MCDM для использования для данной проблемы принятия решений (DMP). Система предоставляет рекомендации по управлению принятием решений и выбору из коллекции из более чем 200 методов MCDA. Они оцениваются в соответствии с разработанной в работе [1] таксономией, включающей 24 основных критерия.

Отбор методов MCDM. Отбор методов и их количества обусловлен анализом литературы, а также количеством публикаций по данным методам в период с 2018 по 2023 годы. Для подсчета я взяла три источника: Science Direct [3], Google Scholar [4], IEEE Xplore [5]. Результаты приведены на графике. Для удобства результаты Google Scholar на графике (уменьшены в 10 раз, т.к. мы сравниваем не количество результатов в источниках, а популярность метода относительно других. В качестве параметров отбора в Science Direct были подсчитаны только исследовательские статьи, не включающие обзор (Review). В остальных случаях параметры ограничены только годом публикации.

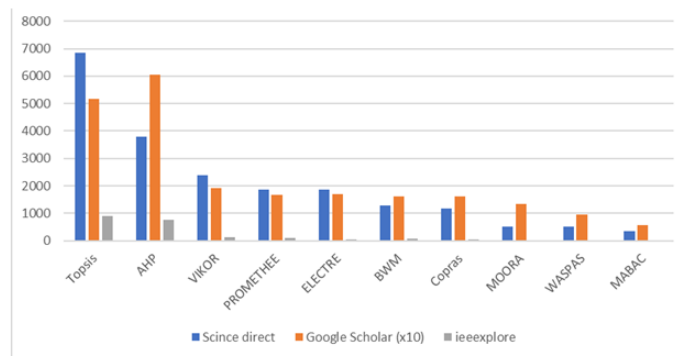


Рис. 1. Результаты запроса

Как можно заметить из графика, явно выделяются TOPSIS [6, 7] and AHP [8], следом идут VIKOR [9], PROMETHEE [10–12] (без разграничений по версиям), ELECTRE [13], BWM [14] and COPRAS [15] имеют практически одинаковый результат, MOORA [16], WASPAS [17] and MABAC [18] имеют самый низкий рейтинг. Обзору и сравнению этих методов посвящены работы [19–21]. В рамках данной статьи было проведено сравнение нескольких методов из вышеописанных.

Описание задачи. Задача ранжирования заключалась в выборе автомобиля по нескольким критериям. Список альтернатив представлен как A1, A2, A3, A4, A5, A6. В качестве критериев определены:

C1 – цена авто, C2 – количество лошадиных сил, C3 – состояние кузова по 5-балльной шкале, C4 – пробег, C5 – наличие кондиционера, C6 – обивка салона (1 – кожа, 0 – велюр).

Также, на каждом этапе добавления критериев пересчитывались их веса. В табл. 1 представлен пример матрицы решений для 3 альтернатив и 4 критериев. C1 и C4 – минимизируются.

Таблица 1

Пример исходной задачи 3х альтернатив по 4-м критериям

	-	+	+	-
	C1	C2	C3	C4
A1	15000	118	5	90000
A2	25000	180	4	150000
A3	19000	200	3	185000

Результаты на всех примерах представлена в табл. 2-5.

Таблица 2

Результаты 3-х альтернатив по 4-м критериям

	TOPSIS		ELECTRE	VIKOR		PROMETHE		WASPAS	
	Score	Rank		index (Q)	Rank	Phi	Rank	Q(k=1)	Rank
A1	0.79	1	1	0	1	0.6337	1	0,93172	1
A2	0.26	3	3	1	3	-0.465	3	0,66477	3
A3	0.43	2	2	0,5478	2	-0.168	2	0,7111	2

Первый эксперимент показал одинаковый результат всеми методами.

Таблица 3

Результаты 5-ти альтернатив по 5-ти критериям

5x5									
	TOPSIS		ELECTRE	VIKOR		PROMETHEE		WASPAS	
	Score	Rank		index (Q)	Rank	Phi	Rank	Q	Rank
A1	0.41	5	-	0,2083	2	0,1327	2	0,2862	5
A2	0.53	3	2	0,9709	5	-0,3571	5	0,6589	3
A3	0.64	1	1	0,0559	1	0,0561	3	0,7000	2
A4	0.47	4	-	0,7083	4	0,1888	1	0,3248	4
A5	0.58	2	1	0,4860	3	-0,0204	4	0,7015	1

В табл. 3 были рассмотрены 5 критериев и 5 альтернатив. В результате TOPSIS and WASPAS одинаковый ранги присвоили A1, A2, A4, определив наихудшей альтернативой A1. VIKOR and PROMETHEE наихудшими определили A2, A1 присвоен ранг 2, тогда как в других методах она выбрана наихудшей. ELECTRE при таком наборе отбросил A1 и A4 как наименее привлекательные, а остальные сравнил, приравняв между собой A3 и A3 как наилучшие.

В табл. 4 представлен результат ранжирования 3-х альтернатив по 6 критериям. VIKOR and PROMETHEE дали одинаковый результат, ELECTRE исключил A1, остальные полностью отличаются между собой.

Таблица 4

Результаты 3-х альтернатив по 6-м критериям

3x6									
	TOPSIS		ELECTRE	VIKOR		PROMETHEE		WASPAS	
	Score	Rank		index (Q)	Rank	Phi	Rank	Q	Rank
A1	0,4	1	-	0,37	2	0,11	2	0,3422	3
A2	0,62	2	2	1	3	-0,235	3	0,7741	1
A3	0,75	3	1	0	1	0,125	1	0,4020	2

Таблица 5

Результаты 6-ти альтернатив по 3-м критериям

6x3									
	TOPSIS		ELECTRE	VIKOR		PROMETHEE		WASPAS	
	Score	Rank		index (Q)	Rank	Phi	Rank	Q	Rank
A1	0,58	2	2	0,7277	4	0,16	2	0,7212	3
A2	0,4	6	5	1	6	-0,36	6	0,6584	6
A3	0,49	4	3	0,3032	1	-0,04	3	0,6829	5
A4	0,58	2	4	0,7860	5	-0,08	4	0,7451	2
A5	0,46	5	3	0,6893	3	-0,08	4	0,6886	4
A6	0,6	1	1	0,3274	2	0,4	1	0,7898	1

В табл. 5 рассмотрены 6 альтернатив по 3 критериям. Здесь результаты получились более согласованными. Все, кроме VIKOR определили лучшей альтернативу A6, он присвоил ей ранг 2. Наихудшей оказалась единогласно альтернатива A2. TOPSIS присвоил одинаковые ранги A1 и A4. Для более наглядного представления были составлены графики для последних трех таблиц, т.к. первый эксперимент дал одинаковые результаты, представленные на графиках (рис. 3-6.)

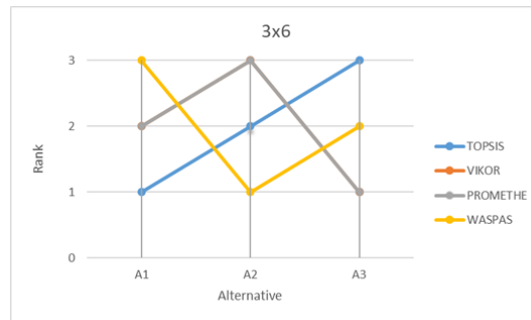


Рис. 2. График матрицы 3х6

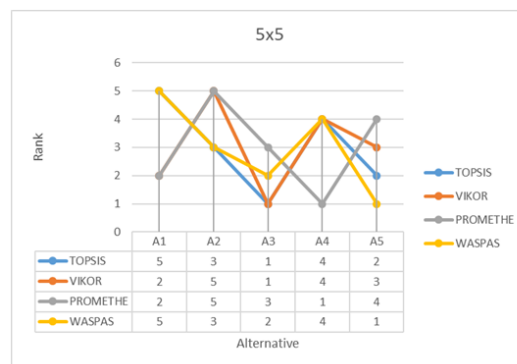


Рис. 3. График матрицы 5х5

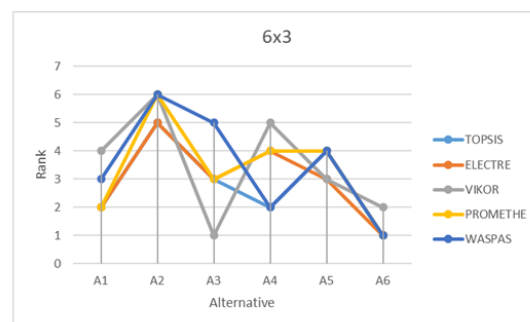


Рис. 4. График матрицы 6х3

Первый график показывает абсолютно разные результаты. Второй показывает больше схожести, например, A4 присвоен ранг 4 всеми методами, кроме PROMETHEE.

На результаты существенно повлияло следующее:

- ♦ распределение весов критериев;
- ♦ соотношение количества альтернатив и критериев.

Распределение весов. Для распределения весов критериев предлагается использовать метод МАИ(метод анализа иерархий). Это обосновано его невысокой вычислительной сложностью в соотношении с качественным результатом. Также, сравнение критериев относительно друг друга упростит их ранжирование для ЛПР. Для вышеописанных экспериментов веса были распределены в табл. 6.

Таблица 6

Распределение весов критериев для эксперимента

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
3x4	0,47	0,16	0,1	0,28	-	-
5x5	0,4	0,1	0,06	0,16	0,26	-
3x6	0,38	0,16	0,1	0,07	0,25	0,04
6x3	0.35	0.35	0.3	-	-	-

Оценка результатов. Помимо вышеописанного сравнения, я решила оценить методы с точки зрения чувствительности результатов к изменению весов. Ввиду небольшого набора альтернатив и критериев были подвергнуты изменениям только матрицы 5x5 и 6x3. Вместо исходных весов, рассчитанных МАИ из таблицы 6, были подставлены равные веса: в первом варианте по $w = 0,33$ (3 критерия), во втором по $w = 0,2$ (5 критериев). В табл. 7 представлены результаты изменения порядка ранжирования при равных весах от наиболее привлекательной к наименее.

Таблица 7

Анализ чувствительности

	TOPSIS		VIKOR		WASPAS $l=0,6$		PROMETHEE	
	Исход-ные	Равные	Исходные	Равные	Исходные	Равные	Исходные	Равные
6x3	641352	146532	365142	365142	613452	614352	513452	635214
5x5	35241	52314	31542	51234	53241	51234	41352	15432

Стоит отметить, что в первом эксперименте всего 3 критерия на 6 альтернатив, потому приравнивание весов между собой было несущественным – $\Delta w_{\max} = 0.05$. При этом, результат остался тем же только при расчете методом VIKOR. Остальные совпадения в рангах выделены цветом. Если рассмотреть по тройкам, то TOPSIS поменял местами альтернативы в их рамках, то есть первые и последние тройки определены так же. WASPAS также, практически не изменен, только 3 и 4 альтернативы поменялись местами.

Изменение весов на 5 критериях показало значительный отклик. TOPSIS, как и в первом случае, изменил первую тройку и последние две альтернативы местами, VIKOR поставил 5ю альтернативу с 3его на 1е место, а наихудшей определил 4ю. WASPAS показал наименьшие колебания, однако 1 альтернатива из наихудшей стала второй по привлекательности. PROMETHEE не изменил наихудшую альтернативу.

Заключение. В этой статье я рассмотрела методы принятия решений многокритериальных задач: TOPSIS, WASPAS, VIKOR, PROMETHEE, ELECTRE. Подробно был рассмотрен отбор и сравнение методов MCDM на экспериментах с разным количеством альтернатив и критериев. Также, для более глубокого анализа методов они были протестированы на устойчивость к изменению весов. В итоге были сделаны следующие выводы:

- а) на результат ранжирования существенно влияет распределение веса критериев;
- б) метод ELECTRE целесообразно использовать в случае, когда имеется большое количество альтернатив, чтобы отсеять неконкурентоспособные. Для ранжирования оставшихся нужно применять дополнительные методы MCDA;
- в) при большом количестве критериев и маленьком количестве альтернатив результат по разным методам абсолютно несогласован;

Анализ чувствительности позволил сделать итоговый вывод: использование метода МАИ для распределения весов позволяет получить более точное ранжирование с учетом предпочтений ЛПР, PROMETHEE и ELECTRE будет исключен из дальнейших исследований по нескольким причинам: сложность вычислений несопоставима с результатами, а ELECTRE будет использован только в случае большого количества альтернатив, на меньших его результаты неудовлетворительны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cinelli M., Kadziński M., Miebs G., Gonzalez M., Słowiński R. Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system, *European Journal of Operational Research*, 2022, 302, pp. 633-651. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.01.011> 8 2 (accessed 15 April 2023).
2. Cinelli M., Kadziński M., Gonzalez M., Słowiński R. How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy, *Omega*, 2020, 96, 102261. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261> (accessed 17 April 2023).
3. Science Direct. Available at: <https://www.sciencedirect.com/> (accessed 17 April 2023).
4. Google Scholar. Available at: <https://scholar.google.com/> (accessed 17 April 2023).
5. IEEE Xplore. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (accessed 17 April 2023).
6. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York: Springer-Verlag, 1981.
7. Yoon K. A reconciliation among discrete compromise situations, *Journal of the Operational Research Society*, 1987, 38 (3), pp. 277-286.
8. Forman Ernest H., Saul I. Gass. The analytical hierarchy process an exposition, *Operations Research*, 2001, July (Vol. 49, No. 4), pp. 469-487. DOI: 10.1287/opre.49.4.469.1123.
9. Opricovic S., Gwo-Hshiung Tzeng. Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods, *European Journal of Operational Research*, 2007, Vol. 178, No. 2, pp. 514-529.
10. Brans J., Mareschal B. PROMETHEE methods, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 2005. pp. 163-196.
11. Macharis C., Brans J., Mareschal B. The GDSS PROMETHEE procedure, *Journal of Decision Systems*, 1998, Vol. 7. No. 4, pp. 283-307.
12. Brans J.P., Mareschal B., Vincke Ph. PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis, *Operational Research*, 1984, 84, pp. 477-490.
13. Roy B. The outranking approach and the foundation of ELECTRE methods, *Theory and Decision*, 1991. No. 31, pp. 49-73.
14. Rezaei J. A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 2020, 19 (3), pp. 891-907.
15. Alinezhad A., Khalili J. COPRAS Method. In: New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM), *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, Cham, 2019, Vol. 277. DOI: 10.1007/978-3-030-15009-9_12.
16. Brauers W.K.M., Karel W., Zavadskas E., Kazimieras E. Robustness of the multi-objective MOORA method with a test for the facilities sector, *Technological and economic development of economy*, 2009, No. 2 (15), pp. 352-375.
17. Alinezhad A., Khalili J. WASPAS Method. In: New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM), *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, Cham, 2019, Vol. 277. DOI: 10.1007/978-3-030-15009-9_13.
18. Pamucar D., Cirovic G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attribute border approximation area comparison (MABAC), *Expert Systems with Applications*, 2015, 42 (6), pp. 3016-3028. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.057.

19. Daugavietis J.E., Soloha R., Dace E., Ziemele J.A. Comparison of Multi-Criteria Decision Analysis Methods for Sustainability Assessment of District Heating Systems, *Energies*, 2022, 15, 2411.
20. Kizielewicz B., Bączkiewicz A. Comparison of Fuzzy TOPSIS, Fuzzy VIKOR, Fuzzy WASPAS and Fuzzy MMOORA methods in the housing selection problem, *Procedia Computer Science*, 2021, 192, pp. 4578-91.
21. Salabun W., Wątróbski J., Shekhovtsov A. Are MCDA Methods Benchmarkable? A Comparative Study of TOPSIS, VIKOR, COPRAS, and PROMETHEE II Methods, *Symmetry*, 2020, 12, pp. 1549.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Подоплелова Елизавета Сергеевна – Южный федеральный университет; e-mail: chuzhinova@sfnedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525844188; аспирант.

Podoplelova Elizaveta Sergeevna – Southern Federal University; e-mail: chuzhinova@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525844188; postgraduate student.

УДК 519.254

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-125-134

М.Ю. Георги

МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЧИННОСТИ ИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ПРАКТИКЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Обсуждается значимость извлечения причинно-следственных связей в машинном обучении для принятия решений и оценки воздействия на реальный мир. Отмечается, что большинство текущих успехов в машинном обучении основаны на огрубленном распознавании образов и корреляционном анализе, но для более сложных задач необходимо извлекать причинно-следственные связи. Декларируется что проблемы объяснимости прогнозов и причинно-следственного понимания, даже с применением передовых методик машинного обучения LIME, SHAP, TreeSHAP, DeepSHAP, Shapley Flow, являются фундаментальными препятствиями в развитии искусственного интеллекта. В статье кратко раскрываются основные философские математические концепции и определения причинности, включая понятия контрфактуалов, байесовских сетей, направленных ациклических графов и причинно-следственного формального вывода. Делается вывод о том, что практическая значимость базирующегося на данных причинно-следственного анализа, состоит в ответах на априори сформулированные вопросы, которые могут отражать гипотетическую связь между событием (причиной) и вторым событием (следствием), где второе событие является прямым следствием первого. Далее производится сравнительный анализ способов и основных сценариев использования фреймворков Causal Discovery и Causal Inference, на базе которых возникает возможность сделать предположения о расположенной в основе исследуемого набора данных причинно-следственной структуре и задействовать статистические методы для оценки силы и направления таких связей. В статье также обсуждаются методы и алгоритмы причинно-следственного анализа и их применение в реальных задачах. Упомянуты репрезентативные методы, такие как модели на основе ограничений, модели на основе оценок и функциональные каузальные модели, тесты (условные) на независимость, оценочные функции, всё то что может быть задействовано для решения проблемы извлечения причинно-следственных связей из обсервационных данных, большинство которых реализовано в open-source фреймворки, таких как Microsoft DoWhy, Uber CausalML, causal-learn, Econ-ml и многие другие, которые реализуют большинство упомянутых методов причинно-следственного анализа.

Причинно-следственный ИИ; Объективность ИИ; скоростное обучение; прогноз под вмешательством.

M.Y. Georgi

METHODS FOR MINING CAUSUSITY FROM OBSERVATIONS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article discusses the importance of capturing causal relationships in machine learning for decision-making and evaluating real-world impact. It is noted that most current successes in machine learning are based on pattern recognition and correlation analysis; however, for more complex tasks, extracting causal relationships is necessary. The problems of explainability of predictions and causal understanding, even with the use of advanced machine learning techniques such as LIME, SHAP, TreeSHAP, DeepSHAP, and Shapley Flow, are recognized as fundamental obstacles in the development of artificial intelligence. The article briefly presents the main philosophical and mathematical concepts and definitions of causality, including counterfactuals, Bayesian networks, directed acyclic graphs, and causal formal inference. It concludes that the practical significance of data-based causal analysis consists in answering a priori formulated questions, which may reflect a hypothetical relationship between an event (a cause) and a second event (an effect), where the second event is a direct consequence of the first. A comparative analysis of the methods and main scenarios for using the Causal Discovery and Causal Inference frameworks is also carried out. Based on this analysis, it becomes possible to make assumptions about the causal structure underlying the investigated dataset and to use statistical methods to evaluate the strength and direction of such relationships. The article also discusses methods and algorithms of causal analysis and their application in real-world tasks. Representative methods are mentioned, such as constraint-based models, estimation-based models, functional causal models, (conditional) independence tests, evaluation functions, and other tools that can be used to solve the problem of extracting causal relationships from observational data. Most of these methods are implemented in open-source frameworks such as Microsoft DoWhy, Uber CausalML, causal-learn, Econ-ml, and many others, which facilitate causal analysis.

Causal AI; AI fairness; few-shot fine-tuning; counterfactual reasoning.

1. Введение. Необходимость причинно-следственного вывода. Машинное обучение привлекательно тем, что его инструментарий можно применять практически к безграничному кругу задач, от обработки естественного языка до компьютерного зрения и медицинской диагностики. Большинство текущих успехов сводятся к огрубленному распознаванию образов на надлежащим образом собранных независимых и идентично распределенных данных (**iid data**). Поэтому в машинном обучении, в особенности "с учителем", корреляционный анализ долгое время остается фундаментом прогнозирования целевой переменной исходя из переменных признаков. Эта стратегия хорошо зарекомендовала себя на практике, поэтому современные достижения ИИ, такие как авто-регрессионные большие языковые модели AR-LLM (ChatGPT), становятся едва ли не самой важной составляющей технологического прогресса.

Естественно, что подходы, связанные с Большими Данными (и всё более увеличивающимися), особенно в последние 2 десятилетия вывели на первый план мнение, что «корреляция важнее причинно-следственной связи», и даже модели непараметрической статистики прекрасно работают, задействуя только корреляты (условную вероятность): «Причинность не будет отброшена, но она сброшена с пьедестала как основной источник смысла. Большие данные стимулируют некачественный анализ, часто заменяя причинно-следственные связи» [1].

Джуда Перл и Дэйна Маккензи переформулировали эту концепцию следующим образом: «Надежда – а в настоящее время она пока молчит – заключается в том, что сами данные будут вести нас к правильным ответам всякий раз, когда возникают причинные вопросы» [2].

Однако во многих прикладных областях эти ожидания столкнулись с фундаментальными препятствиями. Проблемы с устойчивостью, с распознаванием и реагированием на новые обстоятельства, для которых модели традиционного ИИ не могут быть явно запрограммированы, или даже обучены, замедляют переход от узкого искусственного интеллекта (ANI) к общему (AGI). Даже впечатляющие успехи трансферного (**Transfer**), прицельного (**Zero-shot**) и “быстрого” (**Few-Shot**) обучения, обучения с подкреплением (**Reinforcement Learning**), адаптации предметной области (**Domain Adaptation**) так и не сняли проблему объяснимости прогнозов и причинно-следственного понимания получаемых результатов, являющегося фундаментальным свойством человеческого сознания.

Между формальными причинными и ассоциативными умозаключениями пролегает качественное различие: если вывод о причинности анализирует реакцию переменной-следствия при изменении потенциальной причины, то корреляция указывает всего лишь на общую взаимосвязь [3]. Таким образом, изучение причинно-следственных связей представляет собой задачу повышенной сложности.

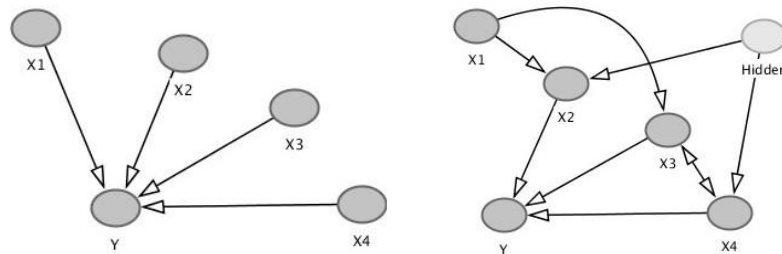


Рис. 1. Постановка традиционной модели машинного обучения (слева) и модели каузальной (справа) [4]. Дополнительно вводятся новые уровни абстракции: общие причины (конфаундеры), общие эффекты (коллайдеры), медиаторы, предусловители и т.д.

Поскольку все более важной целью моделирования становится не прогноз и его относительное качество, но основанный на разрабатываемой модели способ принятия решений и оценка вмешательств в реальный мир, возникла потребность выявлять основные механизмы, почему что-то произошло и количественно оценивать фактическое влияние одной переменной (ковариаты) на цель, реакцию, потенциальный эффект. Методы машинного обучения, ориентированные на сходные задачи, например *LIME*, *SHAP*, *TreeSHAP*, *DeepSHAP*, *Shapley Flow* можно использовать только с уже обученными моделями, что накладывает ограничение на их объяснительную силу [5].

По мнению Джуды Перла, высказанному также в «Книге причин» [2], каузальные модели являются, необходимым, но пока недостаточным элементом в развитии сильного искусственного интеллекта (**ASI**): «День, когда ИИ сможет приблизиться к человеческому интеллекту, не так далёк, но пока его возможности следует оценивать по трем уровням когнитивных способностей: видение (ассоциация), действие (вмешательство) и воображение (контрфактуальность), формируя так называемую, каузальную лестницу Перла. До недавнего времени искусственный интеллект оперировал лишь на самом нижнем её уровне – видении».

2. Некоторые общие сведения о причинности. Причинность – это способ понимания окружающей среды с точки зрения взаимодействия, то, что можно узнать о мире в результате вмешательств в его предполагаемые механизмы, при этом наблюдение моделируется как их побочный эффект. Установление причинности, изначально мыслительный процесс, описывающий идеи о природе отношений причины и следствия, проверяет, существует ли связь причины со следствием.

Вероятно, наиболее ранняя попытка разработать строгое определение причинности была предпринята Дэвидом Юмом [6]. Концепции Юма, компактно оформленные в терминах контрфактуалов, определяют причинность следующим образом: «Мы рассматриваем причину как что-то создающее различие, и это различие должно отличаться от того, что произошло бы без него. Если бы его не было, его эффекты – по крайней мере, некоторые из них, а обычно и все – тоже отсутствовали бы» [7].

Более формальное определение принципа общей причинности было предложено философом Хансом Рэйхенбахом. Если две случайные величины X и Y статистически зависимы ($X \mid Y$), то либо (a) X вызывает Y , (b) Y вызывает X , либо (c) существует третья переменная Z , которая вызывает как X , так и Y . Далее X и Y становятся независимыми при обуславливании (*conditioning*) на Z , т.е. $X \perp Y \mid Z$. (Обуславливание переменной – это механизм формирования условий для проведения гипотетических экспериментов, включающий в себя анализ значений других переменных для данного значения обусловленной переменной.). В этом случае говорят, что Z «экранирует» зависимость между X и Y [8].

Данная концепция легла в основу байесовских графовых моделей (причинно-следственных вероятностных сетей BBN). Задействуя такой инструментарий, причинный формальный вывод (**causal inference**) стало возможным с помощью данных пассивных наблюдений, при условии их достаточности, “зафиксировать” в модели сопутствующие переменные (control on confounders) и строго оценить эффект внешнего вмешательства на получаемый результат. Методы причинно-следственного анализа (ПСА) используют объемные, глубокие предположения и соглашения, которые позволяют оценить контрфактический (ненаблюдаемый) результат, отвечая на вопросы 3-го уровня лестницы Перла “Почему?” [9].

Таким образом ответы на причинные вопросы, выдвижение-подтверждение-опровержение гипотез о механизме порождения данных, лежащих в основе исследуемого феномена, собственно, и являются основной сферой применения ПСА. Подобные вопросы особенно важны в сценариях принятия решений, связанных с оценкой гипотетической ретроспекции (контрфакта):

- ◆ Улучшит ли показатели предлагаемое изменение в системе? (*Будет ли это работать*).
- ◆ Что привело к изменению показателей системы? (*Почему это сработало*)
- ◆ Какие изменения в системе могут улучшить результаты для пользователей? (*Что необходимо предпринять*).
- ◆ Как система взаимодействует с поведением человека и каково влияние, например системы рекомендаций, на активность людей? (*Каковы общие эффекты/последствия*).

3. Основные понятия и определения ПСА. На практике исследование причинности проводится по двум связанным, но относящимся к разным аспектам процесса понимания причинности в данных, концепциям: **Выявление Причинности** (Causal Discovery), **Оценка Причинности** (Causal Inference/Estimation) [10]. Первое направление решает задачу раскрытия взаимосвязей между переменными в наборе данных, не обязательно делая какие-либо предположения о направлении или силе причинно-следственных связей, в то время как второе сосредоточено на численной оценке причинно-следственного эффекта вмешательства на результат.

Таблица 1

Сравнительный анализ сценариев использования методологий выявления причинности (ВП) и оценки причинности (ОП)

Выявление Причинности (ВП)	Оценка Причинности (ОП)
<u>Занимается</u> выявлением лежащей в основе системы причинно-следственной структуры на основе данных наблюдений.	<u>Занимается</u> определением влияния одной переменной на другую с учетом известной причинно-следственной структуры.
<u>Использует</u> методы теории графов, таких как байесовские сети, марковские сети и моделирование структурных уравнений.	<u>Использует</u> методы статистики и машинного обучения, такие как линейная регрессия, логистическая регрессия и нейронные сети.
<u>Фокусируется</u> на обнаружении причинно-следственных связей между переменными.	<u>Фокусируется</u> на определении силы причинно-следственных отношений и составлении прогнозов на их основе.
<u>Важно</u> для понимания того, как работает система, и прогнозирования того, как изменения в одной переменной повлияют на изменения в других переменных.	<u>Важно</u> для разработки вмешательств, которые улучшат производительность системы.
Причинно-следственные связи могут быть выведены из моделей статистической зависимости и независимости между переменными.	Причинно-следственные связи могут быть использованы для прогнозирования влияния вмешательств на переменные в системе.
Методы причинно-следственного обнаружения включают графовые модели, теоретико-информационные подходы и байесовские сети.	Методы причинно-следственного вывода включают рандомизированные контролируемые испытания, регрессионный анализ, сопоставление показателей склонности и анализ инструментальных переменных.
<u>Не может</u> установить причинно-следственную связь окончательно, т.к. могут присутствовать ненаблюдаемые вмешивающиеся факторы или обратная причинно-следственная связь.	<u>Может</u> установить причинно-следственную связь более определенно, но только для конкретного изучаемого воздействия (лечения) и в конкретных условиях исследования.
<u>Применяется</u> для обнаружения причинно-следственных связей в сложных системах, где базовая причинно-следственная структура неизвестна.	<u>Применяется</u> для прогнозирования последствий вмешательств в сложных системах.

3.1. Методология выявления причинности (ВП). Поиск зависимостей, иллюстрирующих отношения, присущие данным, опирается на фундаментальное свойство Acyclicity (Ацикличность) и сопровождается **автоматизированным** построением наиболее правдоподобного направленного ациклического графа (DAG). Для данного графа $\mathcal{G} = (X, \mathcal{E})$ случайные переменные X образуют Байесову сеть в отношении $\mathcal{G}$ если выполняется формула факторизации, выражающей совместное распределение вероятностей [11].

$$P(X) = \prod_{x \in X} P(x | Pa(x)). \quad (1)$$

Иными словами, это топологическая сортировка, без циклов соединяющих другие ребра, где каждый узел находится в определенном порядке. Для реализации *Causal Discovery* применяются методы сканирования наборов данных на предмет условной независимости между переменными, прогонки через набор совместимых моделей, обеспечивающих наблюдаемое распределение, и затем выбора наиболее подходящей, или, если повезет, единственной модели, которая теоретически способна воспроизвести это наблюдаемое распределение. Наиболее подробно методология изложена в [12].

3.2. Алгоритмы выявления причинности (ВП). Репрезентативные методы в первом приближении могут делиться на 4 категории, а именно модели на основе ограничений [13], модели на основе оценок [14], функциональные каузальные модели. Большинство упомянутых методов реализовано в фреймворках DoWhy, CausalML, causal-learn, Econ-ML, CausalImpact и т.д.

Методы, основанные на ограничениях, используют тесты условной независимости между переменными. (PC, Fast Causal Inference (FCI), Inductive Causation (IC)).

Методы, основанные на оценках, используют функцию оценки для ранжирования возможных причинно-следственных графов, рассчитываемую на основе качества соответствия графа данным. (Greedy Equivalence Search (GES), Greedy Interventional Equivalence Search (GIES), Concave Penalized Coordinate Descent with Reparametrization (CCDr)).

Гибридные методы сочетают в себе элементы методов, основанных на ограничениях и оценках. (Structural Agnostic Modeling (SAM), Causal Additive Model (CAM), Causal Generative Neural Network (CGNN), MMHC

Нелинейные и задействующие асимметрию. (Linear Non-Gaussian Acyclic Model (LiNGAM), Nonlinear Additive Noise Model, Post-nonlinear Causal Model (PNL), Granger Causality)

Получаемые на выходе результаты представляют собой структурно-причинные модели (SCM) [15], или, взаимозаменяемо, направленные графовые структурные причинные модели (DGCM), где вводятся дополнительные уровни математического формализма, в виде функциональных отношений между узлами-предками и потомками на (DAG). Этот класс моделей выражается в виде «модели структурных уравнений» (SEM) или функциональной причинно-следственной модели (FCM).

В отличие от систем уравнений (в общем случае дифференциальных), которые тоже могут устанавливать (ПСС), DGCM не требуют начальных (за исключением временных рядов) и граничных условий. Предполагается, что значение каждой переменной на графе является детерминированной функцией ее прямых причин и неизмеренных возмущений (Марковское ограждение). Обычно используется линейная постановка, хотя форма интерполирующей функции может быть произвольной. Также утверждается, что если орграф причинный, и X является причиной Y ($X \rightarrow Y$), то существуют экзогенное вмешательство T , которое напрямую изменяет распределение (или значение) Y , при фиксации, на некоторых значениях, остальных переменных (ковариат) [16].

3.3. Методология оценки причинности. Производится изучение возможных последствий изменения данной системы там, где зависимость уже, предположительно, установлена.

Основной методологией для исчисления ПСС является фреймворк Возможных (потенциальных) исходов Неймана-Рубина (Potential Outcome) [17, 18], в задачу которого входит оценка разности между наблюдаемым состоянием *объекта выборки (unit)*, которому было вменено какое-либо интервенционное воздействие, и этим же юнитом, на которого подобное воздействие осуществлено не было. **Очевидно, что один из этих исходов всегда будет гипотетически ретроспективным, т. е. ненаблюдаемым.**

ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ (CAUSAL DIAGRAMS) – Используя направленные ациклические графы, выражает причинно-следственные связи с точки зрения логической последовательности, а также качественные предположения, простые для понимания. Ограничивается ациклическими причинно-следственными связями. Не может обрабатывать петли обратной связи, и испытывает потенциальные трудности для количественного анализа.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСХОДОВ (COUNTERFACTUAL) – Выражает причинно-следственные связи в виде разницы потенциальных исходов при различных условиях воздействия. Делает количественные предположения об реакциях юнитов в исследуемой популяции на воздействие. Предполагается отсутствие интерференции между оцениваемыми объектами групп и отсутствие неизмеренных конфаундеров. Причинность может быть определена ошибочно.

STRUCTURAL EQUATIONS MODEL (SEM) – Представляет причинно-следственные связи как систему уравнений, описывающих, взаимосвязь переменных друг с другом. Требуются строгие предположения о функциональной форме отношений между переменными. Неточное количественное представление причинно-следственных связей.

SUFFICIENT COMPONENT CAUSE MODEL (SCC) – Представляет причинно-следственные связи как совокупность необходимых и достаточных условий для возникновения следствия. Возник (в основном в теории) в эпидемиологии, требующей уточнения механизмов внутри отдельных юнитов. Ограничиваются ситуациями, когда причинно-следственные связи хорошо понятны и могут быть представлены как совокупность необходимых и достаточных условий.

3.4. Алгоритмы оценки причинности. Математические методы и численные подходы каузального формального вывода (исчисления ПСС) также включают в себя рандомизированные эксперименты (РКИ), естественные эксперименты, обсервационные исследования, инструментальные переменные, сопоставление показателей склонности, разница в разнице, дизайн разрыва регрессии и синтетические методы контроля [19].

Do-calculus – разработанный Judea Pearl [20, 21] представляет собой набор правил, которые позволяют манипулировать причинно-следственными моделями для оценки причинно-следственных эффектов вмешательств. Анализируется тонкая разница между байесовской статистикой $P(y|x)$ и $P(y|do(x))$, где первое описывает, какие значения Y , вероятно, примет, когда X окажется равным x (т.е. наблюдаемое распределение), а второе описывает значения y , когда для X установлено значение x (т.е. интервенционное распределение). Занимает центральное место в формировании понимания и оценке причинно-следственных эффектов, оценке надежности и устойчивости DAG, SCM и Potential Outcome моделей.

Инструментальные переменные (IV) используются для оценки причинно-следственных эффектов при наличии ненаблюдаемых смешанных переменных или обратной причинно-следственной связи. Заключается в поиске переменной (инструмента), которая коррелирует с воздействием, а не с результатом, за исключением ее влияния на лечение.

Сопоставление показателей склонности (PSM) – “псевдо-рандомизация”, группа не экспериментальных методов сопоставления обработанных и контрольных групп на основе их оценок склонности производится попытка сбалансировать тестовые группы по вмешивающимся факторам.

Разность разностей (DiD) – это квази-экспериментальный метод, который сравнивает изменение результатов между группой лечения и контрольной группой с течением времени. Предполагается, что тестовая и контрольная группа следовали бы параллельным тенденциям в отсутствие воздействия.

Оценка методом разрывного дизайна (RDD) – это квази-экспериментальный метод для условий неприменимости рандомизации, который использует разрыв во вменении воздействия на основе пороговой переменной, являющегося следствием отсечки. Сравниваются результаты чуть выше и ниже порога, предполагая, что субъекты, близкие к порогу, похожи во всех аспектах, кроме воздействия.

Метод синтетического контроля (SCM) – это статистический метод, который используется для оценки эффектов некоторых интервенций или событий на группу, когда у нас есть только один наблюдательный случай. Производится оценка ПСС при наличии ненаблюдаемых переменных-конфаундеров, путем построения синтетической контрольной группы, которая соответствует тестовой группе по ковариатам до воздействия.

4. Теоретические допущения ПСА. Фундамент ПСА опирается на значительное количество априорных убеждений и абстрактно вводимых понятий, которые предоставляют возможность перейти от статистических ассоциаций к причинно-следственным связям, из которых можно выделить 5 оправданных, при этом способ их применения для ВП и ОП разнится [22].

♦ **Causal sufficiency** (для ВП) предполагается, что все переменные, которые не являются прямыми причинами или следствиями переменной результата, не зависят от переменной результата, учитывая прямые причины переменной результата. Используется для определения является ли переменная каузальной или ей можно в модели пренебречь.

♦ **Causal sufficiency** (для ОП) – предполагается, что все вмешивающиеся переменные (конфаундеры), влияющие как на воздействие, так и на исход, измерены и включены в анализ. Если предположение нарушается, причинно-следственный эффект не может быть точно оценен. Используется для определения того, можно ли оценить причинный эффект на основе данных наблюдений.

♦ **Faithfulness** (для ВП) – предполагается, что наблюдаемые закономерности статистической зависимости между переменными согласуются с причинно-следственной структурой базовой модели. Это означает, что, если две переменные причинно не связаны они не имеют статистической зависимости (при выводе о структуре причинной модели на основе данных наблюдений)

♦ **Faithfulness** (для ОП) предполагается, что наблюдаемые закономерности статистической зависимости между переменными согласуются с причинно-следственной структурой базовой модели. Это означает, что, если две переменные не связаны причинно-следственной связью, они не должны быть статистически зависимыми (при оценке достоверности причинных выводов, сделанных на основе экспериментальных данных или данных наблюдений.).

♦ **Stable unit treatment value assumption (SUTVA)** (для ВП) предполагается, что причинно-следственные связи между переменными стабильны во времени и не меняются из-за вмешательств или других внешних факторов. То есть причинно-следственная структура системы остается неизменной даже при воздействии на отдельные переменные.

♦ **Stable unit treatment value assumption (SUTVA)** (для ОП) предполагается, что потенциальный результат каждого объекта группы (юнита, пациента и т.д.) зависит только от воздействия, вмененного этому юниту, и никакому другому. Таким образом между блоками нет помех, и каждый блок считается независимым от других.

♦ **Ignorability/Exchangeability/unconfoundedness** (для ВП) предполагается, что не существует не измеряемых факторов, влияющих как на воздействие, так и на переменную результата, что позволяет выявить причинно-следственные связи, не делая никаких предположений о лежащей в их основе причинно-следственной структуре.

♦ **Ignorability/Exchangeability/unconfoundedness** (для ОП) – предполагается, что вменение воздействия не зависит от потенциальных результатов с учетом наблюдаемых ковариат, что позволит оценить причинно-следственный эффект от воздействия путем “контроля” потенциальных искажающих факторов.

♦ **Positivity** (для ВП) – предполагается, что каждая переменная в DAG имеет некоторую вариацию, которая не объясняется другими переменными графа. Это допущение необходимо для определения принципиальной возможности получить причинный эффект на основе наблюдаемых данных с использованием графовых методов, таких как do-calculus.

♦ **Positivity** (для ОП) – предполагается, что для каждого значения внешних факторов существует положительная вероятность получения каждого воздействия. Это допущение необходимо для объективной оценки эффектов воздействия с использованием данных наблюдений.

Приведенный перечень предпосылок не является исчерпывающим. Их формулировки иногда разнятся, а применимость может зависеть от конкретного контекста и методологии, используемой для причинного обнаружения и причинного исследования. Хотя эти предположения помогают сузить число возможных моделей, проблему они решают не полностью.

Заключение. Причинно-следственный анализ на базе данных, полученных без знаний о механизме их порождения, например в маркетинговой атрибуции [23], невероятно сложен как в теории, так и на практике. Он опирается на специфические предположения, которые зачастую трудно обеспечить и защитить, так как нет стопроцентно эффективных проверок устойчивости и чувствительности (robustness checks). Аппарат ориентированных ациклических графов DAG и вводимых поверх дополнительных уровней математического формализма SEM (Pearl SCM), (Rubin PO) хотя и обладает большой репрезентативной силой и свойствами вывода, не решает проблему окончательно, поскольку трудно исполнить ключевое предположение о том, что DAG, выбранный среди множества альтернативных, является правильным, позволяя увериться, что мы не изучаем что-то априори неверное. Однако эти соображения не закрывают тему дебатов о реализуемости ПСА на данных пассивных наблюдений, а такие инструменты как **Google CausalImpact**, **Microsoft doWhy**, **Uber Causalml**, **Huyn dai gCastle** и.т.д демонстрируют потенциальную возможность автоматизировать этот процесс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hassani H., Xu H., Mansi G. Big data and causality, *Annals of Data Science*, 2018, 5, pp. 133-156.
2. Pearl J., Mackenzie D. The book of why. Penguin Books, 2019.
3. Schölkopf B., Locatello F., Bauer S., Ke N.R., Kalchbrenner N., Goyal A., and Bengio Y. Toward causal representation learning, *Proceedings of the IEEE*, 2021, 109 (5), pp. 612-634.
4. Naser M. Causality, causal discovery, and causal inference in structural engineering, *arXiv preprint arXiv:2204.01543*, 2022.
5. Hernán M., Robins J. Estimating causal effects from epidemiological data, *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2006 Jul., 60 (7), pp. 578-586.
6. Leshner J.H.H. Hume's Analysis of "Cause" and the "Two-Definitions" Dispute, *Journal of the History of Philosophy*, 1973, 11 (3), pp. 387-392.
7. Lewis D. Causation, *The journal of philosophy*, 1973, 70 (17), pp. 556-567.
8. Hofer-Szabó G., Rédei M., Szabó L.E. On Reichenbach's common cause principle and Reichenbach's notion of common cause, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 1999, 50 (3), pp. 377-399.
9. Pearl J. An Introduction to Causal Inference, *The International Journal of Biostatistics*, 2010, 6 (2).
10. Glymour M., Pearl J., Jewell N.P. Causal inference in statistics: A primer. John Wiley & Sons. 2016.
11. Bareinboim E., Pearl J. Causal inference and the data-fusion problem, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113 (27), pp. 7345-7352.

12. Pellet J.P. Effective Causal Analysis: Methods for Structure Learning and Explanations, 2010. (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
13. Triantafillou S., Tsamardinos I. Constraint-based causal discovery from multiple interventions over overlapping variable sets, *The Journal of Machine Learning Research*, 2015, 16 (1), pp. 2147-2205.
14. Glymour C., Zhang K., Spirtes P. Review of causal discovery methods based on graphical models, *Frontiers in genetics*, 2019, 10, pp. 524.
15. Nogueira A.R., Pugnana A., Ruggieri S., Pedreschi D., Gama J. Methods and tools for causal discovery and causal inference, *Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery*, 2022, 12 (2), e1449.
16. Yao L., Chu Z., Li S., Li Y., Gao J., Zhang A. A survey on causal inference, *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*, 2021, 15 (5), pp. 1-46.
17. Rubin D.B. Estimating causal effects of treatments in randomized and nonrandomized studies, *Journal of educational Psychology*, 1974, 66 (5), pp. 688.
18. Imbens G.W., Rubin D.B. Causal inference in statistics, social, and biomedical sciences. Cambridge University Press, 2015.
19. Chernozhukov V., Wüthrich K., Zhu Y. An exact and robust conformal inference method for counterfactual and synthetic controls, *Journal of the American Statistical Association*, 2021, 116 (536), pp. 1849-1864.
20. Pearl J. Causal diagrams for empirical research, *Biometrika*, 1995, 82 (4), pp. 669-688.
21. Pearl Judea. The do-calculus revisited, *arXiv preprint arXiv:1210.4852*, 2012.
22. Vonk M., Malekovic N., Bäck T., Kononova A. Disentangling causality: assumptions in causal discovery and inference, *Artificial Intelligence Review*, 2023, pp. 1-37.
23. Teinmaa I., Albert J., Goldenberg D. Uplift modeling: from causal inference to personalization, *In Companion Proceedings of the Web Conference*, 2021.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Георги Михаил Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: mgeorgi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185035098; аспирант.

Georgi Mikhail Yurievich – Southern Federal University; e-mail: mgeorgi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185035098; postgraduate student.

УДК 004.942:519.254:519.876.5:621.396.96:629.7.018 DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-134-143

И.Л. Щербов

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОВЕРКИ ЗНАЧИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ СГЛАЖИВАЮЩЕГО ПОЛИНОМА

Целью работы является исследование процедуры проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома на основе критериев проверки статистических гипотез с целью формирования вектора коэффициентов сглаживающего полинома. Исследовались разработанные методы нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией степени сглаживающего полинома с оптимизацией структуры сглаживающего полинома. Исследование проводилось путём имитационного моделирования значения вторичных координат, которые по формулам простых методов, пересчитывались в первичные координаты с учетом местоположения и типа измерительных средств. Затем к полученным значениям первичных координат прибавлялись значения ошибок измерений, распределенных по нормальному закону. Полученные таким образом первичные данные измерений подвергались нелинейному адаптивному сглаживанию. Формирование вектора коэффициентов сглаживающего полинома осуществлялось на основе критериев проверки статистических гипотез в следующей последовательности: формирование по данным измерений соответствующей статистики; сравнение этой статистики с пороговым уровнем, зависящим от доверительной вероятности и числа степеней свободы; принятие решения о включении данного компонента в состав полинома. Формирование вектора коэффициентов сглаживающего

полинома осуществлялось на основе критерия Фишера. По результатам исследования можно сделать следующие выводы: методы нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома превосходят по показателям качества и эффективности метод с оптимизацией степени сглаживающего полинома; метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 превосходит по показателям качества и эффективности метод с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 2; наибольшие значения выигрыша в качестве и эффективности для всех исследуемых методов достигаются в средней части в пределах 3/5 интервала сглаживания; для всех исследуемых методов показатели качества и эффективности снижаются на краях интервала сглаживания.

Метод проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома; критерии проверки статистических гипотез; метод Фишера, показатели качества и эффективности.

I.L. Shcherbov

RESEARCH OF METHODS FOR EXAMINATION OF THE SIGNIFICANCE OF THE SMOOTHING POLYNOMIAL COEFFICIENTS

The aim of the work is to study the procedure for checking the significance of the coefficients of the smoothing polynomial based on the criteria for testing statistical hypotheses in order to form a vector of coefficients of the smoothing polynomial. The developed methods of nonlinear adaptive smoothing with optimization of the degree of the smoothing polynomial with optimization of the structure of the smoothing polynomial were studied. The study was carried out by simulating the value of secondary coordinates, which, according to the formulas of simple methods, were converted into primary coordinates, taking into account the location and type of measuring instruments. Then, the values of measurement errors distributed according to the normal law were added to the obtained values of the primary coordinates. The primary measurement data thus obtained were subjected to nonlinear adaptive smoothing. The formation of the coefficient vector of the smoothing polynomial was carried out on the basis of the criteria for testing statistical hypotheses in the following sequence: formation of the corresponding statistics according to the measurement data; comparison of these statistics with a threshold level depending on the confidence level and the number of degrees of freedom; making a decision on the inclusion of this component in the polynomial. The formation of the coefficient vector of the smoothing polynomial was carried out on the basis of the Fisher criterion. Based on the results of the study, the following conclusions can be drawn: methods of nonlinear adaptive smoothing with optimization of the structure of the smoothing polynomial are superior in terms of quality and efficiency to the method with optimization of the degree of the smoothing polynomial; the method of non-linear adaptive smoothing with optimization of the structure of the smoothing polynomial Structure 1 is superior in terms of quality and efficiency to the method with optimization of the structure of the smoothing polynomial Structure 2; The greatest gains in quality and efficiency for all the studied methods are achieved in the middle part within 3/5 of the smoothing interval; for all the studied methods, the quality and efficiency indicators decrease at the edges of the smoothing interval.

Method for examination of the significance of smoothing polynomial coefficients; criteria for testing statistical hypotheses; Fisher's method; quality and efficiency indicators.

Введение. В работах [1–5], с целью повышения точности и достоверности определения вторичных координат пространственного положения летательного аппарата (ЛА) были разработаны и исследованы структуры линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций (Λ -ОБФ) на основе которых был разработан алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.

В общем виде алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных траекторных измерений предусматривает:

- ♦ нахождение начального приближения вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома;
- ♦ определение максимально правдоподобной оценки (МПО) вектора коэффициентов сглаживающего полинома;

- ♦ проверку значимости коэффициентов сглаживающего полинома на основе критериев проверки статистических гипотез с целью формирования вектора коэффициентов сглаживающего полинома;

- ♦ вычисление и вывод на печать сглаженных значений вторичных координат положения ЛА.

Первый и второй этап работы алгоритма адаптивного нелинейного сглаживания данных траекторных измерений: порядок нахождения начального приближения и МПО вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома был детально исследован в работах [1–3, 5].

Целью данной работы является исследование процедуры проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома на основе критериев проверки статистических гипотез с целью формирования вектора коэффициентов сглаживающего полинома.

Постановка задачи. Исследуются следующие разработанные методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, применяемые в алгоритме адаптивного нелинейного сглаживания данных траекторных измерений:

- ♦ нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией степени сглаживающего полинома;

- ♦ нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией структуры сглаживающего полинома.

При этом метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома предусматривает два варианта. Назовем их Структура 1 и Структура 2.

Исследование методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома проведем на примере полинома 5 степени.

Из работ [1–3, 5] следует, что вектор коэффициентов сглаживающего полинома имеют следующий вид:

$$A^T = \|a_{00}a_{01}a_{02}\dots a_{k0}a_{k1}a_{k2}\dots a_{m0}a_{m1}a_{m2}\|, \quad (1)$$

где

a_{kl} – коэффициенты сглаживающего полинома;

$l=0, 1, 2$;

m – степень сглаживающего полинома.

Как видно из (1), вектор коэффициентов сглаживающего полинома представляет собой тройки элементов a_{kl} . Условно вектор коэффициентов сглаживающего полинома представим следующим образом (рис. 1).

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{40}	a_{41}	a_{42}	a_{50}	a_{51}	a_{52}
Тройка 0 степени			Тройка 1 степени			Тройка 2 степени			Тройка 3 степени			Тройка 4 степени			Тройка 5 степени		

Рис. 1. Вектор коэффициентов сглаживающего полинома 5 степени

Далее рассмотрим более детально разработанные методы.

Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией степени сглаживавшего полинома. Сущность этого метода состоит в том, что проверка значимости коэффициентов сглаживающего полинома начинается с последней тройки элементов вектора коэффициентов сглаживающего полинома и заканчивается при условии, когда значение хотя бы одного элемента из тройки элементов превышает пороговый уровень (рис. 2).

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{40}	a_{41}	a_{42}	0	0	0
Тройка 0 степени			Тройка 1 степени			Тройка 2 степени			Тройка 3 степени			Тройка 4 степени			Тройка 5 степени		

Рис. 2. Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией степени сглаживавшего полинома

В этом случае данный элемент и все предшествующие ему тройки элементов считаются значимыми и принимаются равными по значению оценкам соответствующих элементов (тройки 0, 1, 2, 3, 4 степени). Все последующие элементы считаются не значимыми и принимаются равными нулю (тройка 5 степени).

Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 1). Сущность этого метода состоит в том, что проводится проверка значимости всех коэффициентов сглаживающего полинома начиная с последней тройки элементов (рис. 3).

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{10}	a_{11}	0	0	a_{21}	0	a_{30}	0	0	a_{40}	0	0	0	0	a_{52}
Тройка 0 степени			Тройка 1 степени			Тройка 2 степени			Тройка 3 степени			Тройка 4 степени			Тройка 5 степени		

Рис. 3. Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживавшего полинома (Структура 1)

Если внутри проверяемой тройки элементов их значение превышает установленный пороговый уровень, то эта тройка элементов остается в составе вектора без изменений (тройка 0 степени). Если внутри тройки проверяемый элемент превышает по значению пороговый уровень, то он остается в составе вектора коэффициентов сглаживающего полинома, а те элементы, значения которых ниже установленного порогового уровня, приравниваются к нулю (тройки 1, 2, 3, 4, 5 степени). Процесс проверки значений элементов продолжается до тех пор, пока в составе очередной проверяемой тройки элементов, значения двух элементов не окажутся выше установленного порогового уровня (тройка 1 степени).

Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 2). Сущность этого метода состоит в том, что, как и в методе Структура 1 проводится проверка значимости всех коэффициентов сглаживающего полинома начиная с последней тройки элементов (рис. 4).

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{10}	a_{11}	a_{12}	0	a_{21}	0	a_{30}	0	a_{32}	0	0	0	a_{50}	0	a_{52}
Тройка 0 степени			Тройка 1 степени			Тройка 2 степени			Тройка 3 степени			Тройка 4 степени			Тройка 5 степени		

Рис. 4. Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживавшего полинома (Структура 2)

Если внутри проверяемой тройки элементов их значение превышает установленный пороговый уровень, то эта тройка элементов остается в составе вектора без изменений (тройки 0, 1 степени). Если внутри тройки проверяемый элемент превышает по значению пороговый уровень, то он остается в составе вектора коэффициентов сглаживающего полинома, а те элементы, значения которых ниже установленного порогового уровня, приравниваются к нулю (тройки 2, 3, 4, 5 степени). Процесс проверки значений элементов продолжается до тех пор, пока в составе очередной проверяемой тройки элементов, значения всех трёх элементов не окажутся выше установленного порогового уровня (тройка 1 степени). Все предшествующие элементы вектора считаются значимыми и принимаются равными оценкам соответствующих коэффициентов сглаживающего полинома.

Из работ [1, 3, 5, 6] известно, что применение Λ -ОБФ в алгоритме нелинейного сглаживания приводит к независимым оценкам коэффициентов сглаживающего полинома и некоррелированности их ошибок. Это позволяет, по аналогии с линейным адаптивным сглаживанием, решать задачу оптимизации степени или структуры сглаживающего полинома и при нелинейном сглаживании путём обнаружения того или иного элемента в составе вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома. При этом следует иметь в виду, что при нелинейном сглаживании данных многопараметрических измерений в векторе коэффициентов сглаживающего полинома при той же его степени (порядке) будет в три раза больше элементов, чем при линейном сглаживании. Это следует из структуры вектора коэффициентов сглаживающего полинома, позволяющего совместно описывать сразу все три координатные составляющие вектора вторичных параметров положения ЛА.

Как уже говорилось выше и изложено в работах [1, 3, 5, 6], использование Λ -ОБФ позволяет существенно упростить адаптивный алгоритм, так как при **подготовке** и проверке новой гипотезы нет необходимости пересоставлять и повторно решать систему уравнений. Данный вывод распространяется и на нелинейное сглаживание, так как в алгоритме нелинейного сглаживания линеаризация и построение Λ -ОБФ производится на каждом шаге приближения к максимально правдоподобной оценке положения ЛА в пространстве [7].

В связи с вышеизложенным, при обработке стохастических траекторий, возникает необходимость в применении критериев проверки статистических гипотез, не требующих полной априорной информации о характере траекторий. Такими критериями и методами проверки статистических гипотез о наличии или отсутствии того или иного коэффициента в составе вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома могут быть [8–15]: критерий минимума смещения, Фишера, Стьюдента, Пирсона, Лапласа-Гаусса, сохраняющие работоспособность при ограниченной априорной информации. Это обстоятельство имеет важное значение при стохастической траектории движения ЛА. В этом случае в качестве априорной информации выступает максимально возможная степень сглаживающего полинома, предположение о нормальном законе распределения оценок коэффициентов сглаживающего полинома и дисперсия быстро флуктуирующих ошибок измерений. Данные ограничения не являются сильными, так как из-за инерционности движения ЛА всегда можно указать такую степень (не очень большую), при которой выполняется условие $\hat{m} \leq m_{max}$, (где $\hat{m}$ – оптимальная степень сглаживающего полинома; m_{max} – максимально возможная степень сглаживающего полинома). Нормальность распределения оценок коэффициентов сглаживающего полинома обоснована ранее в работах [1, 3, 12, 13]. Что же касается дисперсии быстро флуктуирующих ошибок измерений, то в ряде методов (минимума смещения, Фишера, Стьюдента) она и не требуется, так как вместо нее используется оценка дисперсии [3, 9, 10, 16]. Различие методов проверки статистических гипотез состоит в использовании различных статистик, дисперсий ошибок или их оценок и применении различных критериев оптимальности, сводящихся, в основном, к минимизации вероятности ложного не обнаружения коэффициента при заданной вероятности ложного его обнаружения (заданной доверительной вероятности).

Общими для всех методов проверки статистических гипотез являются [3]:

- ◆ формирование по данным измерений соответствующей статистики;
- ◆ сравнение этой статистики с пороговым уровнем, зависящим от доверительной вероятности и числа степеней свободы;
- ◆ принятие решения о включении данного компонента в состав полинома.

Нелинейное сглаживание, в ходе которого автоматически определяется оптимальная степень или структура полинома, будем называть адаптивным нелинейным сглаживанием, поскольку при этом не только параметры, но и структура алгоритма сглаживания автоматически приспосабливается к стохастической форме траектории. Оптимальной степенью сглаживающего полинома считается структура вектора коэффициентов сглаживавшего полинома, в которую включены все элементы вектора до последнего значения, которые больше порога и в которой все компоненты незначимо отличные от нуля, заменены нулями [1, 3].

На базе работ [3, 17] исследовались перечисленные выше критерии оптимальности. Предпочтение отдается критерию Фишера, как более экономичному при определении статистики (нет операции извлечения корня).

Метод Фишера основан на критерии Фишера. В этом методе рассматривается статистика [3, 18]:

$$F_{1,v} = \frac{\hat{\alpha}_{\chi^k}^2}{\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{\chi^k}}^2} \quad (2)$$

представляющая отношение квадрата оценки коэффициента полинома к оценке его дисперсии (где $\chi=0, 1, 2; k=0, \dots, m_{max}$).

Причем $\hat{\alpha}_{\chi^k}^2$ и $\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{\chi^k}}^2$, входящие в состав (2), есть независимые случайные величины, распределенные по законам χ^2 с одной и V степенями свободы. Благодаря тому, что в алгоритме нелинейного сглаживания совместно реализуется пространственная и временная избыточность данных измерений, а оценка каждого коэффициента сглаживающего полинома находится по всему ряду измерений на интервале сглаживания, степень свободы будет определяться через весь ряд измерений, то есть

$$V = N \cdot n - 3(m_{max} + 1), \quad (3)$$

где N – количество обрабатываемых первичных координат;

n – число точек на интервале сглаживания;

m_{max} – максимально возможная степень сглаживающего полинома.

Следовательно, отношение (2) является случайной величиной, распределенной по закону Фишера со степенями свободы 1 и V .

При $\alpha_{\chi^k} = 0$ статистика (2) распределена по закону Фишера с параметром нецентральности равным нулю. Эта статистика с заданной доверительной вероятностью не превысит порогового уровня $F_{1,v,\alpha}$, определяемого с учетом заданного уровня α значимости (вероятности ложного обнаружения $\alpha = 1 - P$). Сравнивая статистику $F_{1,v}$ с пороговым уровнем $F_{1,v,\alpha}$, можно осуществить проверку гипотезы о равенстве нулю коэффициента α_{χ^k} . При этом, если действительно $\alpha_{\chi^k} = 0$, то с доверительной вероятностью $P = 1 - \alpha$ будет осуществлено правильное необнаружение коэффициента или с вероятностью α – ложное его обнаружение.

Если $\alpha_{\chi^k} \neq 0$, то получим множество распределений Фишера с параметрами нецентральности, не равным нулю. В этом случае сравнение статистики $F_{1,v}$ с тем же пороговым уровнем $F_{1,v,\alpha}$ с вероятностью β приводит к ложному необнаружению коэффициента и с вероятностью $(1 - \beta)$ – к правильному его обнаружению. Вероятность $(1 - \beta)$ называют мощностью критерия [3].

Экспериментальная часть. Учитывая вышеизложенное, проведем сравнительную оценку исследуемых методов. Исследование проводилось путём имитационного моделирования. Моделировались значения вторичных координат, которые по формулам простых методов [1], пересчитывались в первичные координаты с учетом местоположения и типа измерительных средств. Затем к полученным значениям первичных координат прибавлялись значения ошибок измерений, рас-

пределенных по нормальному закону. Полученные таким образом первичные данные измерений подвергались нелинейному адаптивному сглаживанию и идеальному сглаживанию. В качестве идеального (по точности и эффективности) сглаживания применялось нелинейное сглаживание методом наименьших квадратов при точно известной до обработки структуре полинома.

В ходе исследований определялись средние показатели качества и эффективности метода. Под показателем качества W_{ij} будем понимать выигрыш в точности, который представляет собой отношение среднеквадратической ошибки в i -ой точке j -траектории до и после сглаживания. Показатель эффективности μ_i определяет отношение приращения точности в i -ой точке j -траектории при сглаживании исследуемым методом к приращению точности при идеальном сглаживании. Более детально условия и порядок проведения эксперимента отображены в работах [19–22].

Результаты исследования сведены в табл. 1. Показатель эффективности при идеальном сглаживании $\mu = 1$.

Таблица 1

Показатели качества и эффективности исследуемых методов сглаживания

Кол-во точек на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:						ИС
	степени		структуры 1		структуры 2		
	<i>w</i>	<i>μ</i>	<i>w</i>	<i>μ</i>	<i>w</i>	<i>μ</i>	
25 По интервалу	3,35	0,95	3,45	0,97	3,44	0,97	3,74
На 3/5 интервала	3,67	0,96	3,76	0,97	3,76	0,97	4,08
На концах интервала	1,68	0,87	1,75	0,92	1,74	0,92	1,86
21 По интервалу	3,13	0,95	3,20	0,97	3,21	0,97	3,46
На 3/5 интервала	3,44	0,96	3,51	0,97	3,52	0,97	3,82
На концах интервала	1,71	0,90	1,76	0,94	1,75	0,93	1,85
17 По интервалу	2,63	0,92	2,73	0,94	2,68	0,93	3,00
На 3/5 интервала	2,91	0,94	3,02	0,96	2,97	0,95	3,29
На концах интервала	1,58	0,86	1,60	0,88	1,58	0,87	1,73
13 По интервалу	2,35	0,91	2,41	0,92	2,36	0,90	2,69
На 3/5 интервала	2,64	0,93	2,72	0,94	2,65	0,93	3,10
На концах интервала	1,57	0,90	1,58	0,90	1,54	0,85	1,66
9 По интервалу	2,06	0,93	2,17	0,97	2,09	0,94	2,21
На 3/5 интервала	2,35	0,95	2,45	0,97	2,34	0,94	2,50
На концах интервала	1,52	0,96	1,53	0,98	1,49	0,91	1,54
Координаты РЛС: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7' 2. X=0, Y=0, Z=7000; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'							

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Методы нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома превосходят по показателям качества и эффективности метод с оптимизацией степени сглаживающего полинома.

2. Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 превосходит по показателям качества и эффективности метод с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 2.

3. Наибольшие значения выигрыша в качестве и эффективности для всех исследуемых методов достигаются в средней части в пределах 3/5 интервала сглаживания.

4. Для всех исследуемых методов показатели качества и эффективности снижаются на краях интервала сглаживания.

Заключение. Проведено исследование разработанных методов нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией степени сглаживавшего полинома и с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 1 и Структура 2). Исследование проводилось путём имитационного моделирования. В исследуемых методах формирование вектора коэффициентов сглаживающего полинома осуществлялось на основе критериев Фишера в следующей последовательности: формирование по данным измерений соответствующей статистики; сравнение этой статистики с пороговым уровнем, зависящим от доверительной вероятности и числа степеней свободы; принятие решения о включении данного компонента в состав полинома.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы: методы нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома превосходят по показателям качества и эффективности метод с оптимизацией степени сглаживающего полинома; метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 превосходит по показателям качества и эффективности метод с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 2; наибольшие значения выигрыша в качестве и эффективности для всех исследуемых методов достигаются в средней части в пределах 3/5 интервала сглаживания; для всех исследуемых методов показатели качества и эффективности снижаются на краях интервала сглаживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Огоднийчук Н.Д.* Обработка траекторной информации. Ч. 1. – К.: КВВАИУ, 1981. – 141 с.
2. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторной информации. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.
3. *Щербов И.Л.* Исследование области определения параметров базисной функции двух аргументов при построении λ -ортогональной базисной функции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 6 (230). – С. 106-116.
4. *Щербов И.Л., Паслен В.В., Михайлов М.В., Мотылев К.И., Лебеденко Д.М., Антикуз А.Г.* О построении ортогональных базисных функций // Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, посвященная 1000-летию города Казани: Матер. конференции. Т. II. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2005. – С. 139-140.
5. *Щербов И.Л., Паслен В.В.* Обработка данных траекторного контроля с использованием ортогональных базисных функций // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – Вып. 1 (25). – С. 48-53.
6. *Огоднийчук Н.Д.* Обработка траекторной информации. Ч. II. – К.: КВВАИУ, 1986. – 224 с.
7. *Огоднийчук Н.Д., Паслен В.В.* Алгоритм совместной реализации пространственной и временной избыточности данных внешнетраекторных измерений // Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Вып. 3. – К.: КВВАИУ, 1989. – С. 85-89.
8. *Большев А.Н., Смиронов Н.В.* Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
9. *Яковлев А.А.* Статистические методы определения параметров движения летательных аппаратов по данным траекторных измерений // Эффективность обработки информации в системах траекторных измерений. – М.: Машиностроение, 1968. – 242 с.
10. *Лавренчик В.Н.* Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
11. *Мудров В.И., Кушко В.Л.* Методы обработки измерений: Квазиправдоподобные оценки. – М.: Радио и связь, 1983. – 304 с.
12. *Долинский Е.Ф.* Обработка результатов измерений по способу наименьших квадратов. – М.: Стандарты, 1971. – 110 с.
13. *Тьюки Дж.* Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ: пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1981. – 693 с.
14. *Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
15. *Розанов Ю.А.* Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика: учебник для вузов. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1989. – 320 с.
16. *Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 56 с.

17. *Огоднийчук Н.Д.* О прикладных методах анализа траекторной информации // Сб. материалов НТК, посвященной 25-летию училища. Ч. 1. – К.: КВВАИУ, 1977. – С. 65-84.
18. *Румишинский Л.З.* Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
19. *Щербов И.Л.* Исследование алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений // Информатика и кибернетика, – 2020. – № 4 (22). – С. 5-12.
20. *Щербов И.Л.* Информационная технология обработки данных траекторного контроля // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г: Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 71-77.
21. *Щербов И.Л.* Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2023. – Т. 28. – Вып. 3. – С. 378-384.
22. *Щербов И.Л.* Математическое моделирование обработки данных траекторного контроля // Матер. международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения национальной безопасности в условиях современности» (17 декабря 2020 г.). – Донецк, 2020. – С. 25-32.

REFERENCES

1. *Ogodniychuk N.D.* Obrabotka traektornoy informatsii [Processing of trajectory information]. Part 1. Kiev: KVVAIU, 1981, 141 p.
2. *Zhdanyuk B.F.* Osnovy statisticheskoy obrabotki traektornoy informatsii [Fundamentals of statistical processing of trajectory measurements]. Moscow: Sov. radio, 1978, 384 p.
3. *Shcherbov I.L.* Issledovanie oblasti opredeleniya parametrov bazisnoy funktsii dvukh argumentov pri postroenii λ -ortogonal'noy bazisnoy funktsii [Study of the area of determination of parameters of the basis function of two arguments in constructing the Λ -orthogonal basis function], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6 (230), pp. 106-116.
4. *Shcherbov I.L., Paslen V.V., Mikhaylov M.V., Motylev K.I., Lebedenko D.M., Antikuz A.G.* O postroenii ortogonal'nykh bazisnykh funktsiy [About the construction of orthogonal basis functions], *Tupolevskie chteniya: Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya, posvyashchennaya 1000-letiyu goroda Kazani: Mater. konferentsii* [Tupolev readings: International youth scientific conference dedicated to the 1000th anniversary of the city of Kazan: Conference materials]. Vol. II. Kazan': Kazan. gos. tekhn. un-t, 2005, pp. 139-140.
5. *Shcherbov I.L., Paslen V.V.* Obrabotka dannykh traektornogo kontrolya s ispol'zovaniem ortogonal'nykh bazisnykh funktsiy [Trajectory control data processing using orthogonal basis functions], *Vestnik Akademii grazhdanskoy zashchity* [Vestnik of the Academy of Civil Protection], 2021, Issue 1 (25), pp. 48-53.
6. *Ogodniychuk N.D.* Obrabotka traektornoy informatsii [Processing of trajectory information]. Part II. Kiev: KVVAIU, 1986, 224 p.
7. *Ogodniychuk N.D., Paslen V.V.* Algoritm sovmestnoy realizatsii prostranstvennoy i vremennoy izbytochnosti dannykh vneshnetraektornykh izmereniy [Algorithm for the joint implementation of spatial and temporal redundancy of data of external trajectory measurements], *Radioelektronnoe oborudovanie letatel'nykh apparatov* [Electronic equipment of aircraft], Issue 3. Kiev: KVVAIU, 1989, pp. 85-89.
8. *Bol'shev A.N., Smironov N.V.* Tablitsy matematicheskoy statistiki [Tables of mathematical statistics]. Moscow : Nauka, 1965, 474 p.
9. *Yakovlev A.A.* Statisticheskie metody opredeleniya parametrov dvizheniya letatel'nykh apparatov po dannym traektornykh izmereniy [Statistical methods for determining the parameters of aircraft motion according to trajectory measurements], *Effektivnost' obrabotki informatsii v sistemakh traektornykh izmereniy* [Efficiency of information processing in systems of trajectory measurements]. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 242 p.
10. *Lavrenchik V.N.* Postanovka fizicheskogo eksperimenta i statisticheskaya obrabotka ego rezul'tatov: ucheb. posobie dlya vuzov [Setting up a physical experiment and statistical processing of its results: proc. allowance for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 272 p.
11. *Mudrov V.I., Kushko V.L.* Metody obrabotki izmereniy: Kvazipravdopodobnye otsenki [Methods for processing measurements: Quasi-plausible estimates]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 304 p.

12. Dolinskiy E.F. Obrabotka rezul'tatov izmereniy po sposobu naimen'shikh kvadratov [Processing of measurement results by the method of least squares]. Moscow: Standarty, 1971, 110 p.
13. Tyuki Dzh. Analiz rezul'tatov nablyudeniya. Razvedochnyy analiz [Analysis of the results of observations. Exploratory analysis]: transl. from engl. Moscow: Sov. radio, 1981, 693 p.
14. Boks Dzh., Dzhenkins G. Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie [Analysis of time series. Forecast and management]. Moscow: Mir, 1974, 406 p.
15. Rozanov Yu.A. Teoriya veroyatnostey, sluchaynye protsessy i matematicheskaya statistika: uchebnik dlya vuzov [Probability theory, random processes and mathematical statistics: textbook for universities]. 2nd ed., add. Moscow: Nauka, 1989, 320 p.
16. Anderson T. Statisticheskyy analiz vremennykh ryadov [Statistical analysis of time series]. Moscow: Mir, 1976, 56 p.
17. Ogodniychuk N.D. O prikladnykh metodakh analiza traektornoy informatsii [About applied methods of analyzing trajectory information], *Sb. materialov NTK, posvyashchenoy 25-letiyu uchilishcha* [Collection of materials of the Scientific and Technical Committee dedicated to the 25th anniversary of the school]. Part 1. Kiev: KVVAIU, 1977, pp. 65-84.
18. Rumshinskiy L.3. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta [Mathematical processing of experiment results]. Moscow: Nauka, 1971, 192 p.
19. Shcherbov I.L. Issledovanie algoritma adaptivnogo nelineynogo optimal'nogo sglazhivaniya mnogoparametricheskikh dannykh izmereniy [Study of the adaptive nonlinear optimal smoothing algorithm for multi-parameter measurement data], *Informatika i kibernetika* [Informatics and cybernetics], 2020, No. 4 (22), pp. 5-12.
20. Shcherbov I.L. Informatsionnaya tekhnologiya obrabotki dannykh traektorного kontrolya [Information technology for data processing of trajectory control], *Vestnik Donetskogo natsional'nogo universiteta. Ser. G: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of the Donetsk National University. Series G: Technical sciences], 2021, No. 1, pp. 71-77.
21. Shcherbov I.L. Aprobatsiya raboty algoritma adaptivnogo nelineynogo optimal'nogo sglazhivaniya mnogoparametricheskikh dannykh traektornykh izmereniy [Approbation of the algorithm of adaptive nonlinear optimal smoothing of multi-parameter data of trajectory measurements], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2023, Vol. 28. Issue 3, pp. 378-384.
22. Shcherbov I.L. Matematicheskoe modelirovanie obrabotki dannykh traektorного kontrolya [Mathematical modeling of trajectory control data processing], *Mater. mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy obespecheniya natsional'noy bezopasnosti v usloviyakh sovremennosti» (17 dekabrya 2020 g.)* [Proceedings of the international scientific-practical conference "Actual problems of ensuring national security in modern conditions" (December 17, 2020)]. Donetsk, 2020, pp. 25-32.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Щербов Игорь Леонидович – Донецкий национальный технический университет; e-mail: scherbov@yandex.ru; г. Донецк, ДНР; проректор.

Shcherbov Igor Leonidovich – Donetsk National Technical University; e-mail: scherbov@yandex.ru; Donetsk, DPR; vice rector.

Раздел III. Моделирование процессов и систем

УДК 681.516.73:004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-144-157

В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук

МОДЕЛЬ ОБРАБОТКИ ЗАЯВОК И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО СКЛАДА

Целью данной работы является разработка модели обработки заявок и распределения задач между роботами, которые обслуживают роботизированный склад. Данное исследование является актуальным в свете увеличения количества складских площадей, появления магазинов без покупателей (дарксторов) и популяризации покупок через среду Интернет, что требует привлечения роботов для решения транспортных задач при компоновке заказов. Для достижения поставленной цели в работе решена задача концептуального представления роботизированного склада в виде системы массового обслуживания, что позволяет использовать ее показатели качества для совершенствования транспортных процессов. Модели системы управления одиночным роботом и поступления и обработки заказов представлены в виде конечных автоматов, что упрощает модельные эксперименты и дальнейшую реализацию в бортовых вычислителях роботов. Предложен критерий оценки длительности выполнения заказов роботами, включающий несколько типов и позиций товаров в заказе, что позволяет осуществлять обработку одного заказа несколькими роботами одновременно. При этом, маршрут каждого робота представляется совокупностью участков пути между точками сбора отдельных товаров, описанный в виде упорядоченных перестановок. Такое представление позволило сформулировать систему неравенств, на основе которых формируются маршруты нескольких роботов для обработки одного заказа. Разработаны алгоритмы распределения задач для бортового вычислителя робота и центрального сервера склада. Наибольшая вычислительная нагрузка лежит на сервере, так как все возможные перестановки для каждого заказа вычисляются именно там. Экспериментальные исследования на имитационной модели показали высокую эффективность разработанных моделей и алгоритмов.

Роботизированный склад; планирование траекторий; распределение задач; конечный автомат; машина состояний.

V.V. Soloviev, A.Ya. Nomerchuk

A MODEL FOR PROCESSING APPLICATIONS AND DISTRIBUTING TASKS FOR A ROBOTIC WAREHOUSE

The purpose of this work is - development of a model for processing applications and distributing tasks between robots that serve a robotic warehouse. This research is relevant due to increase number of warehouse space, the appearance of stores without buyers (darkstores) and the popularization of purchases through the Internet, which requires the involvement of robots to solve transport problems when arranging orders. To achieve this goal, in this work solves the problem of conceptual representation of a robotic warehouse in the form of a queuing system, which allows using its quality indicators to improve transport processes. Models of the control system of a single robot and processing of orders are presented in the form of finite state machine, which simplifies model experiments and further implementation in onboard robot computers. Propose the criterion for evaluating the duration of the execution of orders by robots, including several types and positions of product in the order, is proposed, which allows processing one order by several robots at the same time. The route of each robot is represented by a set of sections of

the path between the collection points of individual products, described in the form of ordered permutations. Such representation made it possible to define a system of inequalities, on the basis of which routes of several robots for processing one order are formed. Algorithms for the distribution of tasks for the robot's onboard computer and the central warehouse server have been developed. The greatest computational load lies on the server because all possible permutations for each order are calculated there. Experimental researches on the simulation model have shown the high efficiency of the developed models and algorithms.

Robotic warehouse; trajectory planning; task allocation; finite state machine; state machine.

Введение. Можно считать толчком развития роботизации складов внедрение компанией Amazon складских роботов [1]. На сегодняшний день на складах компании трудятся более 10 тыс. автономных роботов и тенденция наращивания роботизации продолжает развиваться. Непосредственное влияние на этот процесс оказала пандемия, в результате которой резко увеличились объемы on-line торговли. Единственным способом снижения логистических издержек для крупных сетевых компаний является роботизация и цифровизация складов.

По результатам роботизации складов в компании Amazon получены следующие результаты:

- ◆ снижение длительности рабочего цикла с 60 минут до 10 минут;
- ◆ сокращение расходов на содержание складов на 20%;
- ◆ увеличение количества хранимых товаров на складах на 50%;
- ◆ снижение ошибок и аварий.

Автоматизация складов является эффективной и экономически выгодной для компаний со складами, на которых происходит активное движение товаров. Роботизация складов востребована в сортировочных центрах, транспортных компаниях, логистических центрах, железнодорожных узлах и аэропортах. Это позволит высвободить большое количество персонала, сократить количество временно нанимаемых работников, увеличить оборот товаров за счет снижения операционного времени. Бурный рост роботизации складов показывает, что это – неизбежная перспектива дальнейшего развития, в том числе, и в нашей стране.

Задачам автоматизации складов посвящены многочисленные, преимущественно зарубежные, публикации. Авторы работы [2] представили алгоритм управления роботами для автоматизированного склада. В качестве критерия оптимальности перемещения использовался квадратичный критерий для минимизации ошибки управления и затрат энергии.

В статье [3] авторы рассматривали проблему целераспределения между группой роботов автоматизированного склада. Данную проблему авторы декомпозировали на три задачи: группировка, планирование и распределение. Все три задачи формализованы в виде задач линейного программирования, для которых предложены эвристические алгоритмы решения.

В работе [4] рассмотрена задача сортировки посылок группой автономных роботов и ее решение с использованием генетических алгоритмов. Представлена формализация среды функционирования группы роботов в виде регулярной сетки. Задача сформулирована при условии различного соотношения роботов, посылок и целевых точек сортировки. В системе планирования пути перемещения роботов реализован уровень глобального планирования маршрута к целевой точке и уровень локального планирования для исключения с препятствиями и другими роботами. В этом случае задача сортировки сведена к решению задачи размещения.

Авторы работы [5] рассмотрели особенности роботизации складов. Представлена классификация складских систем для автоматического перемещения товаров, включающая краны, тележки, транспортеры, роботов и лифты. Представлены возможные модели описания роботизированных складов, включая сетевые модели взаимодействия.

В работе [6] рассмотрена задача планирования траектории движения складского мобильного робота. Склад формализован в виде двумерной координатной плоскости. Предлагается метод планирования перемещения роботов на сетке и представлены результаты моделирования в среде MatLab для случая перемещения трех роботов.

В работе [7] рассматривалась гетерогенная группа роботов для склада, включающая наземную платформу для перемещения грузов и квадрокоптер для сканирования штрих-кодов с товаров. Проведены аналитические и экспериментальные исследования системы связи, навигации и позиционирования. Разработан алгоритм оптимизации полета квадрокоптера для минимизации длины маршрута.

Volu и Omer в статье [8] представили адаптивную систему планирования задач в группе роботов на складе. Отмечено, что при планировании задач необходимо учитывать ограничения количества роботов, количества зарядных станций, количества и последовательности поступающих заявок на перемещение товаров, текущие позиции роботов и прочее. Авторы предлагают помещать новые заказы в пул заказов, которые далее конвертировать в пул задач для роботов и затем выполнять назначение роботов на задачи. Склад представлялся в виде полностью определенной двумерной сетки. При выборе задачи для назначения роботу определялся ее приоритет.

В работе [9] представлен способ планирования задач в группе роботов на складе. Склад представлен в виде графа, узлы которого представляют возможные позиции для движения роботов. Ребра графа обладают различной стоимостью в зависимости от расстояния, которое нужно преодолеть роботам между узлами. В качестве метода поиска на графе и назначения задачи авторы предлагают использовать метод Монте-Карло. Модельные эксперименты проводились для 8 роботов в группе и склада на 200 полок с товарами.

Работа [10] посвящена решению проблемы децентрализованного планирования задач и маршрутов перемещения роботов на складе. Каждая задача представлялась в виде Марковского процесса с учетом ограничений, накладываемых окружающей средой и возможностями роботов. Для планирования маршрутов предложен метод поиска на графе, отличающийся возможностью учитывать маршруты других роботов, чтобы избежать коллизий.

В публикации [11] представлен вычислительно эффективный алгоритм планирования маршрута робота на складе и адаптивный генетический алгоритм назначения задач. Склад представлен в виде двумерной матрицы. Разработана система автоматизации склада, включающая распределитель задач в виде централизованного сервера.

Работа [12] посвящена проблеме планирования маршрутов в группах роботов с учетом кинематических ограничений. Среда функционирования роботов представлялась в виде двумерной матрицы и формализовывалась в виде графа состояний. Решалась задача перемещения нескольких групп роботов в среде с препятствиями. Для этого предложено строить граф перемещения роботов с учетом скоростей движения.

Авторы статьи [13] рассмотрели проблему планирования действий для роботов в мультиагентной системе для склада. Склад представлен в двумерном виде. Задача группы роботов заключалась в перемещении товаров с полок к нескольким местам выдачи. Для каждого робота составлен список элементарных действий, которые он может выполнить в текущий момент времени.

По результатам обзора публикаций можно сделать следующие выводы:

♦ процесс обработки заявок роботами можно представить в виде системы массового обслуживания;

- ♦ распределение задач между роботами на складе необходимо выполнять с учетом ограничений и критерия минимизации времени их решения;
- ♦ необходимо согласовывать между разными роботами процедуру обработки одной заявки.

В связи с этим в данной работе предложена концептуальная модель обработки заявок и распределения задач между роботами в парадигме систем массового обслуживания.

Постановка задачи. Задачу разработки моделей и алгоритмов рассмотрим применительно для роботизированного склада с мобильными роботами, обрабатывающими поступающие заказы и доставляющие товары в зону выдачи.

Дано:

- ♦ роботизированный склад в двумерном представлении, разделенный на ячейки размером 1×1 м;
- ♦ N мобильных роботов с дискретным перемещением по ячейкам;
- ♦ поток заказов из K -товаров и L -позиций каждого товара.

Требуется:

- ♦ разработать концептуальную модель роботизированного склада в виде системы массового обслуживания;
- ♦ предложить модели системы управления и поступления и обработки заказов роботом в виде конечных автоматов;
- ♦ сформулировать критерий оценки длительности выполнения заказов роботами склада;
- ♦ разработать алгоритмы распределения задач между роботами и обработки задач на сервере склада;
- ♦ провести модельные эксперименты и оценить эффективность предложенных решений.

Описание моделей и алгоритмов. В соответствии с проведенным обзором литературы роботизированный склад можно рассматривать как систему массового обслуживания [14, 15] с несколькими обслуживающими каналами (роботами). Также необходимо учитывать, что несколько роботов могут собирать заказ параллельно или один робот может собирать заказ из нескольких компонентов последовательно.

Для описания потока заказов на роботизированный склад определим интервал времени $\tau_k = t_k - t_{k-1}$ между поступлением заказов. Среднее количество заказов, которое приходит на склад, определяет интенсивность l . Так как заказы поступают не регулярно будем рассматривать случайный поток. Кроме того, в зависимости от времени суток может меняться интенсивность потока заказов, следовательно, поток является нестационарным. Заказы поступают независимо друг от друга, а также могут поступать одновременно, что характеризует поток, как групповой поток без последствия.

Так как заказы на склад могут быть разными по объему, длительность обслуживания заказов роботами можно описать плотностью распределения $b(t)$, а из нее определить интенсивность обслуживания $\mu = 1/\bar{b}$, где $\bar{b}$ – среднее число заявок, которые могут обслужить роботы в единицу времени.

Время обслуживания заказа роботом T_0 определяется интервалом от момента поступления заказа до завершения его выполнения.

При разработке модели обработки заказов будем предполагать, что отсутствует приоритет между разными заказами, т.е. все заказы беспriorитетные.

Также предположим, что длина очереди заказов не ограничена. В первом приближении будем считать, что один заказ может быть назначен только одному роботу и не может обрабатываться группой. Кроме этого, заказы обслуживаются роботами в порядке поступления, то есть очередь из заказов формируется по типу буфера FIFO.

В роботизированном складе следует рассматривать однородный поток заказов из-за того, что несмотря на разный объем заказов, их могут обслуживать любые роботы.

В связи с ранее изложенными положениями можно предложить следующую схему системы массового обслуживания (СМО) и временную диаграмму для роботизированного склада, представленные на рис. 1.

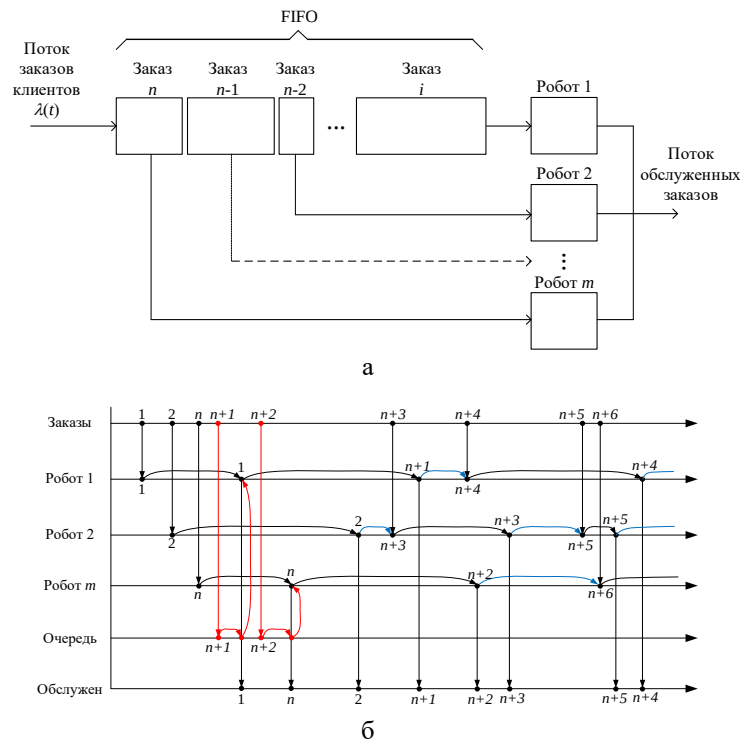


Рис. 1. Схема СМО (а) и временная диаграмма (б) роботизированного склада

Согласно приведенной временной диаграмме, заказы последовательно выполняются роботами. В силу того, что типы и количество товаров в заказе различаются, то и длительность обработки заказов роботами разная. В том случае, если все роботы заняты обработкой заказов, то формируется очередь (заказы $n+1$ и $n+2$). Как только роботы высвобождаются, то заказы из очереди начинают обрабатываться. Если приходит новая заявка и очередь не пустая, то согласно концепции FIFO она помещается в конец очереди. Также возможны простои роботов при отсутствии новых заказов и пустой очереди (робот 1: между заказами $n+1$ и $n+4$, после заказа $n+4$; робот 2: между заказами 2 и $n+3$, между заказами $n+3$ и $n+5$, после заказа $n+5$; робот m : между заказами $n+2$ и $n+6$).

В соответствии с разработанной схемой и временной диаграммой СМО требуют решения следующие задачи:

- ◆ минимизация времени простоя роботов;
- ◆ определение оптимальных мест размещения роботов при ожидании заказов;
- ◆ минимизация времени нахождения заказов в очереди.

В качестве общих критериев оценки эффективности работы роботизированного склада можно выбрать следующие:

- ◆ количество обработанных заказов роботами за заданное время T ;

- ♦ длительность простоя каждого робота;
- ♦ суммарная длительность простоя роботов;
- ♦ максимальная длина очереди;
- ♦ длительность обработки заказов каждым роботом;
- ♦ суммарная длительность обработки заказов за время T .

В соответствии с рассмотренными теоретическими положениями предлагается следующая формальная модель СМО для роботизированного склада:

$$S = \langle L, X, Y, R, T \rangle, \quad (1)$$

где $L = \{v, p\}_{t_i} - v, p$ – объем и приоритет заказа, поступившего в дискретный момент времени $t_i \in T$;

$X = \{s_{kj}, \tau\}$, – s_{kj} – состояние k -го робота ($j=1, 2, 3$, $s_{k1} = 0$ – k -й робот свободен; $s_{k2} = 1$ – k -й робот занят; $s_{k3} = -1$ – k -й робот вышел из строя), τ – оценка времени выполнения заказа;

Y – загруженность склада в дискретный момент времени t_i ;

R – правила назначения заказов;

T – время моделирования.

Опираясь на (1), разработана модель системы управления роботом в виде конечного автомата [16], представленная на рис. 2. Согласно модели выделен перечень возможных событий: ек1 – заказ не назначен, ек2 – заказ назначен, ек3 – заказ выполнен, ек4 – сбой в системе, ек5 – заказ не выполнен, ек6 – робот восстановлен.

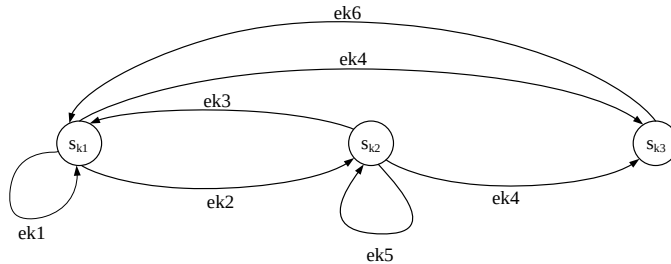


Рис. 2. Модель системы управления роботом в виде конечного автомата

Модель поступления и обработки заказов может быть представлена в виде конечного автомата, изображенного на рис. 3. В соответствии с моделью поступления и обработки заказов предусмотрен следующий перечень состояний: s_1 – ожидание заказа, s_2 – обработка заказа, s_3 – постановка заказа в очередь, s_4 – передача заказа k -му роботу, s_5 – завершение заказа и возможных событий: e_1 – заказ не поступил, e_2 – заказ поступил, e_3 – все роботы заняты, e_4 – появился свободный робот, e_5 – есть свободный робот, e_6 – заказ не выполнен, e_7 – заказ выполнен.

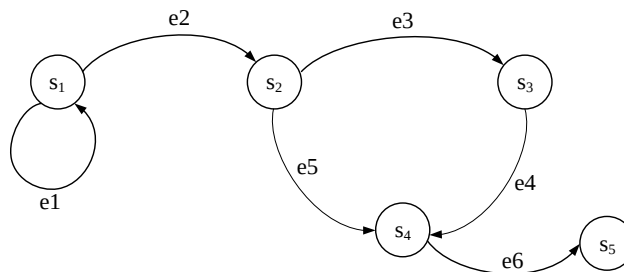


Рис. 3. Модель поступления и обработки заказов

Представленные модели основаны на соображении, что заказ назначается любому свободному роботу. Современные склады занимают большую площадь и нецелесообразно размещать роботов во время ожидания в одном месте, а распределить по нескольким позициям. В связи с этим появляется задача распределения задач между роботами [17, 18], чтобы минимизировать время обработки заказов и уменьшить загруженность роботизированной системы.

В силу того, что задачи между роботами должны распределяться по мере поступления заказов, то необходимо применять алгоритмы, которые показывают высокое быстродействие и способны работать практически в реальном времени.

В качестве такого алгоритма можно рассматривать Венгерский алгоритм распределения задач или целей [19], который ориентирован на минимизацию затрат на их выполнение (достижение), но в условиях роботизированного склада его применение может быть неэффективно. Это обусловлено тем, что поток заказов можно рассматривать последовательно и каждый раз решать задачу назначения одного заказа в рамках группы роботов. Такую постановку можно обосновать также и тем, что после того, как роботу назначено выполнение заказа, он может приступить к следующему заказу только после выполнения текущего.

В связи с этим при поступлении заказа каждый робот должен рассчитать длительность его выполнения и предоставить данные на сервер, где заказ будет назначен роботу с минимальной длительностью выполнения [20].

Положим, что любой заказ может содержать K -типов товаров по L -позиций каждого товара.

В такой постановке можно предложить следующую оценку длительности выполнения поступившего заказа каждым роботом:

$$T = \sum_{j=1}^K \left(\frac{d_j}{v} + L_j \cdot t_{L_j} \right) + \frac{d_g}{v} + t_u, \quad (2)$$

где d_j – пройденный путь роботом до стеллажа с j -м товаром;

v – скорость движения робота;

t_{L_j} – время погрузки j -го товара на робота;

d_g – пройденный путь роботом до зоны выдачи заказа;

t_u – длительность разгрузки робота.

Рассмотрим один заказ, в котором нужно собрать 3 товара на складе с двумя роботами. Возможны следующие варианты обработки заказов роботами: один робот обрабатывает заказ в произвольном порядке; два робота обрабатывают заказ в произвольном порядке. Поэтому возникает задача определения оптимального пути перемещения до стеллажей с товарами.

Рассмотрим задачу обработки заказа одним роботом. Ее можно рассмотреть, как задачу поиска на графе:

$$G = (V, E), \quad (3)$$

где V – множество вершин;

E – множество ребер.

В роботизированном складе вершины графа – это позиции товаров на полках, которые нужно собрать роботу в заказе, а ребра – это маршруты следования робота между позициями товаров. Тогда маршрут робота при выполнении заказа – это последовательность ребер графа, которые необходимо обойти. Очевидно, что таких путей может быть множество.

Рассмотрим множество маршрутов робота при обработке заказа в терминах комбинаторики [21]. Перестановка ($p_i \in P$) – это комбинация элементов из E взятых в определенном порядке. При этом первым $e_0 \in E$ и последним $e_i \in E$ элементом в перестановках обязательно должен быть путь из стартовой позиции робота и путь

к зоне выдачи заказа, соответственно. Для успешного выполнения заказа необходимо, чтобы все элементы из E были задействованы в перестановках по одному разу. Пусть мощность множества E равна n , тогда общее количество всех возможных упорядоченных перестановок может быть найдено как $K = n!$.

Таким образом, для поиска кратчайшего маршрута выполнения заказа одним роботом необходимо:

- 1) найти все возможные упорядоченные перестановки без повторений;
- 2) вычислить длины маршрутов для каждой перестановки;
- 3) выбрать перестановку с маршрутом наименьшей длины.

Для рассмотренного примера обработки заказа из трех товаров можно получить шесть ($K=3!$) упорядоченных перестановок без повторений для робота №1:

$$P_0 = \{(1, 2, 3), (1, 3, 2), (2, 1, 3), (2, 3, 1), (3, 1, 2), (3, 2, 1)\},$$

которые нужно дополнить зоной стартовой позиции робота и зоной выдачи товара:

$$P_f = \{(0, 1, 2, 3, 4), (0, 1, 3, 2, 4), (0, 2, 1, 3, 4), \\ (0, 2, 3, 1, 4), (0, 3, 1, 2, 4), (0, 3, 2, 1, 4)\},$$

Для каждого элемента из P_f можно вычислить длины маршрутов:

$$L_{f1} = \{l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{14}, l_{15}, l_{16}\},$$

и найти среди них наименьший:

$$l_{\min 1} = \min\{l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{14}, l_{15}, l_{16}\}.$$

Перестановка с маршрутом наименьшей длины $P_{f1}(l_{\min 1})$ будет оптимальным маршрутом робота №1 для обработки заказа.

Очевидно, что если заказ обрабатывают два робота, то $P_{f1} = P_{f2}$, но длины маршрутов робота №2 будут другими из-за разных стартовых позиций роботов. Совместная обработка заказов предусматривает, что часть заказа будет обрабатываться роботом №1, а другая часть – роботом №2. В связи с этим, рассмотрим длины подмаршрутов в маршруте $l_{\min 1}$:

$$l_{\min 1} = l_0 + l_1 + l_2 + l_3.$$

Так как робота два, то рассмотрим половину длины маршрута $l_{\min 1}/2$, которая может удовлетворять следующим неравенствам:

$$l_{\min 1}/2 \leq l_0, \quad (5)$$

$$l_{\min 1}/2 \leq l_0 + l_1, \quad (6)$$

$$l_{\min 1}/2 \leq l_0 + l_1 + l_2, \quad (7)$$

$$l_{\min 1}/2 \leq l_3. \quad (8)$$

Неравенство (5) показывает, что маршрут следования из стартовой позиции робота №1 к первому товару l_0 существенно длиннее остальных подмаршрутов, как представлено на рис. 4,а.

Неравенство (8) показывает, что маршрут следования робота №1 из позиции последнего товара к зоне выдачи заказа l_3 существенно длиннее остальных подмаршрутов, как представлено на рис. 4,б.

В первом случае для совместного выполнения заказа, робот №1 может выполнить последовательность $P_{f1} = (0, 1, 4)$, а робот №2 – $P_{f2} = (0, 2, 3, 4)$.

Во втором случае для совместного выполнения заказа, робот №1 может выполнить последовательность $P_{f1} = (0, 1, 2, 4)$, а робот №2 – $P_{f2} = (0, 3, 4)$.

В остальных случаях, когда $l_{\min 1}/2$ удовлетворяет неравенствам (6) или (7), для робота №1 назначается последовательность переходов, удовлетворяющая неравенствам, а для робота №2 – оставшиеся переходы для полного выполнения за-

каза. Аналогичные рассуждения можно развить на случай большего количества роботов, обрабатывающих один заказ. Наименьший маршрут обработки заказа одним роботом следует выбирать для разделения между другими роботами склада.

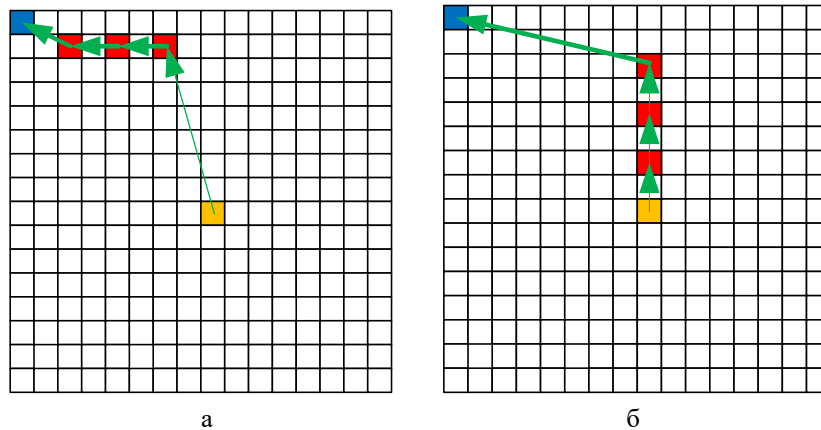


Рис. 4. Конфигурация склада для неравенств (5) и (8)

Алгоритм распределения задач для i -го робота имеет следующую последовательность шагов:

Шаг 1. Ожидание поступления заказа с сервера склада. Если заказ получен, то переход к шагу 2.

Шаг 2. Считывание массива последовательностей перехода на маршрутах P_f .

Шаг 3. Расчет длины маршрутов L_f .

Шаг 4. Выбор маршрута минимальной длины $l_{\min i}$ и оценка времени T_i выполнения заказа на данном маршруте.

Шаг 5. Передача $l_{\min i}$ и T_i на сервер склада.

Шаг 6. Ожидание ответа сервера. Если ответ получен, то переход к шагу 7.

Шаг 7. Расчет всех возможных подмаршрутов P_{ni} длиной не более l_n .

Шаг 8. Расчет длительности T_{ni} выполнения для всех подмаршрутов из P_{ni} .

Шаг 9. Перебор массива $T_{ni} \rightarrow T_{nj}$ и исключение маршрутов с $T_{ni} \geq T_i$.

Шаг 10. Передача T_{nj} и P_{nj} на сервер склада.

Шаг 11. Ожидание получения подмаршрута с сервера склада. Если подмаршрут получен, то переход к шагу 12.

Шаг 12. Передача полученного подмаршрута P_n в алгоритм планирования пути робота.

Алгоритм распределения задач на сервере склада имеет следующую последовательность шагов:

Шаг 1. Передача всем свободным роботам массива последовательностей P_f обработки поступившего заказа.

Шаг 2. Проверка ответов роботов. Если все свободные роботы ответили, то переход к шагу 3.

Шаг 3. Определение минимального пути $l_{\min j}$ среди всех переданных роботами.

Шаг 4. Запрос у j -го робота последовательности переходов P_{fj} .

Шаг 5. Ожидание ответа j -го робота. Если робот ответил, то переход к шагу 6.

Шаг 6. Расчет длины максимального участка маршрута l_n в заказе для каждого робота.

Шаг 7. Передача свободным роботам максимального времени выполнения заказа T_i , длины максимального участка маршрута l_n , последовательности переходов P_{fj} .

Шаг 8. Проверка ответов от свободных роботов. Если все роботы ответили, то переход к шагу 9.

Шаг 9. Проверка: есть ли среди массивов T_{nj} пустые. Если у роботов есть пустые массивы, то переход к шагу 10.

Шаг 10. Определение количества M незадействованных роботов.

Шаг 11. Изменение количества свободных роботов $N = N - M$.

Шаг 12. Запуск Венгерского алгоритма для распределения подмаршрутов P_{nk} среди свободных роботов.

Шаг 13. Передача P_{nk} свободным роботам.

В алгоритме используется вложение Венгерского алгоритма, который является алгоритмом оптимизации для решения задачи о назначениях за полиномиальное время. Кроме того, Венгерский алгоритм уже реализован на большинстве языков высокого уровня, включая MATLAB, что существенно упрощает реализацию метода распределения задач между роботами.

Результаты экспериментов. Для исследования метода распределения задач разработана программа в среде MatLab. Роботы размещались в центре склада и должны доставить заказ в зону выдачи, размещенную в углу.

Эксперимент 1. Дано два робота с координатами $p_{s1} = (25, 25)$ и $p_{s2} = (26, 25)$, соответственно. Необходимо распределить заказ между роботами и товарами, расположенными на стеллажах:

$$[(14, 18); (15, 18); (13, 33); (19, 45)].$$

Как видно из заказа, роботам нужно посетить 4 стеллажа с товарами и доставить заказ в зону выдачи. Сначала получены все возможные неповторяющиеся упорядоченные перестановки участков маршрута:

4	3	2	1	3	2	4	1	2	1	4	3
4	3	1	2	3	2	1	4	2	1	3	4
4	2	3	1	3	1	4	2	1	4	3	2
4	2	1	3	3	1	2	4	1	4	2	3
4	1	3	2	2	4	3	1	1	3	4	2
4	1	2	3	2	4	1	3	1	3	2	4
3	4	2	1	2	3	4	1	1	2	4	3
3	4	1	2	2	3	1	4	1	2	3	4

в количестве 24 шт. для каждого робота. Затем найдены длины всех маршрутов и найден маршрут минимальной длины 29,55 м:

$L_{\min} = (13,42 \text{ м}, 15,13 \text{ м}, 1,00 \text{ м})$, которому соответствует перестановка:

$$P_{\text{opt}} = (4 \quad 3 \quad 2 \quad 1),$$

и последовательность координат точек: $P = [(19, 45), (13, 33), (15, 18), (14, 18)]$.

Так как роботов два, то предельная длина подмаршрута с 10% запасом – 16,25 м. На основании этого условия найдены все возможные последовательности переходов: $P_{e1} = [(19, 45), (13, 33)]$; $P_{e2} = [(13, 33), (15, 18)]$; $P_{e3} = [(13, 33), (15, 18), (14, 18)]$; $P_{e4} = [(15, 18), (14, 18)]$.

Из представленного перечня переходов единственный маршрут для двух роботов при выполнении заказа образуют: $P_{e1} + P_{e4} = P$, а длины подмаршрутов равны 13,42 м и 1,00 м, соответственно, что на 52% меньше первоначальной длины минимального маршрута для одного робота. После получения подмаршрута в бортовых вычислителях роботов выполняется поиск всех упорядоченных перестановок, чтобы минимизировать путь сбора заказа. Маршруты перемещения роботов представлены на рис. 5,а.

Эксперимент 2. Дано три робота с координатами $p_{s1} = (25, 25)$, $p_{s2} = (26, 25)$ и $p_{s3} = (27, 25)$, соответственно. Необходимо распределить заказ между роботами и товарами, расположенными на стеллажах:

$$[(1, 6), (14, 28), (35, 40), (49, 13), (14, 32), (2, 27), (39, 3), (19, 4)].$$

Как видно из заказа, роботам нужно посетить 8 стеллажей с товарами и доставить заказ в зону выдачи. Сначала получены все возможные неповторяющиеся упорядоченные перестановки участков маршрута в количестве 40320 шт.

Затем найдены длины всех маршрутов и найден маршрут минимальной длины 111,82 м:

$L_{\min} = (14,14 \text{ м}, 20,03 \text{ м}, 18,11 \text{ м}, 21,02 \text{ м}, 12,04 \text{ м}, 4,00 \text{ м}, 22,47 \text{ м})$, которому соответствует перестановка: $P_{\text{opt}} = (4, 7, 8, 1, 6, 2, 5, 3)$, и последовательность координат точек:

$$P = [(49, 13), (39, 3), (19, 4), (1, 6), (2, 27), (14, 28), (14, 32), (35, 40)].$$

Так как роботов три, то предельная длина подмаршрута с 10% запасом – 40,99 м. На основании этого условия найдены все возможные последовательности переходов:

$$\begin{aligned} P_{e1} &= [(49, 13), (39, 3)]; P_{e2} = [(49, 13), (39, 3), (19, 4)]; P_{e3} = [(39, 3), (19, 4)]; \\ P_{e4} &= [(39, 3), (19, 4), (1, 6)]; P_{e5} = [(19, 4), (1, 6)]; P_{e6} = [(19, 4), (1, 6), (2, 27)]; \\ P_{e7} &= [(1, 6), (2, 27)]; P_{e8} = [(1, 6), (2, 27), (14, 28)]; \\ P_{e9} &= [(1, 6), (2, 27), (14, 28), (14, 32)]; P_{e10} = [(2, 27), (14, 28)]; \\ P_{e11} &= [(2, 27), (14, 28), (14, 32)]; P_{e12} = [(2, 27), (14, 28), (14, 32), (35, 40)]; \\ P_{e13} &= [(14, 28), (14, 32)]; P_{e14} = [(14, 28), (14, 32), (35, 40)]; \\ P_{e15} &= [(14, 32), (35, 40)]. \end{aligned}$$

Из представленного перечня переходов маршрут для трех роботов при выполнении заказа образуют: $P_{e2} + P_{e8} + P_{e15} = P$, а длины подмаршрутов равны 34,16 м, 39,13 м и 38,51 м, соответственно, что на 65% меньше первоначальной длины минимального маршрута для одного робота. После получения подмаршрута в бортовых вычислителях роботов выполняется поиск всех упорядоченных перестановок, чтобы минимизировать путь сбора заказа. Маршруты перемещения роботов представлены на рис. 5,б.

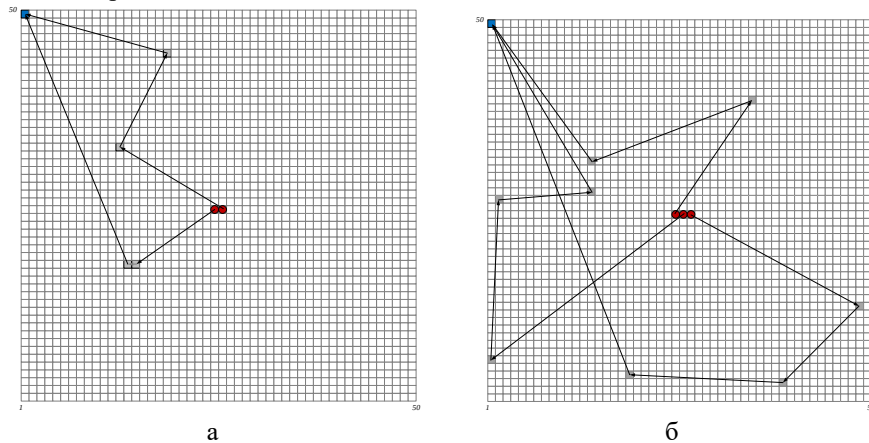


Рис. 5. Маршруты перемещения роботов в экспериментах 1 и 2

Заключение. Представленные в статье модели и алгоритмы могут быть использованы при разработке систем управления роботизированными складами. Предлагаемые решения отличаются простотой реализации в бортовых вычислителях роботов и центральном сервере склада, высокой скоростью получения результатов, фактически в реальном времени. Кроме того, объединение алгоритмов распределения задач и дополнение их, например, механизмом аукциона, позволяет реализовать децентрализованную систему управления роботизированным складом и исключить центральный сервер из процесса распределения. Представление концептуальной модели в виде системы массового обслуживания позволяет использовать ее показатели качества (вероятность обслуживания заказов за заданное время, пропускная способность склада, вероятность занятости робота, вероятность простоя робота и т.п.) для организационно-технического совершенствования роботизированных складов.

В дальнейшем авторы планируют исследовать систему массового обслуживания и определить соотношение предельного количества заказов и количества роботов, оптимальных мест их размещения и прочее.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев В.В., Шкурко Е.И. Современное состояние дел в области роботизации складов // Сб. трудов X Всероссийской научной конференции и молодежного научного форума в рамках мероприятий, посвященных году Науки и технологий в Российской Федерации, Геленджик, 20–22 октября 2021 года. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2021. – С. 173-178.
2. Trefilov S., Nikitin Y. Automatic warehouses with transport robots of increased reliability // *Acta Logistica*. – 2018. – Vol. 5, No. 3. – P. 19-23.
3. Li Zhenping, Li Wenyu. Mathematical model and algorithm for the task allocation problem of robots in the smart warehouse // *American Journal of Operations Research*. – 2015. – Vol. 5. – P. 493-502.
4. Zhang H.G., Zilong C.H., Chris Z., Weinan Y., Yong L., Wenxin W. Layout design for intelligent warehouse by evolution with fitness approximation // *IEEE Access*. – 2019. – P. 1-7.
5. Azadeh K., Debjit R. Robotized Warehouse Systems: Developments and Research Opportunities // *SSRN Electronic Journal*. – 2017. – P. 55.
6. Sultanova A.B., Abdullayeva M.Y. Planning the Trajectory of a Warehouse Mobile Robot // *International Academy Journal Web of Scholar*. – 2020. – Vol. 7 (49). – P. 1-5.
7. Kalinov I. Development of a heterogeneous robotic system for automated inventory stocktaking of industrial warehouse. Doctoral Program in Engineering Systems. – 2020. – 175 p.
8. Bolu A. Omer K. Adaptive Task Planning for Multi-Robot Smart Warehouse // *IEEE Access*. – 2021. – P. 1-13.
9. Claes D., Oliehoek F., Baier H., Tuyls K. Decentralised Online Planning for Multi-Robot Warehouse Commissioning // *Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2017)*. – 2017. – Paper No. 536.
10. Chen Yuxiao, Rosolia Ugo, and Aaron D. Ames Decentralized Task and Path Planning for Multi-Robot Systems // *arXiv:2011.10034v1 [cs.RO]*. – 2020. – P. 1-8.
11. Kam Fai Elvis Tsang, Yuqing Ni, Cheuk Fung Raphael Wong and Ling Shi. A Novel Warehouse Multi-Robot Automation System with Semi-Complete and Computationally Efficient Path Planning and Adaptive Genetic Task Allocation Algorithms // *15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2018*. – 10 p.
12. Honig Wolfgang, Satish Kumar T.K., Cohen Liron, Ma Hang, Koenig Sven, Ayanian Nora. Path Planning With Kinematic Constraints For Robot Groups // *Southern California Robotics Symposium*. – 2016. – 2 p.
13. Ledzinski D., Marchinak T., Maszewski M., Boroński D. Robot Actions Planning Algorithms // *Multi-Agent System. Solid State Phenomena*. – 2015. – P. 221-230.
14. Романенко В.А. Системы и сети массового обслуживания: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2021. – 68 с.
15. Денисов А.А. Системы массового обслуживания // *Вестник Воронежского института высоких технологий*. – 2019. – № 2 (29). – С. 60-63.

16. Любимова Т.В. Конечный автомат: теория и реализация // Университетская наука. – 2020. – № 1 (9). – С. 117-121.
17. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
18. Bertsekas D., Castanon D. Parallel synchronous and asynchronous implementations of the auction algorithm // Intern. J. of Parallel Computing. – 1991. – Vol. 17. – P. 707-732.
19. Bruff D. The Assignment Problem and the Hungarian Method. Retrieved June 26, 2016.
20. Белоглазов Д.А., Соловьев В.В., Тутов А.Е. [и др.]. Метод распределения целей в группах интеллектуальных мобильных роботов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 11-3. – С. 122-133.
21. Jukna S. Extremal Combinatorics: With Applications in Computer Science. – Berlin. Springer, 2001. – 375 p.

REFERENCES

1. Solov'ev V.V., Shkurko E.I. Sovremennoe sostoyanie del v oblasti robotizatsii skladov [The current state of affairs in the field of robotization of warehouses], *Sb. trudov X Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii i molodezhnogo nauchnogo foruma v ramkakh meropriyatiy, posvyashchennykh godu Nauki i tekhnologii v Rossiyskoy Federatsii, Gelendzhik, 20–22 oktyabrya 2021 goda* [Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference and Youth Scientific Forum as part of events dedicated to the Year of Science and Technology in the Russian Federation, Gelendzhik, October 20–22, 2021]. Rostov-on-Donu: YuFU, 2021, pp. 173-178.
2. Trefilov S., Nikitin Y. Automatic warehouses with transport robots of increased reliability, *Acta Logistica*, 2018, Vol. 5, No. 3, pp. 19-23.
3. Li Zhenping, Li Wenyu. Mathematical model and algorithm for the task allocation problem of robots in the smart warehouse, *American Journal of Operations Research*, 2015, Vol. 5, pp. 493-502.
4. Zhang H.G., Zilong C.H., Chris Z., Weinan Y., Yong L., Wenxin W. Layout design for intelligent warehouse by evolution with fitness approximation, *IEEE Access*, 2019, pp. 1-7.
5. Azadeh K., Debjit R. Robotized Warehouse Systems: Developments and Research Opportunities, *SSRN Electronic Journal*, 2017, pp. 55.
6. Sultanova A.B., Abdullayeva M.Y. Planning the Trajectory of a Warehouse Mobile Robot, *International Academy Journal Web of Scholar*, 2020, Vol. 7 (49), pp. 1-5.
7. Kalinov I. Development of a heterogeneous robotic system for automated inventory stocktaking of industrial warehouse. Doctoral Program in Engineering Systems, 2020, 175 p.
8. Bolu A. Omer K. Adaptive Task Planning for Multi-Robot Smart Warehouse, *IEEE Access*, 2021, pp. 1-13.
9. Claes D., Oliehoek F., Baier H., Tuyls K. Decentralised Online Planning for Multi-Robot Warehouse Commissioning, *Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2017)*, 2017, Paper No. 536.
10. Chen Yuxiao, Rosolia Ugo, and Aaron D. Ames Decentralized Task and Path Planning for Multi-Robot Systems, *arXiv:2011.10034v1 [cs.RO]*, 2020, pp. 1-8.
11. Kam Fai Elvis Tsang, Yuqing Ni, Cheuk Fung Raphael Wong and Ling Shi. A Novel Warehouse Multi-Robot Automation System with Semi-Complete and Computationally Efficient Path Planning and Adaptive Genetic Task Allocation Algorithms, *15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2018*, 10 p.
12. Honig Wolfgang, Satish Kumar T.K., Cohen Liron, Ma Hang, Koenig Sven, Ayanian Nora. Path Planning With Kinematic Constraints For Robot Groups, *Southern California Robotics Symposium*, 2016, 2 p.
13. Ledzinski D., Marchinak T., Maszewski M., Boroński D. Robot Actions Planning Algorithms, *Multi-Agent System. Solid State Phenomena*, 2015, pp. 221-230.
14. Romanenko V.A. Sistemy i seti massovogo obsluzhivaniya: ucheb. posobie [Systems and networks of queuing: a tutorial]. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2021, 68 p.
15. Denisov A.A. Sistemy massovogo obsluzhivaniya [Queuing systems], *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies], 2019, No. 2 (29), pp. 60-63.
16. Lyubimova T.V. Konechnyy avtomat: teoriya i realizatsiya [Finite automaton: theory and implementation], *Universitetskaya nauka* [Universitetskaya nauka], 2020, No. 1 (9), pp. 117-121.

17. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 278 p.
18. Bertsekas D., Castanon D. Parallel synchronous and asynchronous implementations of the auction algorithm, *Intern. J. of Parallel Computing*, 1991, Vol. 17, pp. 707-732.
19. Bruff D. The Assignment Problem and the Hungarian Method. Retrieved June 26, 2016.
20. Beloglazov D.A., Solov'ev V.V., Titov A.E. [i dr.]. Metod raspredeleniya tseley v gruppakh intellektual'nykh mobil'nykh robotov [The method of distribution of goals in groups of intelligent mobile robots], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical science], 2016, No. 11-3, pp. 122-133.
21. Jukna S. Extremal Combinatorics: With Applications in Computer Science. Berlin. Springer, 2001, 375 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Соловьев Виктор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043438844; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель; руководитель Центра проектной деятельности ИРТСУ ЮФУ.

Номерчук Александр Яковлевич – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; тел. +79185945894; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель.

Soloviev Viktor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043438844; the department of automatic control systems; senior lecturer; head of the Center for Project Activities, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFU.

Nomerchuk Alexandr Yakovlevich – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; phone: +79185945894; the department of automatic control systems; senior lecturer.

УДК 004.056.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-157-172

С.С. Велигодский, Н.Г. Милославская

УНИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ЗРЕЛОСТИ ЦЕНТРОВ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Создаваемые согласно Указу Президента Российской Федерации № 250 субъектами критической информационной инфраструктуры специальные структурные подразделения способны противодействовать компьютерным атакам на их информационно-телекоммуникационные сети (ИТКС). Чтобы быть эффективными, в составе этих подразделения должны существовать центры управления сетевой безопасностью (ЦУСБ) ИТКС, имеющие высокий уровень зрелости, соответствующий предъявляемым к его организации–владельцу требованиям по обеспечению информационной безопасности. В настоящее время единого подхода к проведению оценки уровня зрелости ЦУСБ не существует. Поэтому целью статьи является описание разработанной унифицированной модели зрелости ЦУСБ ИТКС организаций (УМЗ ЦУСБ), созданной на основе обобщения и развития проанализированных моделей зрелости и собственной систематики процессов управления сетевой безопасностью (УСБ) и услуг по УСБ типовой ИТКС, реализуемыми в ЦУСБ, а также технологий, поддерживающих выполнение процессов и предоставление услуг, дополненных рассмотрением общей организации функционирования ЦУСБ и его кадровым обеспечением. Модель зрелости ЦУСБ определена как структурированный набор элементов, объединяющий информационную потребность установления уровня зрелости ЦУСБ с их атрибутами – свойствами или характеристиками ЦУСБ. Сформулированы требования к разрабатываемой УМЗ внут-

ренного ЦУСБ организации, выполнение которых продемонстрировано в конце статьи. Введено формализованное представление модели зрелости ЦУСБ как объекта оценки уровня зрелости по пяти направлениям оценки, а именно, организационное обеспечение функционирования ЦУСБ, процессы УСБ ИТКС и ЦУСБ как ее составной части, услуги по УСБ ИТКС, предоставляемые ЦУСБ, используемые для этого технологии и кадровое обеспечение. Предложен способ наглядного отображения полученных результатов оценки в виде круговых диаграмм. Представлен подход к установлению итогового уровня зрелости ЦУСБ. Показано, что все сформулированные требования к модели зрелости ЦУСБ в разработанной УМЗ ЦУСБ ИТКС выполнены. Далее для УМЗ ЦУСБ ИТКС должна быть создана методика ее применения.

Унифицированная модель зрелости; центр управления сетевой безопасностью; информационно-телекоммуникационная сеть; направления оценки.

S.S. Veligodskiy, N.G. Miloslavskaya

UNIFIED MODEL OF MATURITY OF NETWORK SECURITY CENTERS OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION NETWORKS

In accordance with Decree No. 250 of the President of the Russian Federation, special structural units created by subjects of critical information infrastructure are able to counteract computer attacks on their information and telecommunication networks (ITCNs). In order to be effective, these units must have Network Security Centers (NSCs) of ITCN with a high level of maturity that meets the information security requirements for its owner organization. Currently, there is no single approach to assessing the NSC maturity level. Thus the article's goal is to describe the developed Unified Maturity Model (UMM) of ITCN NSCs of organizations, created based on the generalization and development of the analyzed maturity models and authors' systematics of network security management (NSM) processes and services of a typical ITCN implemented in the NSC, as well as technologies that support the implementation of processes and the provision of services, supplemented by consideration of the general organization of the NSC functioning and its staffing. The NSC maturity model refers to a structured set of elements that combines the information need to establish the NSC maturity level with their attributes – NSC properties or characteristics. The requirements for UMM being developed for the organization's internal NSC are formulated, and their implementation is demonstrated at the end of the article. A formalized representation of the maturity model of NSC as an object for assessing the maturity level in five assessment areas, namely, the organizational support for the NSC functioning, the NSM processes for ITCN and the NSC as its integral part, the ITCN NSM services provided by the NSC, the technologies used and staffing, is introduced. A method for visualizing the obtained assessment results as pie charts is proposed. An approach to establishing the final NSC maturity level is presented. It is shown that all the formulated requirements for the NSC maturity model are met in the developed ITCN NSC UMM. Further, a methodology for the ITCN NSC UMM application should be created.

Unified maturity model; network security center; information and telecommunications network; assessment areas.

Введение. Создаваемые согласно Указу Президента Российской Федерации № 250 [1] субъектами критической информационной инфраструктуры (КИИ) специальные структурные подразделения способны противодействовать компьютерным атакам (КА) на их информационно-телекоммуникационные сети (ИТКС). Чтобы быть эффективными, в составе этих подразделения должны существовать центры управления сетевой безопасностью (ЦУСБ) ИТКС, имеющие высокий уровень зрелости, соответствующий предъявляемым к его организации–владельцу требованиями по обеспечению информационной безопасности (ИБ). В настоящее время единого подхода к проведению оценки уровня зрелости таких ЦУСБ не существует, но он необходим для определения возможных путей совершенствования ЦУСБ и для соответствующих уполномоченных органов, проводящих такую оценку.

Целью статьи является описание разработанной унифицированной модели зрелости ЦУСБ ИТКС организаций (УМЗ ЦУСБ), созданной на основе обобщения и развития проанализированных моделей зрелости и собственной систематики процессов управления сетевой безопасностью (УСБ) и услуг по УСБ типовой ИТКС, реализуемыми в ЦУСБ, а также технологий, поддерживающих выполнение процессов и предоставление услуг, дополненных рассмотрением общей организации функционирования ЦУСБ и его кадровым обеспечением.

1. Требования к унифицированной модели зрелости ЦУСБ ИТКС. Учитывая опыт построения моделей зрелости ЦУСБ [2–15], сформулируем требования (*Tr*) к разрабатываемой УМЗ внутреннего ЦУСБ ИТКС организации:

Tr1: модель должна обеспечивать достоверность (объективность), повторяемость (воспроизводимость) и сопоставимость получаемых результатов проведения оценок уровня зрелости ЦУСБ, а также последовательность проведения этих оценок и полезность их результатов для дальнейшего совершенствования ЦУСБ;

Tr2: в модели должна отражаться информация об УСБ ИТКС организации в целом и управлении рисками и инцидентами ИБ в ИТКС в частности как системообразующих элементах УСБ и важной обратной связи для совершенствования ОИБ ИТКС и ЦУСБ;

Tr3: в модели должна содержаться информация об этапах жизненного цикла ЦУСБ как структурного подразделения организации, начиная с создания и внедрения и заканчивая активным использованием и совершенствованием;

Tr4: модель должна базироваться на универсальном наборе четко сформулированных показателей достижения определенного уровня зрелости ЦУСБ с формализованным выставлением значений, которые они могут принимать;

Tr5: в модели необходимо связать показатели по пяти НО из области оценки уровня зрелости ЦУСБ и ввести для всех направлений и ЦУСБ в целом единые уровни зрелости;

Tr6: модель должна определять функции (методы), объединяющие полученные значения различных показателей в рамках одного НО и совместно по всем пяти НО в показатель итогового уровня зрелости ЦУСБ;

Tr7: главенствующую роль в определении итогового уровня зрелости ЦУСБ в модели должны играть уровни зрелости для процессов УСБ ИТКС и предоставляемых услуг по УСБ ИТКС при обязательном учете таких уровней для применяемых в ЦУСБ технологий, организационного и кадрового обеспечения;

Tr8: модель должна определять методы оценки всех подлежащих оценке атрибутов объектов оценки, приоритетными из которых по возможности должны быть количественные или полуколичественные (по сравнению с качественными) методы оценки;

Tr9: модель должна определять конкретные, достаточно простые и понятные критерии оценки каждого из атрибутов, основанные на фактах и документированной информации (конкретных свидетельствах оценки);

Tr10: понятия разной степени абстракции, описывающие достаточно широкий отвлеченный класс проблем или какой-либо редкий частный случай, не должны располагаться на одном уровне рассмотрения;

Tr11: в модели должно быть предусмотрены одновременное наличие в организации элементов ЦУСБ разных уровней зрелости и однозначность определения в такой ситуации обобщенного показателя уровня зрелости по НО, где находится такой элемент;

Tr12: в модели определяется уровень зрелости объектов оценки на предмет их результативности как степени реализации и достижения запланированных результатов и будущего потенциала по ОСБ ИТКС (в противовес эффективности как экономической категории, учитывающей затраты на достижение запланированного результата);

Тр13: модель должна учитывать особенности современного развития ИТКС и технологий и средств УСБ и ОИБ, которые могут быть использованы в ЦУСБ;

Тр14: модель должна предоставлять эталонную шкалу уровней зрелости «развивающегося» ЦУСБ и показывать конкретные этапы развития ЦУСБ и пути перехода от одного уровня его зрелости к следующему;

Тр15: для модели должна быть разработана методика применения, дающая общие рекомендации по сбору исходных данных для проведения оценки зрелости ЦУСБ и упрощающая использование модели оценщиками различной квалификации, а также ее адаптацию к потребностям организации, проводящей первичную и последующие оценки уровня зрелости ЦУСБ.

2. Формализованное представление УМЗ ЦУСБ ИТКС. Введем определение *модели зрелости ЦУСБ ИТКС* как структурированного набора элементов, объединяющего информационную потребность установления уровня зрелости ЦУСБ с их атрибутами – свойствами или характеристиками ЦУСБ (адаптировано на основе [16, 17]). Проблема обоснованного выбора атрибутов очень важна: если их слишком много, то оценка существенно затруднена из-за большого объема информации, а оценка по неправильно выбранным атрибутам приведет к неверным результатам и излишним затратам. Информационная потребность – знания (сведения), необходимые для управления целями, задачами, рисками и проблемами ЦУСБ. Потребителями информации могут выступать различные заинтересованные стороны: внутренние (собственники и органы управления, органы контроля, сервисные подразделения и т.п.) и внешние (органы надзора и регулирования, акционеры, инвесторы и т.п.) по отношению к организации, имеющей ЦУСБ.

Для описания ЦУСБ как объекта оценки уровня зрелости введем сокращенные обозначения обеспечивающих функционирование ЦУСБ направлений, определяющую область оценки:

- ♦ организационное обеспечение ЦУСБ – ОФ;
- ♦ процессы УСБ ИТКС и ЦУСБ как ее составной части, а также управления самим ЦУСБ и его деятельностью – ПУСБ;
- ♦ услуги по УСБ ИТКС ожидаемого качества, поддерживающие требуемый уровень ИБ ИТКС в соответствии со всеми применимыми требованиями по ОИБ – УУСБ;
- ♦ используемые для этого технологии – Т;
- ♦ кадровое обеспечение – К.

Тогда $УМЗ_{ЦУСБ}$ представляется следующим кортежем, содержащим в себе пять кортежей для пяти направлений оценки уровня зрелости ЦУСБ:

$$УМЗ_{ЦУСБ} = \{ЦУСБ, \{ОО_{ОФ}, А_{ОФ}, ША_{ОФ}, М_{ОФ}, КОА_{ОФ}, Ф_{ОФ}, ШУЗ_{ОФ}, УЗ_{ОФ}\}, (1) \\ \{ОО_{ПУСБ}, А_{ПУСБ}, ША_{ПУСБ}, М_{ПУСБ}, КОА_{ПУСБ}, Ф_{ПУСБ}, ШУЗ_{ПУСБ}, УЗ_{ПУСБ}\}, \\ \{ОО_{УУСБ}, А_{УУСБ}, ША_{УУСБ}, М_{УУСБ}, КОА_{УУСБ}, Ф_{УУСБ}, ШУЗ_{УУСБ}, УЗ_{УУСБ}\}, \\ \{ОО_T, А_T, ША_T, М_T, КОА_T, Ф_T, ШУЗ_T, УЗ_T\}, \\ \{ОО_K, А_K, ША_K, М_K, КОА_K, Ф_K, ШУЗ_K, УЗ_K\}, Ф_{ЦУСБ}, ШУЗ_{ЦУСБ}, ИУЗ_{ЦУСБ}\},$$

где $ЦУСБ, ОО_{ОФ}, ОО_{ПУСБ}, ОО_{УУСБ}, ОО_T, ОО_K$ – множество объектов оценки для ЦУСБ в целом и отдельно по каждому НО – $ОО = \{оо_1, оо_2, \dots, оо_L\}$, определяющие содержание оценки уровня зрелости, причем L может быть различным для НО – $L_{ОФ}$ (для краткости L_1), $L_{ПУСБ}$ (L_2), $L_{УУСБ}$ (L_3), L_T (L_4) и L_K (L_5). Эти объекты оценки в каждом НО могут содержать групповые объекты оценки – $доо$, в которые, в свою очередь, могут входить частные объекты оценки – $гоо$.

$A_{Оф}, A_{ПУСБ}, A_{УУСБ}, A_T, A_K$ – множество атрибутов объектов оценки в НО, подлежащих оценке – $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$, причем N может быть различным для пяти НО – $N_{Оф}$ (для краткости N_1), $N_{ПУСБ}$ (N_2), $N_{УУСБ}$ (N_3), N_T (N_4) и N_K (N_5);

$ША_{Оф}, ША_{ПУСБ}, ША_{УУСБ}, ША_T, ША_K$ – эталонные шкалы для НО как упорядоченные совокупности эталонных значений, которые могут принимать атрибуты объектов оценки данного НО – $SA = \{sa_1, sa_2, \dots, sa_N\}$;

$M_{Оф}, M_{ПУСБ}, M_{УУСБ}, M_T, M_K$ – множество методов оценки атрибутов объектов оценки для НО – $M = \{m_1, m_2, \dots, m_M\}$, причем в общем случае M может различаться для пяти НО – $M_{Оф}, M_{ПУСБ}, M_{УУСБ}, M_T$ и M_K и может быть больше (для оценки одного и того же атрибута применимы несколько альтернативных методов оценки), меньше (к некоторым атрибутам применяются одинаковые методы оценки) или равно (для каждого атрибута применяется свой уникальный метод оценки) соответствующего N (N_1, N_2, N_3, N_4 или N_5);

$KOA_{Оф}, KOA_{ПУСБ}, KOA_{УУСБ}, KOA_T, KOA_K$ – критерии оценки значений атрибутов объектов оценки для НО – $KOA = \{koa_1, koa_2, \dots, koa_N\}$, причем в общем случае N может быть различным для пяти НО – N_1, N_2, N_3, N_4 и N_5 ;

$\Phi_{Оф}, \Phi_{ПУСБ}, \Phi_{УУСБ}, \Phi_T, \Phi_K$ – функции или методы, объединяющие полученные результаты оценки для всех атрибутов объектов оценки каждого НО в общий показатель уровня зрелости данного НО или числовое значение оценки, характеризующее уровень его зрелости (далее для краткости – показатель уровня зрелости);

$ШУЗ_{Оф}, ШУЗ_{ПУСБ}, ШУЗ_{УУСБ}, ШУЗ_T, ШУЗ_K$ – эталонные шкалы уровней зрелости НО;

$УЗ_{Оф}, УЗ_{ПУСБ}, УЗ_{УУСБ}, УЗ_T, УЗ_K$ – результаты оценки для НО в виде конкретного уровня зрелости оцениваемого НО;

$\Phi_{ЦУСБ}$ – функция или метод, обобщающая полученные значения уровней зрелости НО в показатель итогового уровня зрелости ЦУСБ;

$ШУЗ_{ЦУСБ}$ – эталонная шкала уровней зрелости ЦУСБ;

$ИУЗ_{ЦУСБ}$ – итоговый результат в виде конкретного уровня зрелости оцениваемого ЦУСБ.

УМЗ ЦУСБ отражает, как выбранные для каждого направления оценки атрибуты объектов оценки могут быть оценены и преобразованы в результаты оценки, служащие основой для принятия решений об уровне зрелости данного направления (рис. 1) (на основе [17]). Отметим, что процесс получения итогового интегрального уровня зрелости ЦУСБ здесь не отражен.

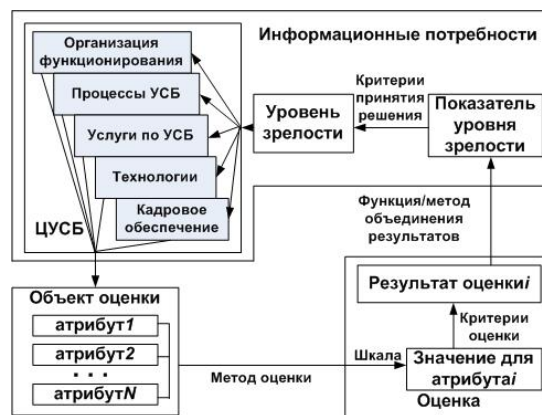


Рис. 1. Оценивание объектов оценки ЦУСБ по пяти направлениям согласно УМЗ ЦУСБ ИТКС

Объекты оценки со своими специфическими атрибутами устанавливаются для каждого направления оценки и представляют собой отдельные реализованные процессы УСБ ИТКС, предоставляемые услуги по УСБ ИТКС, используемые при этом технологии и прочее. Каждый объект оценки можно детализировать, введя более мелкие – частные – объекты оценки, назвав его тогда групповым объектом оценки.

В ходе оценки для каждого атрибута объекта оценки на основе применения соответствующего метода оценки определяются их количественные значения как результаты некоторого расчета или измерения и (или) качественные характеристики как результаты анализа или наблюдения. Оценка представляет собой суждение об этих результатах. Метод оценки – логическая последовательность операций, прямо или косвенно определяющая, как количественно или качественно оценивать атрибуты каждого объекта оценки посредством применения принятой эталонной шкалы. Эталонная шкала определяет для каждого атрибута целевые значения (или их диапазоны (интервалы) и пороговые значения) или их характеристики, соответствующие установленным уровням зрелости. Критерии оценки значений для атрибутов содержат совокупности требований, характеризующих определенный уровень их зрелости. Результатом оценки является обобщенная характеристика атрибутов объекта оценки, дающую качественную или количественную оценку степени его зрелости на основе ее сравнения с критериями оценки в рамках определенной шкалы эталонных значений и интерпретация полученной характеристики, понятная потребителю оценки. Качество результата оценки зависит в первую очередь от исходных данных, на основе которых производилась оценка.

Для УМЗ ЦУСБ принципиальным является выполнение условия, при котором ни один из объектов оценки из определенного ниже базового набора для каждого направления оценки не может быть исключен (не выбран) или оставлен не-оцененным (в отличие от подходов Банка России [18] и ГОСТ Р 57580.2-2018 [19]). Для каждого объекта оценки должен быть установлен уровень его зрелости, обязательно учитываемый при оценке обобщенного уровня зрелости всего направления оценки. В противном случае определить уровень зрелости направления оценки, в который попадает данный объект, не представляется возможным, а, значит, нельзя и установить уровень зрелости всего ЦУСБ.

В случае существенного отклонения полученного значения атрибута от целевого значения необходимо выявить причины отклонения и предложить меры по усовершенствованию объекта оценки, устранившие их.

При проведении последующих оценок результат оценки покажет динамическое изменение значения для атрибута за определенный период времени после первой оценки, т.е. повысился уровень его зрелости, упал или остался на прежнем уровне.

Критерии оценки значений для атрибутов должны быть просты и понятны и сформулированы, например, исходя из критичности атрибута для объекта оценки в рамках его вклада в выполнение основного назначения данного направления оценки в УСБ ИТКС или ЦУСБ в целом, текущего уровня зрелости атрибута, уровня зрелости атрибутов связанных с данным объектом оценки и т.п. Критерии могут быть, например, следующего вида [20]:

♦ счетные, например, «Количество процессов от их общего числа, обладающие определенным свойством» или «Процент процессов от их общего числа, обладающих определенным свойством» (сравнение с данным критерием относит полученный результат к одному из диапазонов возможных значений, которые может принимать атрибут) или сумма инвестиций в проекты ЦУСБ и затраты на ОИБ;

- ♦ основанные на наблюдаемых фактах, например, «Все посетители помещений ЦУСБ регистрируются системой видеонаблюдения» (форма ответа при сравнении с данным критерием – «Да» или «Нет»);
- ♦ основанные на анкетах, содержащих формулировки счетных и основанных на наблюдаемых фактах критериев и поля для внесения результатов;
- ♦ в виде каких-либо требований, например, наличие лицензии на осуществление какой-либо деятельности.

Использование сразу нескольких критериев для одного объекта оценки дает возможность повысить точность оценки.

В качестве единой эталонной шкалы для каждого выбранного атрибута в УМЗ ЦУСБ установим следующую шкалу от «0» до «1» с равным шагом как доли от максимального значения или характеристики атрибута:

- ♦ «*неудовлетворительно*» (не достигается/не существует или крайне мало свидетельств достижения/существования, неявный, незафиксированный письменно) – в диапазоне 0-0,19(9),
- ♦ «*мало*» (в основном или в значительной степени не достигается/не существует, некоторые аспекты достижения атрибута непредсказуемы; явный, зафиксированный письменно, но неформализованный каким-либо образом) – в диапазоне 0,2-0,39(9),
- ♦ «*удовлетворительно*» (частично достигается/существует, явный, формализованный, заверенный и опубликованный) – в диапазоне 0,4-0,59(9),
- ♦ «*хорошо*» (в основном или в значительной степени с редкими исключениями достигается/существует, существуют некоторые недостатки достигаемых значений атрибутов; явный, проверенный и подлежащий контролю) – в диапазоне 0,6-0,79(9) и
- ♦ «*отлично*» (полностью или всегда достигается/существует; значительных недостатков, связанных с полученным значением атрибута, не выявлено) – в диапазоне 0,8-1.

После накопления опыта применения УМЗ ЦУСБ на практике значения границ интервалов могут быть в дальнейшем пересмотрены, что не отразится на самом процессе оценки уровня зрелости ЦУСБ, а только на конечном результате этой оценки. Отметим, что все значения границ интервалов могут быть умножены на 100%, если при проведении оценки такой подход более понятен и нагляден для отображения ее результатов.

Фактические обобщенные (объединенные) значения частных атрибутов сначала в групповые для одного объекта оценки, а далее для всех объектов оценки одного направления – в показатель уровня зрелости этого направления. После применения критериев принятия решения он имеет вид уровня зрелости для конкретного направления оценки и демонстрирует конкретные характеристики этого направления, соответствующие установленному уровню зрелости.

Значение z_{lpij} для каждого i -го атрибута j -го частного объекта оценки p -го группового объекта оценки l -го объекта оценки в рамках одного НО из общего числа L (L_1, L_2, L_3, L_4 или L_5 соответственно) рассчитывается как среднее арифметическое значение субъективной оценки z_{lpij} всех Q опрашиваемых лиц (их порядковые номера обозначены индексом q), мнение которых имеет равную значимость (в общем случае Q для разных атрибутов различны), по принятой шкале по формуле:

$$\bar{z}_{lpij} = \frac{\sum_{q=1}^Q z_{lpijq}}{Q} \quad (2)$$

В эту формулу можно ввести весовые коэффициенты, учитывающие степень компетентности опрашиваемых лиц, что усложнит дальнейшие расчеты и саму процедуру оценки, поскольку придется дополнительно определять эту компетентность, увеличивая временные и трудовые затраты на общую оценку уровня зрелости. В частном (вырожденном) случае, когда для получения значения атрибута можно опросить только одно лицо, среднее значение и будет равно значению, которое выставило это лицо.

Показатель уровня зрелости по каждому атрибуту одного частного объекта оценки оценивают путем сопоставления значений атрибутов со значениями эталонными шкалы. Поскольку эталонная шкала устанавливает значения для атрибутов za_{lpji} в диапазоне от «0» до «1», как и для весовых коэффициентов, то в итоге обобщенное значение для всех атрибутов одного группового объекта оценки также будет принимать значение от «0» до «1» (за счет того, что сумма всех весовых коэффициентов равна «1»). [При использовании значений в процентах обобщенное значение также будет находиться в диапазоне от «0» до «100».]

Сумма взвешенных значений показателей уровня зрелости zoo_l всех L (L_1, L_2, L_3, L_4 или L_5 соответственно) объектов оценки в рамках одного НО позволяет рассчитать показатель уровня зрелости $ПУЗ$ этого НО (вторая строка кратко и первая строка развернуто):

$$\begin{aligned}
 ПУЗ = & \sum_{i=1}^L woo_l * \left(\sum_{p=1}^P wgoo_{lp} * \left(\sum_{j=1}^J wroo_{lpj} * \left(\sum_{i=1}^N wa_{lpji} * za_{lpji} \right) \right) \right) = \quad (3) \\
 & \sum_{i=1}^L woo_l * zoo_l \\
 & \quad \downarrow \\
 & \sum_{p=1}^P wgoo_{lp} * zgoo_{lp} \\
 & \quad \downarrow \\
 & \sum_{j=1}^J wroo_{lpj} * zroo_{lpj} \\
 & \quad \downarrow \\
 & \sum_{i=1}^N wa_{lpji} * za_{lpji}
 \end{aligned}$$

Сумма взвешенных значений показателей уровня зрелости $zgoo_{lp}$ всех P групповых объектов оценки позволяет рассчитать показатель уровня зрелости zoo_l объекта оценки в рамках НО (третья строка кратко).

Сумма взвешенных значений показателей уровня зрелости $zroo_{lpj}$ всех J частных объектов оценки позволяет рассчитать показатель уровня зрелости $zgoo_{lp}$ группового объекта оценки (четвертая строка формулы кратко).

Сумма взвешенных значений всех N (N_1, N_2, N_3, N_4 или N_5 соответственно) атрибутов a_{lpji} частных объектов оценки roo_{lpj} позволяет рассчитать показатель уровня зрелости $zroo_{lpj}$ этого частного объекта оценки (пятая строка).

При этом суммы весовых коэффициентов woo_l , $wgoo_{lp}$, $wroo_{lpj}$ и wa_{lpji} вкладает соответствующего значения или показателя в общий показатель для всех видов весовых коэффициентов равны «1». Установление таких коэффициентов проводится один раз, например, путем опроса экспертов или на основе собранной статистики. Возможные значения весовых коэффициентов обсуждаются в последующих разделах, посвященных отдельным НО.

Для получения показателя уровня зрелости каждого НО в баллах полученное значение $ПУЗ$ в диапазоне от «0» до «1» умножается на 100.

В формулу (3) можно было бы дополнительно ввести корректирующий коэффициент неравномерности, уравнивающий полученные групповые значения в случае их большого разброса, когда в одной группе они очень высокие, а в другой

– очень низкие. Но при оценке уровня зрелости это представляется нелогичным, ибо основная задача оценки – выявить реальную картину, а не усредненную («сглаженную»).

Также для каждого из результатов оценки и обобщенного показателя уровня зрелости ЦУСБ могут быть определены желательные тенденции их изменения при росте уровня зрелости. Таким образом, в УМЗ ЦУСБ заложен итерационный процесс совершенствования ЦУСБ на основе повышения результатов систематически проводимой оценки уровня зрелости ЦУСБ.

Критерии принятия решения необходимы для определения конкретного уровня зрелости по соответствию ему показателя уровня зрелости ЦУСБ.

Важно отметить, что количество уровней зрелости для всех пяти направлений оценки для удобства дальнейшей интеграции в единый итоговый уровень зрелости ЦУСБ логично установить одинаковым. Обобщив результаты проведенного анализа моделей уровней зрелости для различных объектов оценки и исключив нулевой уровень (отсутствие объекта оценки), с целью обеспечения наибольшей преемственности с имеющимися моделями зрелости в УМЗ ЦУСБ представляется обоснованным определить пять уровней зрелости направлений оценки и самого ЦУСБ в целом с едиными названиями – *«начальный»*, *«базовый и повторяемый»*, *«установившийся и отслеживаемый»*, *«управляемый и измеряемый»*, *«оптимизируемый и устойчивый»* соответственно. Для перехода от первого уровня ко второму добавляется анализ и повторяемость, от второго к третьему – стандартизация и отслеживаемость, от третьего к четвертому – управляемость и измеряемость и от четвертого к пятому – устойчивость, оптимизируемость и постоянное совершенствование.

Продолжая ранее представленные рассуждения, общая оценка уровня зрелости ЦУСБ или отдельного направления оценки может составлять от 0 до 100 баллов. Предлагаются следующие уровни зрелости, связанные с определенным количеством набранных в процессе оценки баллов (при этом важно, что за количеством баллов стоит соответствующий перечень характеристик для каждого уровня):

♦ *«начальный»* – в диапазоне 0-19,99(9) баллов, когда деятельность иерархически организованного ЦУСБ по УСБ ИТКС осуществляется хаотически, от случая к случаю, без единого подхода (так называемое «ситуационное управление» (*Ad hoc*)); сами процессы УСБ непредсказуемы и слабо контролируемы.

♦ *«базовый и повторяемый»* – в диапазоне 20-39,99(9) баллов, когда одинаковые задачи по УСБ ИТКС решаются разными людьми схожими методами, но формализованные процедуры УСБ и распределение ответственности отсутствуют, что увеличивает вероятность ошибок; часто процессы УСБ появляются в ответ на определенные события, а затраты на них могут превышать выделенный бюджет;

♦ *«установившийся и отслеживаемый»* – в диапазоне 40-59,99(9) баллов, когда процедуры УСБ определены на уровне ЦУСБ (он может быть представлен как некий «конвейер по УСБ ИТКС»), стандартизованы (формализуют существующую практику) и документированы, исполняются заблаговременно с управлением качеством, но возможно с превышением бюджета и не всегда прослеживаемыми отклонениями;

♦ *«управляемый и измеряемый»* – в диапазоне 60-79,99(9) баллов, когда ЦУСБ контролирует по целям и измеряет процессы УСБ по показателям и принимает меры, если они нерезультативны и неэффективны (но риск этого в тактической перспективе минимален, хотя и возможен в стратегической перспективе); могут использоваться инструменты их автоматизации;

♦ *«оптимизируемый и устойчивый»* – в диапазоне 80-100 баллов, когда процессы УСБ ИТКС, реализуемые ЦУСБ с сетевой организационной структурой, развиты в рамках заранее определяемого бюджета до уровня хорошей практики

(риски в тактической и стратегической перспективах минимальны) в результате постоянных улучшений и сравнений, т.е. осуществляется управление изменениями, инновациями и знаниями.

Как и в случае с границами значений интервалов для оценки атрибутов объектов оценки, после накопления опыта применения УМЗ ЦУСБ на практике значения границ интервалов для уровней зрелости ЦУСБ могут быть в дальнейшем пересмотрены, что не отразится на самом процессе оценки уровня зрелости ЦУСБ, а только на конечном результате этой оценки.

В качестве метода, объединяющего полученные значения уровней зрелости направлений оценки в единый показатель уровня зрелости ЦУСБ, логично выбрать минимальное значение из показателей для всех пяти направлений (согласно давно известному в ИБ принципу – «уровень ИБ всей системы не может быть выше уровня ИБ самого слабого ее звена»), а не их интегральное значение по какой-либо формуле. Кроме того нельзя говорить о некоем математическом равенстве уровней зрелости всех пяти направлений оценки, но все они важны для достижения высокого уровня зрелости ЦУСБ.

3. Итоговый уровень зрелости ЦУСБ ИТКС. По аналогии с подходом Банка России [18], рис. 2 содержит три круговые диаграммы: первая и третья отображают обобщенные результаты оценки уровней зрелости направлений ОФ и К соответственно, а на второй одновременно отображаются результаты оценки уровней зрелости направлений ПУСБ, УУСБ и Т, поскольку групповые объекты оценки направлений УУСБ и Т жестко связаны с таковыми для групповых объектов оценки направления ПУСБ.

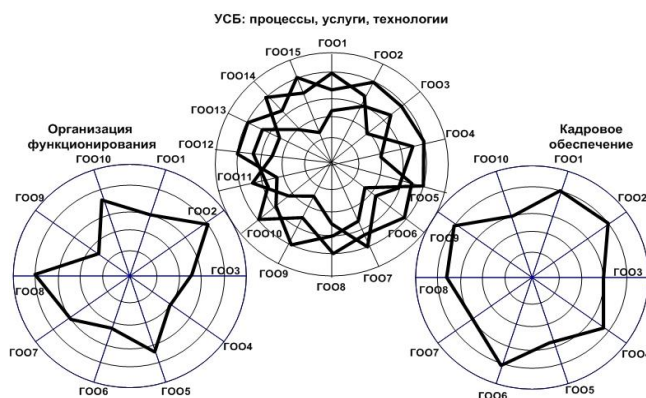


Рис. 2. Вид круговых диаграмм для отображения показателей уровней зрелости направлений оценки ЦУСБ

Значения показателей уровня зрелости каждого основного группового объекта оценки направлений ПУСБ, УУСБ и Т отображаются на верхней круговой диаграмме на прямых, разделяющих сектора с 1-го по 12-й, а каждого вспомогательного – на прямых, разделяющих сектора с 12-го по 1-ый, точкой, отстоящей от центра круговой диаграммы на величину, соответствующую значениям этих показателей. Шаг перехода с одного уровня зрелости на другой равен «0,2», что показано на каждой из трех диаграмм четырьмя равноотстоящими внутренними окружностями.

Значения показателей уровня зрелости каждого основного группового объекта оценки направлений ОФ и К отображаются соответственно на левой и правой круговых диаграммах на прямых, разделяющих сектора с 1-го по 10-й, точкой, отстоящей от центра круговой диаграммы на величину, соответствующую значениям этих показателей.

Пятому уровню зрелости всех объектов оценки пяти направлений соответствует окружность радиусом 0,8 и кольцо до окружности радиусом «1», четвертому – окружность радиусом 0,6 и кольцо до окружности радиусом 0,8, третьему – окружность радиусом 0,4 и кольцо до окружности радиусом 0,6, второму – окружность радиусом 0,2 и кольцо до окружности радиусом 0,4 и первому – круг до окружности радиусом 0,2.

Значение итогового уровня зрелости ЦУСБ $IУЗ_{ЦУСБ}$ логично определять по наименьшему значению из пяти уровней зрелости по пяти направлениям оценки, пересчитанные в баллы (умноженные на 100) и имеющие значения от 0 до 100 баллов (пример представлен на рис. 3):

$$IУЗ_{ЦУСБ} = \min (УЗ_{ОФ}, УЗ_{ПУСБ}, УЗ_{УУСБ}, УЗ_Т, УЗ_К), \quad (4)$$

где $УЗ_{ОФ}$ – уровень зрелости направления ОФ;
 $УЗ_{ПУСБ}$ – уровень зрелости направления ПУСБ;
 $УЗ_{УУСБ}$ – уровень зрелости направления УУСБ;
 $УЗ_Т$ – уровень зрелости направления Т;
 $УЗ_К$ – уровень зрелости направления К.

Направления оценки	Уровни зрелости				
	1-ый	2-ой	3-ий	4-ый	5-ый
ОФ			45		
ПУСБ			56		
УУСБ				65	
Т				63	
К			47		
ЦУСБ			45		

Рис. 3. Примеры значений уровней зрелости направлений оценки ЦУСБ и ЦУСБ в целом

По количеству полученных баллов определяется уровень зрелости ЦУСБ как «начальный», если минимальное значение попадает в диапазон 0-19,99(9) баллов; «базовый и повторяемый» – в диапазон 20-39,99(9) баллов; «установившийся и отслеживаемый» – в диапазон 40-59,99(9) баллов; «управляемый и измеряемый» – в диапазон 60-79,99(9) баллов или «оптимизируемый и устойчивый» – в диапазон 80-100 баллов.

4. Выполнение сформулированных требований к УМЗ ЦУСБ ИТКС. Обобщая полученные в исследовании результаты, покажем, что все ранее сформулированные требования к УМЗ ЦУСБ ИТКС выполнены (табл. 1).

Таблица 1

Выполнение сформулированных требований к УМЗ ЦУСБ ИТКС

Требование	Комментарий по выполнению требования
Tr1	Достоверность подтверждается использованием российских ГОСТов и международных стандартов, а повторяемость и сопоставимость обеспечиваются точностью и правильностью свидетельств оценки, а также единой методикой оценки уровня зрелости ЦУСБ с применением УМЗ при систематически повторяющемся процессе оценки уровня зрелости ЦУСБ.
Tr2	Процессы УСБ ИТКС положены в основу УМЗ, среди которых важнейшее место занимают детально описанные процессы управления рисками и инцидентами ИБ.

Окончание табл. 1

Tr3	Такая информация учтена и оценивается при оценке уровня зрелости НО ОФ.
Tr4	В УМЗ установлены единые для всех направлений и объектов оценки показатели уровня зрелости.
Tr5	Показатели уровней зрелости трех направлений – ПУСБ, УУСБ и Т жестко связаны между собой и их уровень зрелости опирается на уровень зрелости ОФ и К.
Tr6	Разработанные формулы (2)-(4) для расчетов демонстрируют установление таких функций.
Tr7	Атрибуты оценки объектов в рамках направлений УУСБ и Т сформулированы с учетом атрибутов НО ПУСБ. Количество этих атрибутов больше, чем для направлений ОФ и К. Роль показателей каждого НО при установлении итогового уровня зрелости ЦУСБ учтена в формуле (4).
Tr8	В исследовании указаны возможные методы оценки с применением эталонной шкалы, определяющей для каждого атрибута пороговые значения и их характеристики, соответствующие установленным уровням зрелости. Для каждого НО для выбранного в качестве примера объекта оценки приведены смысловые значения введенной эталонной шкалы.
Tr9	В исследовании показано как формулируются критерии оценки атрибутов объектов оценки. Для выбранного в качестве примера объекта оценки приведены смысловые значения критериев оценки.
Tr10	Определены объекты оценки, для которых выделяются «подобъекты» второго (групповые) и третьего (частные) уровней иерархии (например, «подпроцессы» и «подподпроцессы»).
Tr11	Выставление оценщиками существенно различающихся значений для атрибутов одного объекта оценки сглаживается за счет вычисления среднего арифметического этих значений (формула (2)). УМЗ допускает для разных объектов оценки большой разброс значений, поскольку важно выявить реальную картину, а не усредненную («сглаженную»).
Tr12	Понятие «эффективность» упоминается только при оценке уровня зрелости НО ОФ ЦУСБ.
Tr13	В исследовании упоминаются все известные на текущий момент технологии ОИБ и СЗИ, но при этом для всех групповых объектов оценки список частных объектов не закрыт (поставлены троеточия, означающие возможность расширения приведенных перечней).
Tr14	Эталонная шкала уровней зрелости ЦУСБ приведена в разделе 2. Пути перехода от одного уровня зрелости к другому связаны с усовершенствованием конкретных объектов оценки, для которых при предыдущей оценке был определен более низкий уровень зрелости.
Tr15	Разработанная методика оценка уровня зрелости ЦУСБ с применением УМЗ ЦУСБ описана в исследовании отдельно.

Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать вывод, что все сформулированные требования к УМЗ ЦУСБ ИТКС удовлетворены.

Можно выделить следующие достоинства разработанной УМЗ ЦУСБ ИТКС:

- ♦ строится на основе комплексного подхода к описанию системы управления инцидентами ИБ для ИТКС в организации на основе внедрения и использования ЦУСБ;
- ♦ содержит понятную систему описания элементов ЦУСБ в виде иерархии взаимосвязанных элементов (лучшие практики, используемые технологии и средства, реализуемые процессы и их функциональность, кадровое обеспечение, результаты и показатели);
- ♦ позволяет оценить на основе установленных критериев уровень зрелости процессов управления инцидентами ИБ в ЦУСБ, причем как для всего процесса в целом, так и по отдельности для каждого его подпроцесса, выступая индикатором

сильных и слабых сторон их реализации и использования, позволяя анализировать связанные с процессами рисков в отношении их определенной качественной характеристики и в связи с определенным контекстом их использования, «подсвечивая» те области, которые за текущими задачами остаются не замеченными;

- ♦ позволяет оценить эффективность ЦУСБ как инфраструктуры, которая поддерживает требуемый уровень ИБ ИТКС организации;

- ♦ позволяет оценить требуемый уровень управления инцидентами ИБ на основе внедрения ЦУСБ, необходимый для достижения основных целей ведения бизнеса организации;

- ♦ задает направление для дальнейшего развития ЦУСБ организации в области управления инцидентами ИБ и позволяет сформулировать ключевые действия, которые необходимо выполнить для продвижения на следующий уровень модели зрелости.

Заключение. Учитывая опыт и лучшие практики оценки зрелости различных объектов, а также недостатки известных моделей зрелости, сформулированы требования к разрабатываемой УМЗ собственного ЦУСБ организации в целом и ее отдельным элементам, выполнение которых показано в последнем разделе.

Для описания ЦУСБ как объекта оценки уровня зрелости с пятью направлениями оценки введена модель уровня зрелости ЦУСБ $УМЗ_{ЦУСБ}$, которая представлена в виде кортежа, содержащего в себе пять кортежей для пяти направлений оценки (формула 1). Элементами $УМЗ_{ЦУСБ}$ являются множество объектов оценки в целом (ЦУСБ) и отдельно по каждому направлению оценки, множество атрибутов более мелких объектов оценки в рамках каждого направления, эталонные шкалы значений, которые могут принимать атрибуты объектов оценки данного направления, множество методов оценки этих атрибутов и критерии оценки значений атрибутов, функции (методы), объединяющие полученные результаты оценки для всех атрибутов объектов оценки каждого направления в единый показатель уровня зрелости данного направления, эталонные шкалы уровней зрелости для каждого направления, результаты оценки каждого направления в виде конкретного уровня зрелости, функция (метод), обобщающая полученные значения уровней зрелости направлений в единый показатель уровня зрелости ЦУСБ, эталонная шкала уровней зрелости ЦУСБ и итоговый результат оценки в виде конкретного уровня зрелости оцениваемого ЦУСБ.

Предложен способ визуализации оценки уровней зрелости направлений оценки ЦУСБ по групповым объектам оценки в рамках каждого направления в виде трех круговых диаграмм (по одной для направлений оценки ОФ и К и одной обобщенной для взаимосвязанных направлений оценки ПУСБ, УУСБ и Т) для принятия решения об итоговом уровне зрелости ЦУСБ и последующих действий по повышению зрелости конкретных объектов оценки.

Отличительной чертой разработанной УМЗ ЦУСБ ИТКС является ее универсальность, позволяющая применять ее при оценке ЦУСБ разного уровня зрелости с типовым набором объектов оценки по пяти направления и используемую в организациях различного размера, области деятельности и подчиненности. Эта модель может быть адаптирована под потребности конкретной организации (например, в части уточнения объектов оценки и их атрибутов), которая начинает построение своего ЦУСБ. По мере роста и «созревания» операционных потребностей организации ЦУСБ также будет адаптироваться и развиваться.

Далее для разработанной УМЗ ЦУСБ ИТКС создается методика ее применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Указ Президента Российской Федерации от 1 мая 2022 г. № 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации».
2. Gardiner M. The Critical Incident Response Maturity Journey. – EMC Corporation, 2013. – Режим доступа: http://docs.media.bitpipe.com/io_11x/io_115661/item_894499/Critical%20Incident%20Response%20Maturity.pdf (дата обращения: 29.05.2023).
3. SIM3: Security Incident Management Maturity Model. – Open CSIRT Foundation, 2019. – Режим доступа: <http://opencsirt.org/wp-content/uploads/2019/12/SIM3-mkXVIIIc.pdf> (дата обращения: 29.05.2023).
4. CSIRT capabilities: How to assess maturity? Guidelines for national and governmental CSIRTs. – ENISA, 2016. – Режим доступа: <https://www.enisa.europa.eu/publications/csirt-capabilities> (дата обращения: 29.05.2023).
5. Dorofee A., Ruefle R., Zajicek M., McIntire D., Alberts C., Perl S., Huth C.L., Walters P. Incident Management Capability Assessment. – Software Engineering Institute of Carnegie Mellon University, 2018. – Режим доступа: https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/TechnicalReport/2018_001_001_538866.pdf (дата обращения: 29.05.2023).
6. Wahlgren G.A. Maturity Model for Measuring Organizations Escalation Capability of IT-related Security Incidents. Academic dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Computer and Systems Sciences. – Stockholm University, 2020. – Режим доступа: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1411275/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 29.05.2023).
7. State of security operations. – Hewlett-Packard, 2014. – Режим доступа: <http://h41382.www4.hp.com/gfs-shared/downloads-303.pdf> (дата обращения: 29.05.2023).
8. Os V.R. SOC-CMM: Designing and Evaluating a Tool for Measurement of Capability Maturity in Security Operations Centers. Master Thesis, Information Security Program. – Luleå University of Technology, 2016. – 75 p.
9. SOC-CMM Introduction. – SOC-CMM, 2020. – Режим доступа: <https://www.soc-cmm.com/introduction> (дата обращения: 29.05.2023).
10. Nettitude Blog: Cybersecurity Maturity Assessments Explained. – Nettitude, 2020. – Режим доступа: <https://blog.nettitude.com/cyber-maturity-assessments-explained-nettitude> (дата обращения: 29.05.2023).
11. Three Levels of SOC Maturity: Steps for Continual Service Improvement. – Huntsman, 2018. – Режим доступа: <https://www.huntsmansecurity.com/blog/three-levels-of-soc-maturity-steps-for-continual-service-improvement/> (дата обращения: 29.05.2023).
12. Kuzbari T. Security Operations Center. Part 2 – Internal SOC maturity levels. – Cybereason, 2018. – Режим доступа: <https://www.linkedin.com/pulse/security-operations-center-part-2-internal-soc-maturity-kuzbari> (дата обращения: 29.05.2023).
13. Crump J. Security Operations Center – Use Case Maturity Model/Cube (SOC-UCMM). – 2018. – Режим доступа: <https://www.jeffreydoncrump.com/post/security-operations-centre-soc-managed-security-service-provider-monitoring-content-maturity-cube> (дата обращения: 29.05.2023).
14. Построение и развитие центров мониторинга информационной безопасности (SOC). – PwC, 2019. – Режим доступа: <https://www.pwc.ru/ru/services/technology/cyber-security/soc.html> (дата обращения: 29.05.2023).
15. The Security Operations Maturity Model: A Practical Guide to Assessing and Improving the Capabilities of Your Security Operations Center. – LogRhythm, 2019. – Режим доступа: <https://logrhythm.com/security-operations-maturity-model-white-paper/> (дата обращения: 29.05.2023).
16. ISO/IEC/IEEE 15939:2017 Systems and software engineering – Measurement process. – 2017. – 39 p.
17. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004–2021 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент информационной безопасности. Мониторинг, оценка защищенности, анализ и оценивание. – Введ. 2021-11-30. – М.: Стандартинформ, 2021. – 46 с.
18. Стандарт Банка России СТО БР ИББС-1.2-2014 Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Методика оценки соответствия информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации требованиям СТО БР ИББС-1.0-2014. – Введ.: 2014-06-01. – М., 2014. – 101 с.

19. ГОСТ Р 57580.2-2018 Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Методика оценки соответствия. – Введ. 2018-03-28. – М.: Стандартинформ, 2018. – 23 с.
20. *Репин В.* Оценка зрелости системы управления бизнес-процессами компании. – 2020. – Режим доступа: https://www.businessstudio.ru/articles/article/otsenka_zrelosti_sistemy_upravleniya_biznes_protseessami_repin/ (дата обращения: 29.05.2023).

REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 1 maya 2022 g. № 250 «O dopolnitel'nykh merakh po obespecheniyu informatsionnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii» [Decree of the President of the Russian Federation of May 1, 2022 No. 250 “On Additional Measures to Ensure the Information Security of the Russian Federation”].
2. *Gardiner M.* The Critical Incident Response Maturity Journey. EMC Corporation, 2013. Available at: http://docs.media.bitpipe.com/io_11x/io_115661/item_894499/Critical%20Incident%20Response%20Maturity.pdf (accessed 29 May 2023).
3. SIM3: Security Incident Management Maturity Model. Open CSIRT Foundation, 2019. Available at: <http://opencsirt.org/wp-content/uploads/2019/12/SIM3-mkXVIIIc.pdf> (accessed 29 May 2023).
4. CSIRT capabilities: How to assess maturity? Guidelines for national and governmental CSIRTs. ENISA, 2016. Available at: <https://www.enisa.europa.eu/publications/csirt-capabilities> (accessed 29 May 2023).
5. *Dorofee A., Ruefle R., Zajicek M., McIntire D., Alberts C., Perl S., Huth C.L., Walters P.* Incident Management Capability Assessment. Software Engineering Institute of Carnegie Mellon University, 2018. Available at: https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/TechnicalReport/2018_005_001_538866.pdf (accessed 29 May 2023).
6. *Wahlgren G.A.* Maturity Model for Measuring Organizations Escalation Capability of IT-related Security Incidents. Academic dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Computer and Systems Sciences. Stockholm University, 2020. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1411275/FULLTEXT01.pdf> (accessed 29 May 2023).
7. State of security operations. Hewlett-Packard, 2014. Available at: <http://h41382.www4.hp.com/gfs-shared/downloads-303.pdf> (accessed 29 May 2023).
8. Os V.R. SOC-CMM: Designing and Evaluating a Tool for Measurement of Capability Maturity in Security Operations Centers. Master Thesis, Information Security Program. Luleå University of Technology, 2016, 75 p.
9. SOC-CMM Introduction. SOC-CMM, 2020. Available at: <https://www.soc-cmm.com/introduction> (accessed 29 May 2023).
10. Nettitude Blog: Cybersecurity Maturity Assessments Explained. Nettitude, 2020. Available at: <https://blog.nettitude.com/cyber-maturity-assessments-explained-nettitude> (accessed 29 May 2023).
11. Three Levels of SOC Maturity: Steps for Continual Service Improvement. Huntsman, 2018. Available at: <https://www.huntsmansecurity.com/blog/three-levels-of-soc-maturity-steps-for-continual-service-improvement/> (accessed 29 May 2023).
12. *Kuzbari T.* Security Operations Center. Part 2 – Internal SOC maturity levels. Cybereason, 2018. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/security-operations-center-part-2-internal-soc-maturity-kuzbari> (accessed 29 May 2023).
13. *Crump J.* Security Operations Center – Use Case Maturity Model/Cube (SOC-UCMM), 2018. Available at: <https://www.jeffreydoncrump.com/post/security-operations-centre-soc-managed-security-service-provider-monitoring-content-maturity-cube> (accessed 29 May 2023).
14. Postroenie i razvitie tsentrov monitoringa informatsionnoy bezopasnosti (SOC) [Construction and development of information security monitoring centers (SOC)]. PwC, 2019. Available at: <https://www.pwc.ru/ru/services/technology/cyber-security/soc.html> (accessed 29 May 2023).
15. The Security Operations Maturity Model: A Practical Guide to Assessing and Improving the Capabilities of Your Security Operations Center. LogRhythm, 2019. Available at: <https://logrhythm.com/security-operations-maturity-model-white-paper/> (accessed 29 May 2023).
16. ISO/IEC/IEEE 15939:2017 Systems and software engineering – Measurement process, 2017, 39 p.
17. GOST R ISO/MEK 27004–2021 Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Menedzhment informatsionnoy bezopasnosti. Monitoring, otsenka zashchishchennosti, analiz i otsenivanie [GOST R ISO/IEC 27004–2021 Information technology. Security techniques. Information security management. Monitoring, security assessment, analysis and evaluation]. Introd. 2021-11-30. Moscow: Standartinform, 2021, 46 p.

18. Standart Banka Rossii STO BR IBBS-1.2-2014 Obespechenie informatsionnoy bezopasnosti organizatsiy bankovskoy sistemy Rossiyskoy Federatsii. Metodika otsenki sootvetstviya informatsionnoy bezopasnosti organizatsiy bankovskoy sistemy Rossiyskoy Federatsii trebovaniyam STO BR IBBS-1.0-2014 [Standard of the Bank of Russia STO BR IBBS-1.2-2014 Ensuring information security of organizations of the banking system of the Russian Federation. Methodology for assessing the compliance of information security of organizations of the banking system of the Russian Federation with the requirements of STO BR IBBS-1.0-2014]. Introd.: 2014-06-01. Moscow, 2014, 101 p.
19. GOST R 57580.2-2018 Bezopasnost' finansovykh (bankovskikh) operatsiy. Zashchita informatsii finansovykh organizatsiy. Metodika otsenki sootvetstviya [GOST R 57580.2-2018 Security of financial (banking) transactions. Protection of information of financial organizations. Conformity assessment methodology]. Introd. 2018-03-28. Moscow: Standartinform, 2018, 23 p.
20. Repin V. Otsenka zrelosti sistemy upravleniya biznes-protsessami kompanii [Evaluation of the maturity of the company's business process management system], 2020. Available at: https://www.businessstudio.ru/articles/article/otsenka_zrelosti_sistemy_upravleniya_biznes_pr_otsessami_repin/ (accessed 29 May 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Велигодский Сергей Сергеевич – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; e-mail: SSVeligodsky@sberbank.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89263868400; инженер.

Милославская Наталья Георгиевна – e-mail: NGMiloslavskaya@mephi.ru; тел.: 89166776599; д.т.н.; доцент; профессор.

Veligodskiy Sergey Sergeevich – National Research Nuclear University MPhI; e-mail: SSVeligodsky@sberbank.ru; Moscow, Russia; phone: +79263868400; engineer.

Miloslavskaya Natalia Georgievna – e-mail: NGMiloslavskaya@mephi.ru; phone: +79166776599; dr. of eng. sc.; associate professor; professor.

УДК 621.3.078:519.713

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-172-188

В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук

АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ КРУИЗ-КОНТРОЛЯ ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ

Целью данной работы является разработка автоматной модели круиз-контроля автомобиля, модели его прямолинейного движения и их комплексного исследования. Данная работа является актуальной в связи с отсутствием систем адаптивного круиз-контроля на отечественных автомобилях, высокой загруженности магистралей и утомительному для водителя движению в пробках. Для достижения поставленной цели в работе решена задача разработки автоматной модели системы круиз-контроля, включающей десять возможных состояний с учетом взаимодействия с штатными подсистемами автомобиля и радаром. В модели учтены диапазоны изменения скоростей движения автомобиля в зависимости от оборотов двигателя, а также оценивается длительность торможения в зависимости от дорожной обстановки и состояния подсистем автомобиля. На основе автоматной модели получены шесть сценариев работы системы круиз-контроля, учитывающие возможные ошибки и управляющие воздействия на подсистемы автомобиля в зависимости от текущей ситуации. При разработке модели прямолинейного движения учитывались силы трения и сопротивления воздуха, сила тяжести, сила тяги и сила инерции. Модель дополнена зависимостью крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала, полученной путем аппроксимации, а также углом изменения наклона дорожного полотна. В процессе исследований установлено, что для повышения адекватности модели требуется учитывать динамику двигателя и трансмиссии. Данный недостаток устранен путем введения двух дополнительных дифференциальных уравнений первого порядка. При

исследовании комплексной модели круиз-контроля в качестве регулятора скорости использовался ПИД-регулятор и П-регулятор в качестве контроллера препятствий. Настройка параметров регуляторов выполнялась с использованием генетических алгоритмов из пакета MATLAB. Экспериментальные исследования на имитационной модели показали высокую эффективность разработанных моделей и алгоритмов.

Система круиз-контроля; адаптивная система; аппроксимация крутящего момента; конечный автомат состояний.

V.V. Soloviev, A.Ya. Nomerchuk

AUTOMATIC CRUISE CONTROL MODEL FOR A CAR

The purpose of this work is to develop an automatic model of cruise control of a car, a model of its rectilinear motion and their comprehensive study. This work is relevant due to the lack of adaptive cruise control systems on domestic cars, high traffic congestion and tedious traffic jams for the driver. To achieve this goal, the task of developing an automatic model of the cruise control system, including ten possible states, taking into account the interaction with the standard subsystems of the car and the radar, has been solved. The model takes into account the ranges of changes in vehicle speeds depending on the engine speed, and also estimates the duration of braking depending on the road situation and the condition of the vehicle subsystems. On the based automatic model were received six scenarios of the cruise control system operation obtained, taking into account possible errors and control effects on the vehicle subsystems, depending on the current situation. During the development of the rectilinear motion model, the forces of friction and air resistance, gravity, traction force and inertia force were taken into account. The model is supplemented by the dependence of the torque on the rotational speed of the crankshaft, obtained by approximation and angle of change in the slope of the roadway. In research was found that in order to increase the adequacy of the model, it is necessary to take into account the dynamics of the engine and transmission. This disadvantage is eliminated by introducing two additional first-order differential equations. In the study of the complex cruise control model, a PID controller and a P-controller as an obstacle controller were used as a speed controller. Adjustment of the parameters of the regulators was performed using genetic algorithms from the MATLAB package. Experimental studies on the simulation model have shown the high efficiency of the developed models and algorithms.

Cruise control system; adaptive system; torque approximation; finite state automaton.

Введение. Современный автомобиль является сложной технической системой, содержащей несколько подсистем управления: расходом топлива, расходом воздуха, частотой вращения коленчатого вала, климат контролем и прочими. Одной из подсистем, которая используется в современных автомобилях является система круиз-контроля [1]. Система круиз-контроля в современных зарубежных автомобилях очень популярна. Она представляет собой программно-аппаратный комплекс, который позволяет поддерживать скорость движения автомобиля на постоянном уровне [2]. Данная система очень удобна при движении автомобиля за городом, в случае, когда он движется с постоянной скоростью на протяженных участках маршрута движения. Фактически при включении круиз-контроля водителю нет необходимости нажимать на педаль газа и, в некотором смысле, автомобиль движется автоматически.

Система круиз-контроля не только облегчает водителю управление автомобилем, но и уменьшает расход топлива. По информации из различных источников система круиз-контроля позволяет экономить до 7% топлива. Также в источнике [2] отмечается, что при систематическом использовании системы круиз-контроля удается снизить износ деталей автомобиля и уменьшить эксплуатационные расходы на 1,5%.

В составе пассивной система круиз-контроля можно выделить сервопривод, который присоединен к механизму подачи топлива через трос или тягу. У сервопривода организована обратная связь через датчик положения педали газа. Если

автомобиль движется с постоянной скоростью по дороге, то педаль газа находится под определенным углом, который не изменяется. Если данная скорость устраивает водителя, то он нажатием кнопки на панели приборов или рычага на руле включает систему круиз-контроля и электронный блок управления запоминает положение педали газа и фиксируется скорость автомобиля.

В отличие от пассивной системы активная система круиз-контроля регулирует скорость движения, а также изменяет ее в зависимости от дорожной ситуации и наличии препятствий перед автомобилем. Для этих целей в активной системе дополнительно применяется датчик измерения расстояния до препятствий. В качестве датчика до препятствий применяются радары, которые могут работать при любых погодных условиях. Радар устанавливается в передней части автомобиля за решеткой радиатора и постоянно генерирует импульсы и измеряет расстояние до препятствий.

Ниже представлен обзор публикаций, которые посвящены разработке систем круиз-контроля автомобилей.

В работе [3] автор описал функционирование системы адаптивного круиз-контроля автомобиля при движении в условиях возникновения препятствий и изменения скорости впереди едущего автомобиля. Описан порядок торможения двигателем и дисковыми тормозами в зависимости от замедления автомобиля на дороге.

Авторы работы [4] представили систему управления для адаптивного круиз-контроля автомобиля, основанную на нечеткой логике. Для измерения дистанции до препятствий использован 3D-сканер. Предложена комбинированная схема системы управления, включающая ПИД-регулятор с обратными связями по скорости движения автомобиля и позиции педали газа и блока расчета корректирующих сигналов, основанного на нечеткой логике.

В отечественном ГОСТ [5] приведены основные понятия и определения касающиеся системы адаптивного круиз-контроля. Определены характеристики системы и составные части в составе автомобиля. Определена предельная величина замедления равная $3,5 \text{ м/с}^2$ и величина ускорения равная $2,0 \text{ м/с}^2$.

В статье [6] авторы рассматривают два подхода к разработке систем адаптивного круиз-контроля автомобиля. При создании системы адаптивного круиз-контроля предложено измерять не только расстояние до препятствия, но и скорость его движения, чтобы с упреждением формировать сигналы на изменение скорости движения своего транспортного средства.

В работе [7] представлено описание системы круиз-контроля. Автор представил график измерения расстояния до препятствий, который характеризуется большим количеством помех, требующих фильтрации. Показана необходимость применения алгоритмов первичной обработки сигналов с радара, чтобы получить достоверную информацию.

В статье [8] рассматривались особенности применения систем адаптивного круиз-контроля в колоннах транспортных средств. Авторы учитывали запаздывание в канале измерения расстояния до впереди едущих транспортных средств и запаздывание при обработке информации управляющем контроллере автомобиля.

По результатам обзора публикаций можно сделать следующие выводы:

- ♦ модели и методы управления системой круиз-контроля еще недостаточно развиты;
- ♦ для повышения эксплуатационных качеств системы круиз-контроля необходимо использовать множество источников информации о дистанции, скорости движения, оборотов двигателя и т.п.;
- ♦ не найдены автоматные модели круиз-контроля, допускающие масштабирование и гибкую настройку.

В связи с этим в данной работе предложена автоматная модель системы круиз-контроля и модель прямолинейного движения автомобиля с учетом наклона дорожного полотна, позволяющие выполнять комплексные исследования по данной тематике.

Постановка задачи. Задачу разработки моделей системы круиз-контроля рассмотрим применительно для автомобиля Лада Веста [9], который выпускается в нашей стране уже более пяти лет. Автомобиль оснащается автоматизированной трансмиссией, что допускает разработку и установку системы адаптивного круиз-контроля.

Дано:

- ♦ автомобиль Лада Веста с автоматизированной трансмиссией и двигателем 122 л.с. и оснащенный радаром миллиметрового диапазона;
- ♦ доступна информация со всех датчиков автомобиля, включая ABS, трансмиссию и двигатель.

Требуется:

- ♦ разработать автоматную модель системы адаптивного круиз-контроля;
- ♦ разработать модель прямолинейного движения автомобиля, учитывающую наклон дорожного полотна;
- ♦ предложить структуру системы круиз-контроля;
- ♦ провести модельные эксперименты и оценить эффективность предложенных решений.

Автоматная модель системы круиз-контроля. Согласно описанию принципа функционирования системы адаптивного круиз-контроля и обзору публикаций по теме работы можно определить следующий состав системы: блок управления, лидар или радар для определения дистанций, штатные датчики скорости автомобиля, датчик угла наклона педали газа, датчик давления в тормозной системе, датчик оборотов двигателя.

Структурная схема системы адаптивного круиз-контроля представлена на рис. 1.

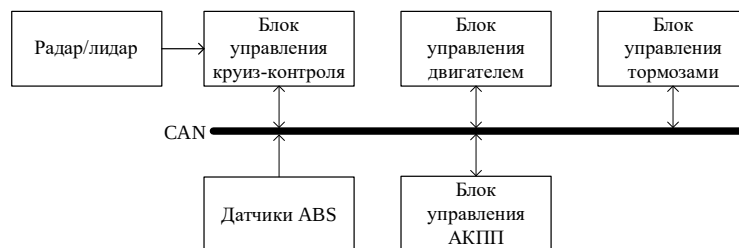


Рис. 1. Структурная схема системы адаптивного круиз-контроля

Согласно структурной схеме, датчик дистанций до препятствий подключается непосредственно к блоку управления круиз-контроля. Датчики ABS измеряют частоту вращения колес, на основе которой, можно вычислить скорость движения автомобиля. Блок управления двигателем, тормозами и автоматической коробкой передач принимают сигналы задания от блока управления круиз-контроля, направленные на коррекцию скорости движения автомобиля.

Согласно структурной схеме, в зависимости от текущей ситуации, система круиз-контроля может формировать сигналы управления на одну или несколько подсистем. Например, в одном случае достаточно уменьшить расход топлива и автомобиль медленно начнет снижать скорость движения. В другом случае, при возникновении препятствия в непосредственной близости перед автомобилем, необходимо задействовать тормозную систему.

Удобной и наглядной формой представления принципа функционирования системы круиз-контроля является конечный автомат. Конечный автомат является машиной состояний, которая переходит из состояния в состояние при возникновении некоторых условий [10].

Определим для системы круиз-контроля следующие состояния: s_0 – система выключена, s_1 – система ожидает ввода данных, s_2 – расчет текущей скорости движения автомобиля, s_3 – считывание показаний тахометра, s_4 – расчет дистанций до препятствий, s_5 – расчет изменения скорости движения, s_6 – расчет изменения передаточного отношения АКПП, s_7 – расчет длительности торможения, s_8 – формирование управляющих сигналов, s_9 – сигнализация водителю, s_{10} – ошибка системы.

В состоянии s_1 система ожидает активации со стороны водителя при этом фиксируется текущая скорость движения автомобиля, как желаемая.

В состоянии s_2 выполняется вычисление текущей скорости движения на основе информации от датчиков ABS автомобиля:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^4 n_i}{4 \cdot \pi} \cdot R, \quad (1)$$

где n_i – частота вращения колеса (об/сек), R – радиус колеса (м).

По выражению (1) можно вычислить линейную скорость движения автомобиля по показаниям датчиков ABS.

В состоянии s_3 считываются показатели оборотов двигателя с датчика частоты вращения.

В состоянии s_4 считываются координаты препятствий с радара.

В состоянии s_5 на основании текущей скорости автомобиля, заданной скорости от водителя и информации о препятствиях рассчитывается изменение скорости автомобиля.

Здесь целесообразно было бы руководствоваться ГОСТ Р ИСО 15622-2017 [4], который регламентирует расстояния, на которых система круиз-контроля переходит в разные состояния, как представлено на рис. 2.

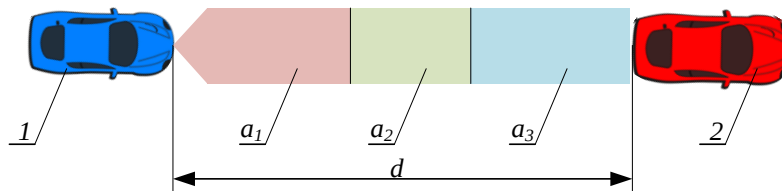


Рис. 2. Зоны работы системы круиз-контроля

На рисунке представлено два автомобиля следующие друг за другом. В автомобиле 1 установлена система круиз-контроля. Согласно ГОСТ:

- ♦ если автомобиль 2 находится в зоне a_3 , то требуется измерение расстояния до него;
- ♦ если автомобиль 2 находится в зоне a_2 , то требуется его обнаружение;
- ♦ если автомобиль 2 находится в зоне a_1 , не требуется обнаружение автомобиля.

Таким образом, ГОСТ ориентирован только на системы-круиз контроля для поддержания расстояния до впереди едущего автомобиля, и никак не затрагивает вопросы предупреждения столкновения. По аналогии с ГОСТ предлагается схема деления на зоны работы системы круиз-контроля, предполагающая следующую логику:

♦ при возникновении препятствия в зоне a_3 изменяется расход топлива для изменения скорости автомобиля при сохранении оборотов двигателя в интервале 1500-2000 об/мин;

♦ при возникновении препятствия в зоне a_2 изменяется расход топлива для изменения скорости автомобиля и передаточное отношение АКПП для сохранения оборотов двигателя в интервале 1500-2000 об/мин;

♦ при возникновении препятствия в зоне a_1 изменяется расход топлива для изменения скорости автомобиля, передаточное отношение АКПП и подключается тормозная система для предупреждения столкновения;

♦ при отсутствии препятствий в зоне действия радара изменяется расход топлива, и может, передаточное отношение АКПП для поддержания требуемой скорости движения автомобиля.

В публикации [11] представлена диаграмма направленности радара миллиметрового диапазона, выпускаемого серийно для систем круиз-контроля. Согласно диаграмме, дальность действия радара составляет более 150 м, а ширина поля зрения превышает ± 10 м. Очевидно, что в зависимости от текущей скорости движения и от расстояния до препятствий размеры зон $a_1 - a_3$ изменяются в процессе движения.

Согласно источнику [12] скорость движения можно определить по формуле:

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{k_{\text{гл}} \cdot k_x} \cdot \frac{N}{60}, \quad (2)$$

где R – радиус колеса (м); $k_{\text{гл}}$ – передаточное отношение главной пары коробки передач; k_x – передаточное отношение выбранной передачи; N – число оборотов двигателя (об/с).

Тогда, с помощью выражения (2) можно определять диапазоны скоростей движения автомобиля на заданной передаче и оборотах двигателя или для определения оборотов двигателя при заданной скорости и заданной передаче в зонах a_2 и a_3 :

$$v_{\min} = \frac{2\pi \cdot R}{k_{\text{гл}} \cdot k_x} \cdot \frac{N_{\min}}{60}, \quad (3)$$

$$v_{\max} = \frac{2\pi \cdot R}{k_{\text{гл}} \cdot k_x} \cdot \frac{N_{\max}}{60}, \quad (4)$$

$$N = \frac{60 \cdot v \cdot k_{\text{гл}} \cdot k_x}{2\pi \cdot R}, \quad (5)$$

$$k_x = \frac{2\pi \cdot R \cdot N}{60 \cdot v \cdot k_{\text{гл}}}. \quad (6)$$

Длину тормозного пути автомобиля S_T можно найти по формуле [13]:

$$S_T = v_0 \cdot t_3 + \frac{v_0^2}{2 \cdot a_3}, \quad (7)$$

где v_0 – скорость автомобиля в начале торможения; t_3 – время запаздывания тормозной системы; a_3 – замедление автомобиля.

Тогда на основании выражения (7) можно оценить размер зоны a_1 как $2 \cdot S_T$ при предельном замедлении $3,5 \text{ м/с}^2$, регламентированным ГОСТ [4].

Требуемую длительность торможения автомобиля t_T можно найти из уравнения:

$$0,5 \cdot a \cdot t_T^2 + v_0 t_T - 0,5 S_T = 0. \quad (8)$$

Здесь принято, что тормозная система отрабатывает в течение половины длины расчетного тормозного пути, что соответствует в четыре раза большему расстоянию до препятствия.

В состоянии s_6 в системе по формуле (6) рассчитывается передаточное отношение АКПП.

В состоянии s_7 в системе из формулы (8) рассчитывается длительность торможения автомобиля.

В состоянии s_8 формируются управляющие воздействия на блок управления двигателем, АКПП и тормозной системой.

В состоянии s_9 формируются сигналы водителю о текущем состоянии системы круиз-контроля и окружающей обстановке.

В состоянии s_{10} выводится сообщение об ошибке системы, если хотя бы одна из составных частей выдала сбой.

Для определения перехода из состояния в состояние в системе круиз-контроля можно сформировать следующий перечень условий: c_0 – подано напряжение питания, c_1 – ожидание команды, c_2 – получено задание от водителя, c_3 – рассчитана текущая скорость автомобиля, c_4 – считаны показания тахометра, c_5 – рассчитана дистанция до препятствий d_o , c_6 – рассчитана длина тормозного пути S_T и она меньше $0,5 \cdot d_o$, c_7 – рассчитана длина тормозного пути S_T и она больше $0,5 \cdot d_o$, c_8 – требуется изменение передаточного отношения АКПП, c_9 – рассчитано изменение передаточного отношения АКПП, c_{10} – рассчитано изменение скорости движения, c_{11} – рассчитана длительность торможения, c_{12} – рассчитываются управляющие сигналы, c_{13} – сформированы пакеты данных, c_{14} – послана команда сигнализации водителю, c_{15} – системная ошибка, c_{16} – сформирован пакет данных об ошибке, c_{17} – послано сообщение об ошибке.

Тогда на основании перечня состояний и условий перехода система круиз-контроля может описываться автоматом состояний, представленным на рис. 3.

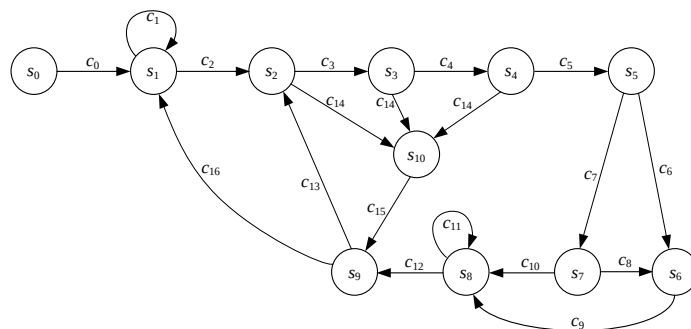


Рис. 3. Конечный автомат интеллектуальной системы круиз-контроля

Согласно разработанной схеме возможны следующие сценарии работы конечного автомата:

- ♦ $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_{10} \rightarrow s_9 \rightarrow s_1$ – ошибка расчета текущей скорости автомобиля;
- ♦ $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_{10} \rightarrow s_9 \rightarrow s_1$ – ошибка считывания показаний тахометра;
- ♦ $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4 \rightarrow s_{10} \rightarrow s_9 \rightarrow s_1$ – ошибка расчета дистанций до препятствий;
- ♦ $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4 \rightarrow s_5 \rightarrow s_8 \rightarrow s_9 \rightarrow s_2$ – скорректирована скорость движения автомобиля;
- ♦ $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4 \rightarrow s_5 \rightarrow s_6 \rightarrow s_8 \rightarrow s_9 \rightarrow s_2$ – скорректирована скорость движения автомобиля и передаточное число АКПП;
- ♦ $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4 \rightarrow s_5 \rightarrow s_7 \rightarrow s_6 \rightarrow s_8 \rightarrow s_9 \rightarrow s_2$ – скорректирована скорость движения, передаточное число АКПП и торможение автомобиля.

Математическая модель прямолинейного движения автомобиля. Рассмотрим силы, действующие на автомобиль при прямолинейном движении по дороге без поворотов [12, 14]: сила тяжести F_T , которая приложена к центру тяжести автомобиля, сила сопротивления воздуха F_B , сила тяги $F_{\text{тяг}}$, силы реакции дороги на передние колеса R_1 , на задние колеса R_2 , сила трения $F_{\text{тр}}$, сила инерции F_j .

Для упрощения рассуждений при выводе математической модели необходимо принять следующее: колеса, находящиеся на одной оси, можно считать, как одно колесо; участок дороги прямолинейный и может иметь подъемы и спуски; силы реакции дороги приложены к осям колес; силы упругости и деформации шин не учитываются.

Сила трения препятствует вращению колес и может быть выражена через силу реакции со стороны дороги по формуле:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot R = \mu \cdot m \cdot g, \quad (9)$$

где μ – коэффициент трения.

Далее будем рассматривать движение по сухому асфальту, для которого коэффициент трения равен $\mu_0 = 0,1 - 0,3$. Также на коэффициент трения влияет скорость движения автомобиля в соответствии с выражением:

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{v^2}{1500} \right),$$

где v – скорость движения автомобиля.

Сила тяжести автомобиля связана с его массой m :

$$F_T = m \cdot g, \quad (10)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Сила инерции определяется из второго закона Ньютона по формуле:

$$F_j = m \cdot a,$$

где a – ускорение автомобиля.

Из-за того, что в автомобиле имеются вращающиеся массы (колеса, маховик), необходимо учитывать их влияние на инерцию автомобиля. Для этих целей введем коэффициент учета вращающихся масс δ , который учитывается в силе инерции:

$$F_j = m \cdot a \cdot \delta.$$

Коэффициент учета вращающихся масс можно вычислить по формуле [15]:

$$\delta = 1 + \frac{(J_M \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot i_t^2 + J_k)}{m \cdot r_k^2}, \quad (11)$$

где J_M – момент инерции маховика; J_k – момент инерции колес автомобиля; r_k – радиус колеса; $\eta_{\text{тр}}$ – коэффициент полезного действия трансмиссии; i_t – коэффициент передачи трансмиссии.

Из-за того, что моменты инерции колес и маховика могут быть не известны, можно воспользоваться упрощенным выражением для коэффициента учета вращающихся масс:

$$\delta = 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot i_t^2) \frac{m_n}{m}, \quad (12)$$

где $\delta_1 \approx \delta_2$ в интервале от 0,03 до 0,05; m_n – масса полностью загруженного автомобиля.

Сила сопротивления воздуха оказывает влияние при движении автомобиля. Очевидно, что чем более обтекаемый автомобиль, тем меньшее сопротивление оказывает эта сила.

Для расчета силы сопротивления можно воспользоваться выражением следующего вида [15]:

$$F_B = \rho \cdot \gamma \cdot S \cdot v^2, \quad (13)$$

где γ – коэффициент сопротивления, который зависит от форм обводов автомобиля; v – скорость движения автомобиля; ρ – плотность воздуха; S – площадь поперечной проекции автомобиля.

Если спроектировать все силы на плоскость по направлению движения автомобиля, то получим выражение:

$$F_{\text{тяг}} = F_B + F_{\text{тр}} + F_j. \quad (14)$$

Движение будет выполняться в прямом направлении если $F_{\text{тяг}} > F_B + F_{\text{тр}}$. Также следует учитывать тот факт, что движение возможно до тех пор, пока колеса не начнут буксовать, то есть будет осуществляться контакт и сцепление с дорожным полотном. Если силы сопротивления превысят силу тяги, то двигатель автомобиля остановится. Если сила тяги превысит силу сцепления колес с поверхностью, то начнется пробуксовка.

Подставив (9)–(13) в выражение (14) получим математическую модель прямолинейного движения автомобиля:

$$F_{\text{тяг}} = \rho \cdot \gamma \cdot S \cdot v^2 + \mu_0 \left(1 + \frac{v^2}{1500} \right) \cdot m \cdot g + m \cdot a \cdot \left(1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot i_T^2) \frac{m_n}{m} \right). \quad (15)$$

Выражение (15) не удобно для моделирования, т.к. входным воздействием в системе фактически является не сила тяги, а частота вращения двигателя, передаточное число трансмиссии и момент двигателя.

Согласно источнику [15] силу тяги автомобиля можно представить в виде выражения:

$$F_{\text{тяг}} = \frac{M_d \cdot i_T \cdot i_0 \cdot \eta_T}{r_k}, \quad (16)$$

где M_d – крутящий момент двигателя; i_0 – передаточное число главной передачи; i_T – текущее передаточное число; η_T – КПД трансмиссии; r_k – отношение линейной к угловой скорости колеса.

Раскрываем выражение для силы тяги, получаем:

$$F_{\text{тяг}} = \frac{M_d \cdot i_T \cdot i_0 \cdot \eta_T \cdot n}{2\pi \cdot v}, \quad (17)$$

где n – частота вращения коленчатого вала двигателя.

Подставляем (17) в (15) и выражая ускорение через скорость, получим математическую модель прямолинейного движения:

$$\begin{aligned} \frac{M_d \cdot i_T \cdot i_0 \cdot \eta_T \cdot n}{2\pi \cdot v} &= \rho \cdot \gamma \cdot S \cdot v^2 + \mu_0 \left(1 + \frac{v^2}{1500} \right) \cdot m \cdot g + \\ &+ m \cdot \dot{v} \cdot \left(1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot i_T^2) \frac{m_n}{m} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Следует отметить, что выражение (18) не позволяет моделировать движение на спусках и подъемах, поэтому введем угол α , положительные значения которого отражают угол подъема, а отрицательные – угол спуска и представим силу тяжести в проекциях на оси в виде:

$$F_x = m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad F_y = m \cdot g \cdot \sin \alpha. \quad (19)$$

Учтем выражение (19) в (18), получим:

$$\begin{aligned} \frac{M_d \cdot i_T \cdot i_0 \cdot \eta_T \cdot n}{2\pi \cdot v} &= \rho \cdot \gamma \cdot S \cdot v^2 + \mu_0 \left(1 + \frac{v^2}{1500} \right) \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + \\ &+ m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot \dot{v} \cdot \left(1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot i_T^2) \frac{m_n}{m} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Выражение (20) является математической моделью прямолинейного движения автомобиля с учетом изменения угла наклона дорожного полотна.

Для формирования входных сигналов при исследовании математической модели можно использовать график зависимости крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала [16]. Согласно зависимости крутящего момента, диапазон рабочих оборотов коленчатого вала составляет от 1000 до 6000 об/мин. Для исследования модели (20) представим зависимость в аналитическом виде путем аппроксимации полиномом:

$$M_d = -9,14 \cdot 10^{-15} \cdot n^{12} + 1,18 \cdot 10^{-11} \cdot n^{11} - 6,95 \cdot 10^{-9} \cdot n^{10} + 2,45 \cdot 10^{-6} \cdot n^9 - 5,78 \cdot 10^{-4} \cdot n^8 + 9,59 \cdot 10^{-2} \cdot n^7 - 11,49 \cdot n^6 + 1000,55 \cdot n^5 - 62833,23 \cdot n^4 + 2,77 \cdot 10^7 \cdot n^3 - 8,18 \cdot 10^8 \cdot n^2 + 1,44 \cdot 10^{10} \cdot n - 1,15 \cdot 10^{11}, \quad (21)$$

позволяющим вычислить крутящий момент двигателя в зависимости от частоты вращения коленчатого вала с отклонением ± 1 Н·м.

Результаты экспериментов. Для исследования моделей разработана программа в среде MatLab [17].

Эксперимент 1. Исследование прямолинейного движения. Для интегрирования дифференциального уравнения (21) оно было переписано в виде:

$$\dot{v} = k_1(-k_2 \cdot v^2 - k_3 \left(1 + \frac{v^2}{1500}\right) - k_4 + \frac{k_5 \cdot n}{v}). \quad (22)$$

где $k_1 = \frac{1}{m(1+(\delta_1+\delta_2 \cdot i_T^2) \frac{m_{ш}}{m})}$, $k_2 = \rho \cdot \gamma \cdot S$, $k_3 = \mu_0 \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$, $k_4 = m \cdot g \cdot \sin \alpha$, $k_5 = \frac{M_d \cdot i_T \cdot i_0 \cdot \eta_T}{2\pi}$.

Для проверки адекватности модели изменялись следующие параметры: $v_0 = \{36, 72, 108\}$ км/ч, $i_T = \{3,873, 2, 0,532\}$, $n = \{1000, 3000, 6000\}$ об/мин.

При моделировании построено по три графика для каждого параметра, при условии фиксации остальных в первоначальных значениях, как представлено на рис. 4, а-в.

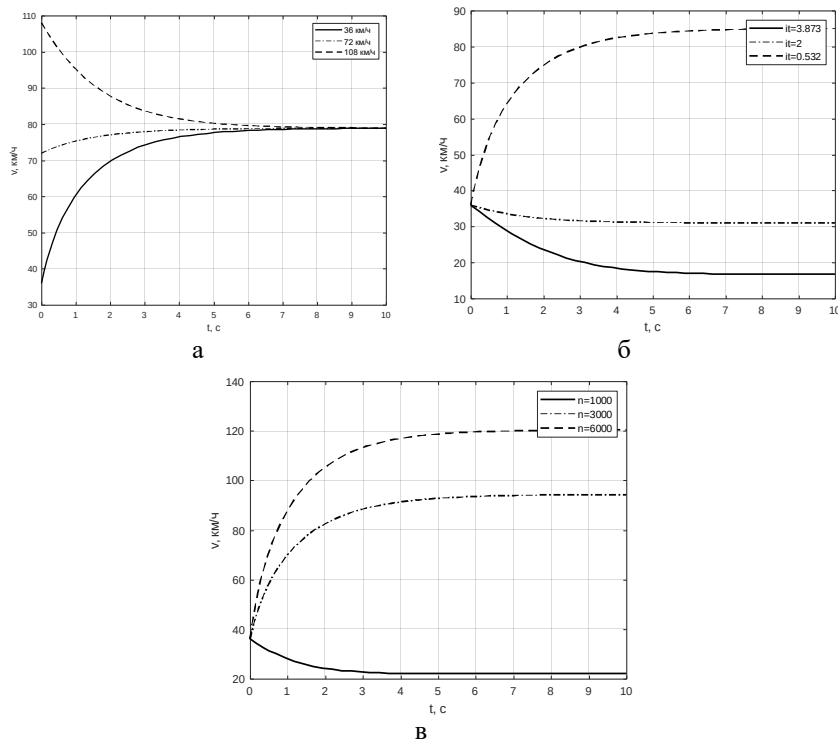


Рис. 4. Результаты оценки влияния параметров модели

На рис. 4,а представлены результаты изменения скорости автомобиля при фиксированных оборотах двигателя и передаточного отношения коробки передач. Результаты показали, что при различных начальных условиях скорость автомобиля устанавливается на уровне 78 км/ч за время около 5,5 сек.

Согласно рис. 4,б при фиксированной начальной скорости движения на уровне 36 км/ч и оборотах двигателя, скорость движения устанавливается: на уровне 17 км/ч при $i_T = 3,873$, 36 км/ч при $i_T = 2,0$ и 84 км/ч при $i_T = 0,532$. Длительность переходного процесса, также соответствует предыдущему случаю и составляет 5,5 с.

Согласно рис. 4,в при фиксированной начальной скорости движения на уровне 36 км/ч и передаточном отношении коробки передач, скорость движения устанавливается: на уровне 22 км/ч при $n=1000$ об/мин, 90 км/ч при $n=3000$ об/мин, 120 км/ч при $n=6000$ об/мин.

Для оценки общей динамики автомобиля проведено моделирование при максимальных возможных оборотах коленчатого вала $n=6000$ об/мин и высшей передаче трансмиссии с $i_T = 0,532$ (см. рис. 5,а). Согласно результатам на рис. 5,а автомобиль при максимальных оборотах коленчатого вала и высшей передачи трансмиссии разогнался до скорости 174 км/ч за время 23 секунды. Данный показатель не соответствует паспортным данным автомобиля потому, что обороты коленчатого вала и изменение передачи трансмиссии не может происходить мгновенно и первоначальной скорости движения 36 км/ч, соответствуют низкие обороты коленчатого вала и пониженная передача трансмиссии. Для устранения данного недостатка модели введены апериодические звенья первого порядка, моделирующие изменения оборотов коленчатого вала и передачи трансмиссии, заданные дифференциальными уравнениями:

$$\dot{n} = 0,03 \cdot (-n + n_0), \quad (23)$$

$$\dot{i}_T = 0,35 \cdot (-i_T + i_{T0}), \quad (24)$$

где n_0 , i_{T0} – заданные значения оборотов коленчатого вала и коэффициента передачи трансмиссии.

Результаты моделирования динамики автомобиля с учетом изменения оборотов коленчатого вала и коэффициента передачи трансмиссии представлены на рис. 5,б.

Как видно из результатов моделирования, автомобиль разгоняется до 100 км/ч за 14,5 с и предельная скорость автомобиля составляет 174 км/ч, что согласуется с паспортными данными.

При изменении угла подъема и спуска дорожного полотна $\alpha = \pm 10^\circ = \pm \pi/18$ получены графики изменения скорости при максимальных оборотах коленчатого вала и высшей передачи трансмиссии, представленные на рис. 6.

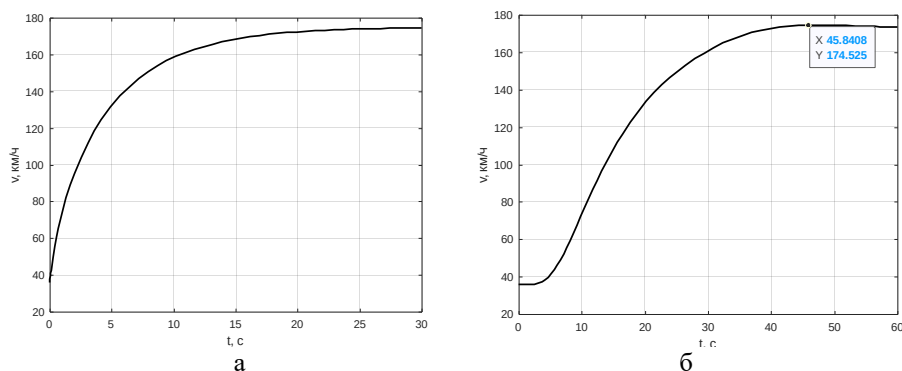


Рис. 5. Моделирование динамики автомобиля с учетом изменения оборотов коленчатого вала и коэффициента передачи трансмиссии

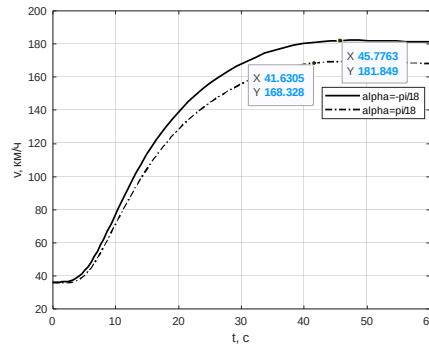


Рис. 6. Результаты моделирования подъема и спуска дорожного полотна

Как видно из результатов моделирования в математической модели учитывается угол наклона дорожного полотна. При подъеме скорость автомобиля снижается и составляет 168 км/ч, а при спуске увеличивается до 181 км/ч. Таким образом, полученная математическая модель прямолинейного движения (22)-(24) адекватно отражает динамику автомобиля.

Эксперимент 2. Исследование системы круиз-контроля. На рис. 7 представлена структурная схема моделирования системы круиз-контроля.

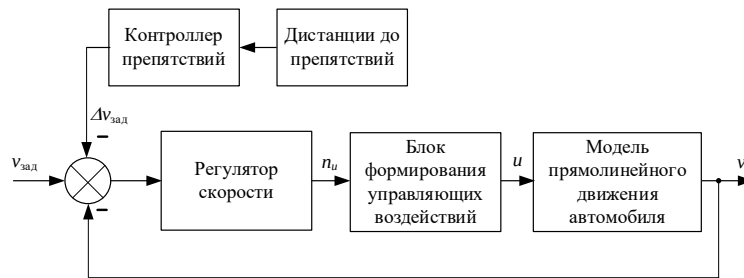


Рис. 7. Структурная схема моделирования системы круиз-контроля

Согласно структурной схеме моделирования, регулятор скорости формирует значение требуемой частоты коленчатого вала n_u на основании рассогласования между заданным значением от водителя $v_{\text{зад}}$, текущей скоростью автомобиля и поправкой от контроллера препятствий. На основании информации о дистанциях до препятствий, контроллер препятствий формирует изменение заданной скорости автомобиля, чтобы не допустить опасного сближения с препятствием. Требуемая частота коленчатого вала поступает на блок формирования управляющих воздействий, в котором формируется частота оборотов коленчатого вала из диапазона 1500 – 2500 об/мин и коэффициент передачи трансмиссии, а также, в случае необходимости, задействуется тормозная система автомобиля.

Модель (20)-(24) позволяет принимать входные сигналы частоты оборотов и коэффициента передачи, но не учитывает тормозную систему автомобиля. По данным источника [18] тормозной путь автомобиля Лада Веста со скорости 100 км/ч до нуля на сухом асфальте составляет 32,6 м. Тогда можно использовать дополнить модель (20) уравнением изменения скорости движения $\dot{v} = -0,85 \cdot v$, которое позволяет получить требуемый тормозной путь.

В качестве регулятора скорости рассматривался ПИД-регулятор [19]. В качестве контроллера препятствий рассматривался П-регулятор следующего вида:

$$\Delta v_{\text{зад}}(k) = k_{\text{dist}}(d_{\text{max}} - d_{k.\text{min}}), \quad (25)$$

где k_{dist} – настроечный коэффициент контроллера препятствий; d_{max} – максимальная дальность действия радара автомобиля; $d_{k.\text{min}}$ – минимальная дистанция до препятствия на k -м отсчете.

На выходе блока формирования управляющих воздействий формируется вектор, содержащий компоненты: частота оборотов коленчатого вала, коэффициент передачи трансмиссии, признак необходимости торможения:

$$u(k) = (n(k), i_{\text{т}}(k), t_{\text{т}}(k)). \quad (26)$$

При исследовании системы круиз-контроля определены зоны работы интеллектуальной системы круиз-контроля $a_1 = 0 \dots 50$ м, $a_2 = 50 \dots 100$ м, $a_3 = 100 \dots 150$ м (см. рис. 2). Таким образом, предельная дальность работы системы составляет 150 м.

Для настройки ПИД-регулятора использован global optimization toolbox пакета MATLAB [20], позволивший найти коэффициенты: $k_{\text{п}} = 99,4$, $k_{\text{и}} = 24,8$, $k_{\text{д}} = 1,1$. Результаты моделирования системы круиз-контроля в разных условиях представлены на рис. 8-10.

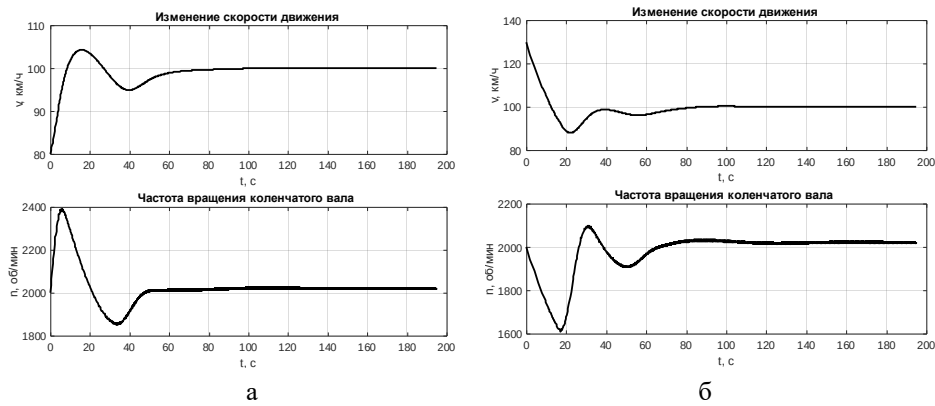


Рис. 8. Результаты моделирования системы круиз-контроля при движении по прямой линии

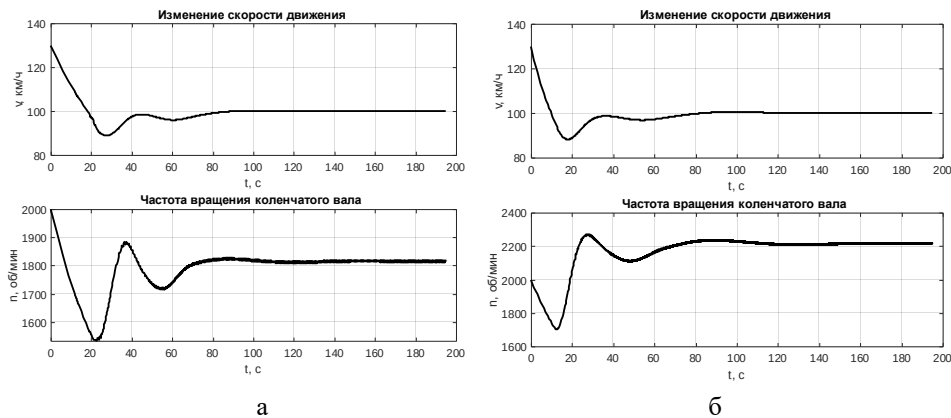


Рис. 9. Результаты моделирования системы круиз-контроля при движении на спуске (а) и подъеме (б)

Согласно рис. 8,а установлена начальная скорость движения на уровне $v_0=80$ км/ч, а требуемая – $v_g=100$ км/ч, а на рис. 8,б $v_0=130$ км/ч, а требуемая – $v_g=100$ км/ч. Видно, что регулятор стабилизирует скорость и ошибка в установившемся режиме равна нулю. Есть незначительное перерегулирование скорости, но при этом частота вращения коленчатого вала находится в оптимальных пределах 1600–2400 об/мин. Длительность переходного процесса составила около 50 секунд. Кроме того, при плавном изменении скорости движения гарантируется отсутствие неприятных ускорений, воздействующих на водителя и пассажиров.

На рис. 9, а-б представлены результаты снижения скорости движения с 130 км/ч до 100 км/ч на спуске и подъеме в 10° . Как видно из графиков на спуске обороты двигателя находятся еще в более благоприятном диапазоне 1500–2000 об/мин, а на подъеме лежат в интервале 1700–2300 об/мин. В обоих случаях скорость стабилизируется регулятором на требуемом уровне в течение 30–40 с.

На рис. 10 представлены результаты моделирования движения автомобиля на скорости 100 км/ч при возникновении автомобиля на расстоянии 145 м, двигающегося со скоростью 98 км/ч.

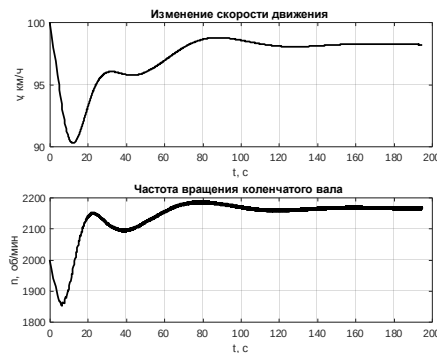


Рис. 10. Результаты моделирования системы круиз-контроля с движущимся препятствием

Согласно результатам, скорость движения автомобиля снизилась, дистанция между автомобилями увеличилась, а затем скорость поднялась до 98 км/ч и установилась на данном уровне.

Заключение. Представленные в статье модели могут быть использованы при разработке и исследовании систем адаптивного круиз-контроля для автомобилей с автоматизированными трансмиссиями. Предложенная автоматная модель отличается простой реализации в управляющих контроллерах, полнотой возможных состояний и условий перехода между ними. Модель прямолинейного движения автомобиля учитывает изменение наклона дорожного полотна, зависимость крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала и упрощенную динамику двигателя и трансмиссии. Результаты моделирования свидетельствуют об адекватности модели прямолинейного движения и позволяют применять ее для различных исследований, включая трение и аэродинамику. Следует отметить, что во всех модельных экспериментах частота вращения коленчатого вала оставалась в пределах, продляющих ресурс двигателя и обеспечивающих комфорт пассажиров. Введение дополнительной обратной связи для ускорения автомобиля, позволит в дальнейшем реализовать несколько режимов работы круиз-контроля в зависимости от предпочтений водителя.

В дальнейшем авторы планируют исследовать разработанные модели применительно к автомобилям с бесступенчатой трансмиссией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Протасов В.И., Хомутильников А.Е., Иванников М.С. [и др.]. Система адаптивного круиз-контроля ACC и Радарные системы оповещения об опасном нарушении дистанции безопасности при движении // Интернаука. – 2022. – № 11-3 (234). – С. 5-7.
2. Система круиз-контроля. – URL: <https://etlib.ru/blog/581-kruiz-kontrol-cto-eto-takoe> (дата обращения: 25.02.2023).
3. Савин И.В. Система адаптивного круиз-контроля в современных транспортных средствах // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 313-316.
4. Pananurak, Worrawut, Somphong Thanok and Manukid Parnichkun. Adaptive cruise control for an intelligent vehicle // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. – 2009. – P. 1794-1799.
5. ГОСТ Р ИСО 15622-2017: Интеллектуальные транспортные системы. Системы адаптивного круиз-контроля. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытания.
6. Chamraz S., Balogh R. Two Approaches to the Adaptive Cruise Control (ACC) Design. – Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. – P. 1-7.
7. Зайцев Э.М. Разработка системы адаптивного круиз-контроля // Наука без границ. – 2020. – № 3 (43). – С. 68-75.
8. Gunter G. et al. Are commercially implemented adaptive cruise control systems string stable? // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2020. – P. 1-12.
9. Руководство по эксплуатации автомобиля Lada Vesta и его модификации. – АО «Автоваз», 2020. – 172 с.
10. Любимова Т.В. Конечный автомат: теория и реализация // Университетская наука. – 2020. – № 1 (9). – С. 117-121.
11. Volkswagen Driver Assistance Systems: Design and Function. Self-Study Program. – Volkswagen Group of America, Herndon. 2016. – 65 p.
12. Кравец В.Н. Теория автомобиля. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2007. – 368 с.
13. Саржанов Д.К., Балабаев О.Т., Абишев К.К., Токанов С.С., Кипшаков Б.Б. К вопросу определения пути торможения автомобиля // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6-3. – С. 424-427.
14. Агеикин Я.С., Вольская Н.С. Теория автомобиля. – М.: Москов. гос. индустр. ун-т, 2008. – 318 с.
15. Тарасик В.И. Теория движения автомобиля. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
16. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 403 с.
17. Худорожков С.И. Моделирование работы системы адаптивного круиз-контроля автомобиля в среде Matlab-simulink // Сб. научных трудов Международного научно-технического симпозиума и III Международного Косыгинского Форума. – М., 2021. – Т. 3. – С. 135-138.
18. Тормозной путь Лада Веста. – URL: <https://avtonova37.ru/raznoe/tormoznoj-put-lada-vesta.html> (дата обращения: 16.01.2023).
19. Воробьев В.Ю., Саблина Г.В. Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса // Автоматика и программная инженерия. – 2019. – № 1 (27). – С. 9-14.
20. Раскин Е.М., Денисова Л.А., Мецераков В.А. Автоматизация проектирования системы регулирования с использованием генетического алгоритма оптимизации // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 7. – С. 8-14.

REFERENCES

1. Protasov V.I., Khomutinnikov A.E., Ivannikov M.S. [i dr.]. Sistema adaptivnogo kruiz-kontrolya ACC i Radarnye sistemy opoveshcheniya ob opasnom narushenii distantzii bezopasnosti pri dvizhenii [Adaptive cruise control system ACC and Radar warning systems for dangerous violation of the safety distance while driving], *Internauka* [Internauka], 2022, No. 11-3 (234), pp. 5-7.
2. Sistema kruiz-kontrolya [Cruise control system]. Available at: <https://etlib.ru/blog/581-kruiz-kontrol-cto-eto-takoe> (accessed: 25 February 2023).

3. Savin I.V. Sistema adaptivnogo kruiz-kontrolya v sovremennykh transportnykh sredstvakh [The system of adaptive cruise control in modern vehicles], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical science], 2020, No. 4, pp. 313-316.
4. Pananurak, Worrawut, Somphong Thanok and Manukid Parnichkun. Adaptive cruise control for an intelligent vehicle, *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2009, pp. 1794-1799.
5. GOST R ISO 15622-2017: Intellektual'nye transportnye sistemy. Sistemy adaptivnogo kruiz-kontrolya. Trebovaniya k ekspluatatsionnym kharakteristikam i metody ispytaniya [GOST R ISO 15622-2017: Intelligent transport systems. Adaptive cruise control systems. Performance requirements and test methods].
6. Chamraz S., Balogh R. Two Approaches to the Adaptive Cruise Control (ACC) Design. Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, pp. 1-7.
7. Zaytsev E.M. Razrabotka sistemy adaptivnogo kruiz-kontrolya [Development of an adaptive cruise control system], *Nauka bez granits* [Science without], 2020, No. 3 (43), pp. 68-75.
8. Gunter G. et al. Are commercially implemented adaptive cruise control systems string stable?, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, pp. 1-12.
9. Rukovodstvo po ekspluatatsii avtomobilya Lada Vesta i ego modifikatsii [Manual for the car Lada Vesta and its modifications]. AO «Avtovaz», 2020, 172 p.
10. Lyubimova T.V. Konechnyy avtomat: teoriya i realizatsiya [Finite automaton: theory and implementation], *Universitetskaya nauka* [Universitetskaya nauka], 2020, No. 1 (9), pp. 117-121.
11. Volkswagen Driver Assistance Systems: Design and Function. Self-Study Program. Volkswagen Group of America, Herndon. 2016, 65 p.
12. Kravets V.N. Teoriya avtomobilya [Car theory]. Nizhny Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva, 2007, 368 p.
13. Sarzhanov D.K., Balabaev O.T., Abishev K.K., Tokanov S.S., Kipshakov B.B. K voprosu opredeleniya puti tormozheniya avtomobilya [On the issue of determining the path of braking a car], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2016, No. 6-3, pp. 424-427.
14. Ageikin Ya.S., Vol'skaya N.S. Teoriya avtomobilya [Car theory]. Moscow: Moskov. gos. industr. un-t, 2008, 318 p.
15. Tarasik V.I. Teoriya dvizheniya avtomobilya [The theory of car movement]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006, 478 p.
16. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes]. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2005, 403 p.
17. Khudorozhkov S.I. Modelirovanie raboty sistemy adaptivnogo kruiz-kontrolya avtomobilya v srede Matlab-simulink [Modeling the operation of the system of adaptive cruise control of a car in the Matlab-simulink environment], *Sb. nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma i III Mezhdunarodnogo Kosygin'skogo Forum* [Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Symposium and the III International Kosygin Forum]. Moscow, 2021, Vol. 3, pp. 135-138.
18. Tormoznoy put' Lada Vesta [Braking distance Lada Vesta]. Available at: <https://avtonova37.ru/raznoe/tormoznoj-put-lada-vesta.html> (accessed 16 January 2023).
19. Vorob'ev V.Yu., Sablina G.V. Raschet i optimizatsiya parametrov diskretnogo PID-regulyatora metodom Tsiglera-Nikolsa [Calculation and optimization of parameters of a discrete PID controller by the Ziegler-Nichols method], *Avtomatika i programmaya inzheneriya* [Automation and Program Engineering], 2019, No. 1 (27), pp. 9-14.
20. Raskin E.M., Denisova L.A., Meshcheryakov V.A. Avtomatizatsiya proektirovaniya sistemy regulirovaniya s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma optimizatsii [Automation of the design of a control system using a genetic optimization algorithm], *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial ACS and controllers], 2012, No. 7, pp. 8-14.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Соловьев Виктор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043438844; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель; руководитель Центра проектной деятельности ИРТСУ ЮФУ.

Номерчук Александр Яковлевич – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; тел. +79185945894; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель.

Soloviev Viktor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043438844; the department of automatic control systems; senior lecturer; head of the Center for Project Activities, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFU.

Nomerchuk Alexandr Yakovlevich – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; phone: +79185945894; the department of automatic control systems; senior lecturer.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-188-201

А.Г. Слепцов, И.С. Берешполов, Ю.А. Кравченко**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ КЛАССИФИКАЦИИ
ВИДЕОИНФОРМАЦИИ***

Статья посвящена решению научной задачи классификации видеоконтента в условиях увеличения объемов информации. Компьютерное зрение является весьма актуальной областью применения технологий искусственного интеллекта для расширения возможностей различных поисковых и архивных систем. Авторами даны определения основным терминам исследуемой предметной области. Представлена формализованная постановка решаемой задачи. Приведена развернутая классификация возможных вариантов решения поставленной задачи. С быстрым развитием информационных технологий цифровой контент демонстрирует тенденцию к взрывному росту. Классификация спортивных видео имеет большое значение для архивирования цифрового контента на сервере. Многие алгоритмы интеллектуального анализа данных и машинного обучения достигли больших успехов во многих областях для применения (таких как классификация, регрессия и кластеризация). Однако большинство этих алгоритмов имеют общий недостаток, когда обучающая и тестовая выборки находятся в одном и том же пространстве признаков и подчиняются одному и тому же распределению. В этой статье рассматривается значимость решения задачи классификации видео и автоматического аннотирования содержания видеoinформации, а также разработана модель на основе глубокого обучения и больших данных. В рамках данного исследования авторами была разработана модель, которая повышает качество классификации видео, что позволяет улучшить результаты поиска. Результаты вычислительного эксперимента показывают, что предложенная модель может эффективно использоваться для распределения по классам видео событий в рамках спортивной предметной области на основе применения сверточной нейронной сети. При этом, обеспечивается высокая точность классификации видео спортивных тренировок. По сравнению с другими моделями предлагаемая имеет преимущества простой реализации, быстрой скорости обработки, высокой точности классификации а также высокой способности к обобщению.

Глубокое обучение; информационный поток; модель классификации; видеоконтент; компьютерное зрение.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00316, <https://rscf.ru/project/22-21-00316/> в Южном федеральном университете.

A.G. Sleptsov, I.S. Bereshpolov, Yu.A. Kravchenko

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE MODEL FOR VIDEO INFORMATION CLASSIFICATION

The article is devoted to solving the scientific problem of classifying video content in the face of an increase in the information volume. Computer vision is a very relevant field of artificial intelligence technologies application to expand the capabilities of various search and archive systems. The authors give definitions to the main terms of the studied subject area. A formalized statement of the problem to be solved is presented. A detailed classification of possible options for solving the problem is given. With the rapid development of information technology, digital content is showing an explosive growth trend. The classification of sports videos is of great importance for archiving digital content on the server. Many data mining and machine learning algorithms have made great strides in many application areas (such as classification, regression, and clustering). However, most of these algorithms have a common drawback when the training and test samples are in the same feature space and follow the same distribution. This article discusses the importance of solving the problem of the video information content classification and automatic annotation, and also develops a model based on deep learning and big data. As part of this study, the authors developed a model that improves the quality of video classification, which improves search results. The results of the computational experiment show that the proposed model can be effectively used to classify video events within the sports subject area based on the use of a convolutional neural network. At the same time, high accuracy of sports training video classification is provided. Compared with other models, the proposed model has the advantages of simple implementation, fast processing speed, high classification accuracy, and high generalization ability.

Deep learning; information flow; classification model; video content; computer vision.

Введение. В условиях быстрого развития компьютеров, сетей, мультимедиа и других информационных технологий мультимедийные данные демонстрируют тенденцию к экспоненциальному росту. Видео содержит информацию со сложной структурой и большим объемом данных. Для людей с ослабленным зрением автоматическое описание видео в сочетании с технологией преобразования текста в речь переводит текст в непрерывный естественный язык для общения. Это помогает лучше понять содержание видеоинформации, тем самым облегчая жизнь слабовидящим. В области исследования автоматического аннотирования видео, интеллектуальный анализ и понимание видеоинформации, основанные на моделировании действий человека, в последние годы стали популярной исследовательской проблемой в области компьютерного зрения и распознавания образов [1]. Компьютерное зрение имеет широкую перспективу применения в области интеллектуальной помощи жизни человека, расширенного взаимодействия его с компьютером, а также поиска видео на основе анализа контента.

Растущие и увеличивающиеся объемы и вычислительная сложность данных делают недостаточными возможности определенных алгоритмов и мощности одного компьютера. Использование распределенных вычислительных платформ, чтобы справиться с огромным потреблением временной и пространственной сложности алгоритмов в средах больших данных, а также для решения проблемы концептуального дрейфа в потоках данных, стало обязательной необходимостью.

С точки зрения теоретического исследования, изучение автоматического аннотирования видеоинформации является междисциплинарной темой, которая объединяет несколько дисциплин, таких как анализ больших данных, машинное обучение, распознавание образов, компьютерное зрение и когнитивные технологии, что обеспечивает необходимую методологическую базу для этих научных областей, и ее углубленное изучение будет способствовать развитию смежных областей. С развитием нейронных сетей и появлением крупномасштабных наборов данных в области классификации изображений и распознавания образов в ряде подходов

были предприняты попытки использования сверточных нейронных сетей для изучения семантики представления изображений, а затем рекуррентных нейронных сетей для достижения соответствия получаемых решений естественному языку.

Традиционное контролируемое обучение в основном представляет собой обучение с одной меткой, в то время, как реальные целевые образцы часто бывают сложными, имеют несколько семантик и содержат несколько меток. В последние годы автоматическое понимание видеоинформации постепенно становится популярным направлением исследований в области компьютерного зрения. По сравнению с задачей распознавания изображений содержание видео включает больше информации, и одна метка не может полностью охарактеризовать видеоконтент, поэтому большинство задач для автоматического понимания видеоконтента требует введения ряда специальных меток. Эффективный анализ корреляций между метками является ключом к успеху обучения с несколькими такими маркерами. По силе корреляций интеллектуального анализа данных алгоритмы с несколькими метками можно разделить на стратегии следующих трех типов:

1. Стратегия первого типа: игнорирование корреляции между метками, например, разложение нескольких меток на несколько независимых задач бинарной классификации;

2. Стратегия второго типа: рассмотрение парных корреляций между метками, такие как ранжирование релевантных и нерелевантных меток;

3. Стратегия третьего типа: рассмотрение корреляции между несколькими метками, например, учитывая влияние всех других меток на каждую метку.

Еще один подход основан на алгоритмически применимых методах. Методы, применимые к алгоритму – это методы, расширяющие возможности конкретного алгоритма для обработки данных с несколькими метками.

1. Постановка задачи классификации видеоинформации. Огромный объем ресурсов данных, таких как поведенческие характеристики пользователей, необходимо дополнительно анализировать и добывать для создания коммерческих моделей классификации видео, чтобы предоставлять их производителям и продавцам для улучшения качества продукта [2]. Технологии больших данных и глубокого обучения не только помогут увеличить добавленную стоимость продукта, но и максимизируют ценность клиентского опыта.

Информационный поток – это набор последовательностей данных. В общем, информационный поток данных можно рассматривать как динамическую коллекцию данных, которая неограниченно увеличивается с течением времени. Он используется в области сетевого мониторинга, сенсорной сети, аэрокосмической отрасли, метеорологических измерений и контроля, финансовых услуг и т.п. Изучение информационных потоковых данных представляет собой исследование нового типа модели обработки данных и, следовательно, требует иного подхода к интеллектуальному анализу запросов данных, по сравнению с традиционными методами. Данный подход должен быть адаптирован для реализации сценариев обработки потоковых данных на основе запросов и распределенных вычислений. Это требует построения комплекса алгоритмов для максимально быстрой обработки запроса и извлечения ценных данных, в рамках решения практических задач потоковой обработки и передачи данных в информационной среде. Исследования по анализу и обработке больших объемов данных в основном проводятся в двух направлениях: запрос информационных потоковых данных и интеллектуальный анализ информационных потоковых данных [3–4].

Для решения задачи классификации видеоинформации предварительно необходимо обработать входные данные, представленные в виде видеороликов (в данном исследовании рассмотрим предметную область с обработкой видеоконтента

спортивных мероприятий). Съемка видео на спортивном тренировочном объекте обычно делится на дистанционное видео, видео среднего расстояния и видео близкого расстояния. Для более точной классификации видео спортивных тренировок входные видеоролики разбиваются на сегменты равной продолжительности, что приводит к получению субвидеосегментов:

$$V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_M\},$$

$$v_j = \{v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jq}, \dots, v_{jm}\},$$

где V представляет сегмент видео, соответствующий конкретному спортивному событию. В формуле v_j представляет видеоизображение кадра j , $j = 1, 2, 3, \dots, N$, а N задает количество кадров, преобразованных в изображение видеокдра входного видеосегмента.

В приведенном выше уравнении $jm = pm, j \neq p, j, p = 1, 2, \dots, M$ $q = 1, 2, \dots, m$ v_j представляет сегмент j -го суб-видео после сегментации видео, v_{jq} представляет изображение q -го кадра в j -м сегменте суб-видео и M представляет количество сегментов суб-видео. Временной интервал сегментированного видеополя оказывает определенное влияние на результаты классификации.

Опишем процедуру извлечения поля вектора движения. Пусть размер видео спортивной тренировки будет $M \times N \times T$, где $M \times N$ обозначают разрешение, а T обозначает длину видеоряда. Видео разделено на блоки $K \times L$, а $h \times v$ – размер блока, где $h = M/K$. Примем за основу прямоугольную систему координат для отображения вектора движения. Схема отображения векторного поля движения прямоугольной системы координат показана на рис. 1.

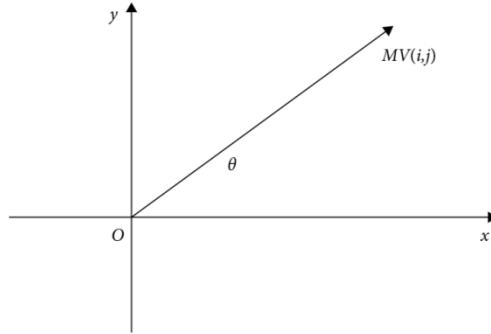


Рис. 1. Схема отображения поля вектора движения

На рис. 1 $MV(i, j)$ – это блок с позицией (i, j) , а $\theta \in [0, 2\pi)$ – это направление вектора движения C . C_x – составляющая вектора движения i -го блока в горизонтальном направлении (x), а C_y – составляющая вектора движения i -го блока в вертикальном направлении (y), ρ – интенсивность движения блока, тогда:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \\ \sin(\theta) = \frac{C_y}{\rho} \\ \tan(\theta) = \frac{C_y}{C_x} \end{cases}$$

Система координат непрерывных видеок кадров располагается в хронологическом порядке Q и разбивается на равные угловые сектора по положительному направлению x , ρ квантуется на R интервалы, а затем строятся гистограммы ρ и θ , так можно получить:

$$\begin{cases} Hist_q = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^C q_i^t, & q \in [1, Q] \\ Hist_r = \frac{1}{q} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^C r_i^t, & r \in [1, R] \end{cases}.$$

В данной системе q_i^t представляет количество векторов движения в квадранте q в кадре t и r_i^t представляет количество p квантованных r в кадре t [5].

Математическое ожидание и дисперсия вектора движения в направлениях x и y используются для оценки движения в блоке, а именно:

$$\begin{cases} \mu_x = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^C C_{x,i}^t \\ \mu_y = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^C C_{y,i}^t \\ \sigma_x^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^C (C_{x,i}^t - \mu_x)^2 \\ \sigma_y^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^C (C_{y,i}^t - \mu_y)^2 \end{cases}.$$

В данной системе $C_{x,i}^t$ и $C_{y,i}^t$ представляют компоненты вектора движения i макроблока в направлениях x и y в кадре, а μ_x, μ_y, σ_x^2 и σ_y^2 представляют математическое ожидание и дисперсию вектора движения макроблока в направлениях x и y соответственно.

2. Разработка модели классификации видеoinформации на основе сверточной нейронной сети. Сверточная нейронная сеть обычно состоит из нескольких слоев свертки, слоев понижающей выборки и слоев нормализации. Наконец, двумерная карта объектов соединяется с вектором и вводится в окончательный классификатор через полностью связанный слой, чтобы получить значение вероятности.

В сверточном слое функции верхнего слоя свертываются с помощью обучаемого ядра свертки, а затем выходные функции могут быть получены с помощью функции активации. Каждый выход может быть объединен для свертки значений нескольких входов [6]:

$$x_j^1 = f \left(\sum_{i \in M_j} x_i^{l=1} \cdot k_{ij}^{l-1} + b_j^1 \right).$$

В приведенном выше уравнении M_j представляет собой набор входных функций, связанных ядром свертки M_j и определяет связь между ядром свертки и входным слоем. Карта выходных объектов получается путем свертки ядра входной карты объектов. Предполагая, что каждое ядро свертки извлекает шаблон, любая выходная карта признаков соответствует признаку, а каждое ядро свертки эквивалентно карте признаков. Это связано с тем, что слой свертки использует технологию распределения веса, то есть каждый нейрон использует один и тот же вход проверки свертки для выполнения свертки, и каждый нейрон связан только с некоторыми входными нейронами, что уменьшает количество параметров слоя свертки. Функция f – это функция активации нейронов, которая обычно является нелинейной функцией.

Входом слоя свертки является несколько двумерных плоскостей, и каждое ядро свертки связано со всеми входными каналами. Свертка выполняется в трехмерном пространстве для получения выходных данных отклика положения. Нако-

нец, алгоритм проверяет свертку всего входного пространства, чтобы получить карту объектов. Обычно в каждом слое свертки устанавливается несколько ядер свертки, и каждое ядро свертки извлекает разные признаки, так, что каждая карта признаков представляет плоскость признаков, извлекаемую соответствующим ядром свертки.

Целью слоя понижающей выборки является повышение устойчивости сети к небольшой деформации входных выборок, чтобы улучшить производительность сети при обобщении. Где y_{ijk} используется для представления выходных данных нейрона в нижнем слое дискретизации [7]. Уровень понижающей дискретизации может быть представлен следующим выражением:

$$y_{ijk} = \sum_{pq} w_{pq} x_{i,j+p,k+q},$$

где w_{pq} – нормализованное взвешенное окно, которое может выполнять выборку каждой входной карты объектов без пересечения разных карт объектов. Количество выходных карт объектов в слое понижающей выборки такое же, как и количество входных карт объектов, что снижает разрешение каждой карты объектов.

Слой нормализации очень важен для повышения производительности нейронной сети. В модели сверточной нейронной сети уровень нормализации включает в себя нормализацию вектора признаков одной и той же карты признаков и карты признаков, расположенной в разных картах признаков, что усиливает карту признаков с более высоким значением отклика и управляет различными ядрами свертки для изучения разных шаблонов. Операция вычитания и нормализации в заданном местоположении на самом деле представляет собой значение местоположения за вычетом взвешенного значения каждого пикселя в окрестности. Вес может быть определен взвешенным по Гауссу окном. Нормализация деления является общим алгоритмом нормализации, который может усилить разницу значений отклика и улучшить эффект высокой характеристики значения отклика.

Нормализация локального отклика является распространенным алгоритмом нормализации в сверточных сетях. Значение отклика может быть задано следующим выражением:

$$b_{x,y}^i = \frac{a_{x,y}^i}{(K + \alpha \sum_{j=\max(0, i-\frac{n}{2})}^{\min(N-1, i+\frac{n}{2})} (a_{x,y}^j)^2)^\beta},$$

где $a_{x,y}^i$ представляет собой значение i -й карты входных объектов в координате (x, y) . N представляет количество входных карт объектов, а n является нормализацией на соседних картах n [8].

Слой нормализации локального отклика содержит три регулируемых параметра, а именно количество карт признаков n и параметров α и β . Все слои нормализации используют одну и ту же настройку параметров $n = 5$, $\alpha = 0,0005$, $\beta = 0,5$.

Полносвязный слой обычно находится в верхней части нейронной сети, которая образует традиционную многослойную перцептивную сеть вместе со слоем принятия решений для классификации признаков, извлеченных из слоя свертки. Переоснащение сверточной нейронной сети в основном вызвано большим количеством параметров в полносвязном слое. Технология Dropout обычно добавляется к полносвязному слою, и некоторые нейроны выбираются случайным образом для участия в обучении, чтобы предотвратить переоснащение сети.

Многослойная сверточная нейронная сеть состоит из вышеуказанных пяти слоев нейронов, которые выполняют разные функции и должны быть объединены по определенным правилам для достижения лучших результатов. Среди пяти слоев нейронов только слой свертки и полностью связанный слой содержат обучае-

мые параметры. Слой свертки так же может сохранять входную информацию о пространственном положении, которая требуется для слоя выборки. Слой свертки обычно используется попеременно со слоем понижающей дискретизации, так что разные слои свертки могут извлекать различные характеристики. Полностью связанный слой уничтожит информацию о положении характерных плоскостей и разницу между каждой характерной плоскостью. Полносвязный слой обычно используется как часть конечного многоуровневого перцептивного классификатора, который объединяет слой свертки и слой понижающей дискретизации для извлечения признаков и отправки их на уровень принятия решений для классификации.

На основе выходных данных сверточной нейронной сети события тестовой и эталонной видеоинформации сравниваются методом сопоставления событий. Учитывая символы наблюдения класса видео, модель сверточной нейронной сети с прохождением нескольких состояний обучается с использованием признаков, извлеченных из загруженных видеокладов для получения последовательности событий (вероятность события и соответствующий переход состояния) в соответствующем эталонном видео. Эталонная последовательность событий используется для создания словаря исследуемого тематического события. Для события с определенным переходом состояния (k, l) в эталонном событии распределение вероятности события аппроксимируется функцией плотности Гаусса $N(\mu_{kl}, \sigma_{kl})$, где μ_{kl} и σ_{kl} представляют собой среднее значение и дисперсию функции плотности соответственно, что определяется следующими выражениями:

$$\mu_{kl} = \frac{1}{L_1} \sum_{t=1}^{L_1} e_t^p(k, l),$$

$$\sigma_{kl} = \sqrt{\frac{1}{L_1} \sum_{t=1}^{L_1} (e_t^p(k, l) - \mu_{kl})^2}.$$

Каждому переходу состояния присваивается среднее значение и дисперсия для представления вероятности $e_t^p(k, l)$ события, происходящего в категории. Для видеоклипов спортивных тренировок, которые не появляются на этапе обучения, получение событий происходит на основе применения эталонной модели нейронной сети свертки. Тогда $e_t^p(k, l)$ обозначает вероятность события перехода состояния (k, l) во время t , когда тестовая последовательность в символе наблюдения обеспечивает эталонную модель. Обозначим через L_2 число символов наблюдения в тестовой последовательности. Сходство между тестовым видеоклипком и эталонной моделью выражается следующим уравнением [9]:

$$s = \frac{1}{L_2} \sum_{t=1}^{L_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{kl}} \exp \left[-\frac{(e_t^p(k, l) - \mu_{kl})^2}{2\sigma_{kl}^2} \right].$$

Сравнивается значение сходства s между видеороликами и всеми видами изучаемых спортивных событий, после чего они классифицируются в категорию с наибольшим значением порога сходства.

3. Разработка высокоуровневого алгоритма классификации видеоинформации. При наличии базовой структуры основной проблемой, которую необходимо решить в ходе исследования, является отсутствие экспериментальных данных. В рамках представленного исследования будем использовать общедоступный набор данных спортивных видео Sport-1M, который в настоящее время является крупнейшим набором данных классификации видеоинформации, состоящим из 1,1 миллиона спортивных видео. Каждое видео относится к одной из 487 спортивных категорий, и в этом наборе данных не проиндексированы разложенные действия определенной категории видеоинформации [10]. В настоящее время не хватает тестовых наборов данных, которые позволяют получать описания бесплатных видеофрагментов.

Для расчета дискриминационной мощности видеокадров предложен ряд методов решения этой проблемы. Одной из часто используемых стратегий является использование механизма внимания. Механизм внимания встраивается в существующую сеть описания видео для вычисления весов между различными видеокадрами и повышения точности автоматического аннотирования видеoinформации. Как показано на рис. 2, во-первых, создается набор данных о декомпозиции, для видеоданных извлечение признаков выполняется сверточной нейронной сетью, а для размеченного текста строится словарь для извлечения соответствующих признаков словаря [11]. Рис. 2 показывает структуру, в которой тренировочный набор вводится в модель обучения для преобразования видеoinформации в текст. Полученный текст достаточно точно отражает смысл соответствующего видеоконтента.

Входные данные для решаемой задачи включают в себя видеопоследовательности и текстовые последовательности. Параметры видео сначала извлекаются сверточной нейронной сетью, а затем реализуется обработка текста на естественном языке.

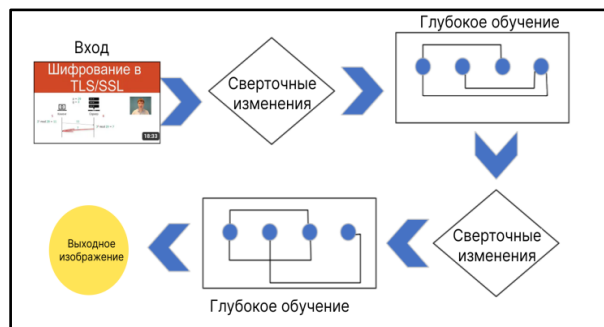


Рис. 2. Структура алгоритма классификации видеoinформации

Сверточные нейронные сети обладают некоторой степенью инвариантности к геометрическим преобразованиям, деформациям и освещению [12]. Обученные сверточные нейронные сети могут сканировать все изображение с небольшими вычислительными затратами и, следовательно, широко используются для извлечения признаков изображения. А при использовании выделения признаков особая морфология признаков не учитывается.

В данном исследовании применяется векторное представление для преобразования дескрипторов видеороликов. Слова в аннотированном тексте спортивных видеороликов сначала подсчитываются, чтобы составить словарь. Вычислительный процесс включает в себя ввод – это предложение и вывод – функция [13]. Расчет выполняется путем подсчета общего количества всех слов, описанных в наборе данных, а затем представления каждого слова в виде вектора. Схема данного процесса обработки видеопотока показана на рис. 3.

Для проверки достоверности и эффективности представленных модели и алгоритма классификации видеoinформации в качестве тестовых выборок были взяты восемь наборов данных, которые часто используются при классификации видеoinформации в исследуемой предметной области. Наборы данных включают восемь типов спортивных обучающих видеороликов, таких как баскетбол, волейбол и футбол. В качестве моделей сравнения выбраны модель опорных векторов (SVM) и модель HMM.

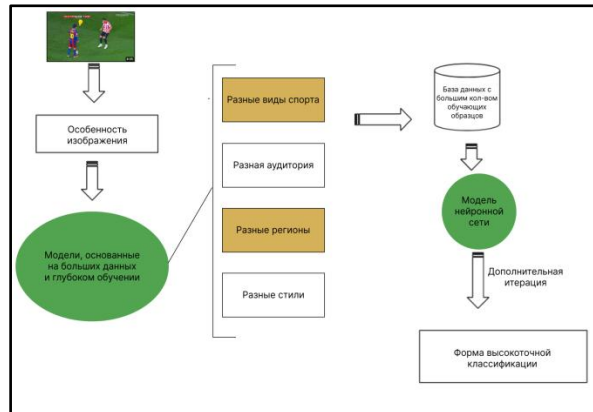


Рис. 3. Схема процесса обработки видеопотока

4. Результаты вычислительного эксперимента. Для определения точности классификации были выбраны следующие метрики: скорость отзыва (recall ratio) и скорость точности (precision ratio), эти метрики выбраны в качестве важных показателей для оценки эффективности классификации на основе применения предложенной модели. Здесь n_c используется для представления количества правильных результатов распознавания, n_m используется для представления количества неправильных результатов распознавания и n_f используется для представления количества неудачных результатов распознавания [14–21]. Для оценки выбирается среднее значение пяти экспериментов и устанавливается соотношение 2:1 для случайного разделения обучающей выборки и тестовой выборки. Уравнение индекса оценки выглядит следующим образом:

$$\text{recall ratio} = \frac{n_c}{(n_c + n_m)},$$

$$\text{precision ratio} = \frac{n_c}{(n_c + n_f)}.$$

Статистика результатов сравнения точности различных наборов данных и различных видов классификации видеoinформации представлена на рис. 4

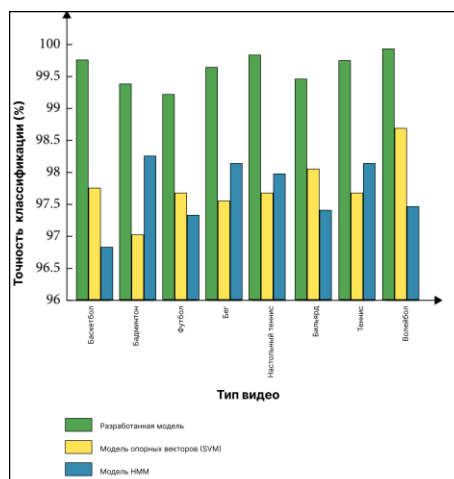


Рис. 4. Сравнение точности классификации видеoinформации

Как видно из результатов вычислительного эксперимента на рис. 4, при разных наборах данных и разных видах мероприятий точность отзыва классификации видеоинформации, классифицированной по предлагаемой модели, выше 99%, а у двух других моделей данный показатель значительно ниже, что подтверждает тот факт, что разработанная модель имеет более высокую точность классификации видеоинформации.

Статистика результатов сравнения частоты повторного просмотра различных наборов данных и различных видов классификации видеоинформации представлена на рис. 5.

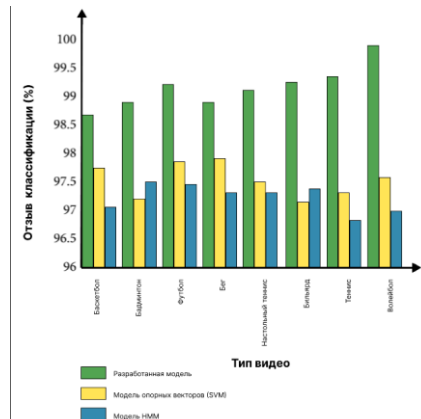


Рис. 5. Сравнение показателей классификации видеоинформации

Как видно из результатов вычислительного эксперимента на рис. 5, при разных наборах данных и разных видах спортивной подготовки показатель повторного просмотра тренировочных видеороликов, классифицированных по предложенной модели, выше 98,5%, а показатель повторного просмотра тренировочных видеороликов, классифицированных по другим моделям значительно ниже, что подтверждает эффективность предложенной модели.

Видеоданные состоят из более чем одного разложенного действия, поэтому каждый элемент видеопотока индексируется как минимум одной категорией, а категории кодируются положительными целыми числами (начиная с 1), всего 31 категория. Каждая категория может потребовать более одного слова для своего описания. Половина категорий встречается очень редко (меньше 10 раз), при этом относительно небольшое количество категорий встречается особенно часто. Рис. 6 показывает анализ частоты 16 категорий, которые встречаются более 10 раз, причем только несколько категорий имеют особенно большое количество появлений.

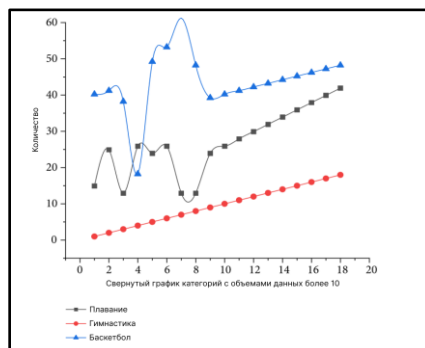


Рис. 6. Зависимость частоты появления категорий с объемом данных более 10

Приведенные выше результаты вычислительного эксперимента показывают, что предложенная модель достаточно точно классифицирует видеoinформацию, что подтверждает ее эффективность. Данная модель использует метод глубокого обучения для решения задачи классификации. Временная сложность предложенного алгоритма классификации в представленном примере составила $O(n^2)$, где n – количество анализируемых алгоритмом входных данных.

Заключение. В данной статье представлена разработка модели, которая повышает качество классификации видео, что позволяет улучшить результаты поиска. Результаты вычислительного эксперимента показали, что предложенная модель может эффективно использоваться для распределения по классам видео событий в рамках спортивной предметной области на основе применения сверточной нейронной сети.

Основными результатами проведенного исследования являются следующие:

1. Авторами даны определения основным терминам исследуемой предметной области. Представлена формализованная постановка решаемой задачи. Приведена развернутая классификация возможных вариантов решения поставленной задачи;

2. Приведена развернутая классификация возможных вариантов решения поставленной задачи;

3. Построена модель классификации спортивной видеoinформации, основанная на методе глубокого обучения. Сверточная нейронная сеть с глубоким обучением используется для целей классификации в предлагаемом исследовании. После классификации выполняется операция сопоставления событий, и осуществляется классификация видеoinформации по сходству;

4. Разработан высокоуровневый алгоритм классификации видеoinформации, реализующий основные преимущества построенной модели.

Для оценки эффективности предложенных решений разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент. Полученные результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают эффективность предложенной модели и алгоритма классификации спортивной видеoinформации. Временная сложность представленного алгоритма является полиномиальной. При выполнении исследования решены все поставленные задачи, цель данной работы достигнута.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черкасова И.С. Классификация видео контента на основе сверточных нейронных сетей // E-Scio. – 2021. – № 12 (63). – С. 395-405.
2. Киреев В.С., Федоренко В.И. Использование методов векторизации текстов на естественном языке для повышения качества контентных рекомендаций фильмов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 3. – С. 102-106.
3. Никитин И.К. Обзор методов комплексного ассоциативного поиска видео // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 71-82.
4. Кузнецов А.А. Обзор возможности обучения роботов при помощи алгоритмов глубокого обучения // Вестник науки. – 2022. – Т. 2, № 6(51). – С. 239-243.
5. Никитин И.К. Элементы ассоциативного поиска по видео // Новое слово в науке: перспективы развития. – 2014. – № 1 (1). – С. 223-230.
6. Полецук Х.А., Соломатин Д.И. Классификация видео по описаниям // Сб. студенческих научных работ факультета компьютерных наук ВГУ: Сб. статей. В 2-х ч. Ч. 2 / под ред. Д.Н. Борисова. – Вып. 13. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. – С. 183-189.
7. Бова В.В., Кравченко Ю.А., Кулиев Э.В., Курейчик В.В. Моделирование поведения субъекта в Интернет-сервисах на основе модифицированного алгоритма бактериальной оптимизации // Информационные технологии. – 2019. – Т. 25, № 7. – С. 397-404.

8. Братских И.А. Искусственный интеллект, машинное обучение, глубокое обучение и нейронные сети // Правопорядок в России: проблемы совершенствования: Сб. материалов XIV Всероссийской конференции, Москва, 11–14 февраля 2020 года. – М.: Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя, 2020. – С. 285-286.
9. Городничев Д.Ю. Машинное обучение и глубокое обучение // Современные проблемы лингвистики и методики преподавания русского языка в ВУЗе и школе. – 2022. – № 38. – С. 278-281.
10. Hu F., Hao Q., and Bao K. A survey on software-defined network and openflow: from concept to implementation // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – Vol. 16, No. 4. – P. 2181-2206.
11. Naseer S., Saleem Y., Khalid S. et al. Enhanced network anomaly detection based on deep neural networks // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 48231-48246.
12. Vo A.H., Hoang Son L., Vo M.T., and Le T. A novel framework for trash classification using deep transfer learning // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 178631-178639.
13. Tong H., Chu J., and Shen J. Image classification technology based on convolutional neural network // Science and Technology Vision. – 2017. – Vol. 1, No. 032. – P. 36-37.
14. Zhang F. and Yan J. Cloud image classification method based on deep convolutional neural network / Xibei Gongye Daxue Xuebao // Journal of Northwestern Polytechnical University. – 2020. – Vol. 38, No. 4. – P. 740-746.
15. Hecker A. Knowledge Beyond the Individual. Making Sense of a Notion of Collective Knowledge in Organization Theory // Organization Studies. – 2012. – Vol. 33. – P. 423-445.
16. Bova V.V., Kureichik V.V., Nuzhnov E.V. The Combined Method of Semantic Similarity Estimation of Problem Oriented Knowledge on the Basis of Evolutionary Procedures // Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems. – 2015. – P. 74-83.
17. Rodzin S., Rodzina L. Theory of Bioinspired Search for Optimal Solutions and its Application for the Processing of Problem-Oriented Knowledge // 8th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. – 2014. – P. 142-147.
18. Dolinina O., Suchkova N. Formal Models of the Structural Errors in the Knowledge Bases of Intellectual Decision Making Systems // Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems. – 2015. – P. 156-167.
19. Jensen J. A Systematic Literature Review of the Use of Semantic Web Technologies in Formal Education // Br. J. Edu. Technol. – 2019. – Vol. 50. – P. 505-517.
20. Гулякина Н.А., Давыденко И.Т. Семантические модели и метод согласованной разработки баз знаний // Программные продукты и системы. – 2020. – № 3. – С. 420-429.
21. Шалимов П.Ю. Модели количественной шкалы оценки семантической информации // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2020. – № 2 (8). – С. 24-32.

REFERENCES

1. Cherkasova I.S. Klassifikatsiya video kontenta na osnove svertochnykh neyronnykh setey [Video content classification based on convolutional neural networks], *E-Scio*, 2021, No. 12 (63), pp. 395-405.
2. Kireev V.S., Fedorenko V.I. Ispol'zovanie metodov vektorizatsii tekstov na estestvennom yazyke dlya povysheniya kachestva kontentnykh rekomendatsiy fil'mov [Using methods of vectorization of texts in natural language to improve the quality of movie content recommendations], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2018, No. 3, pp. 102-106.
3. Nikitin I.K. Obzor metodov kompleksnogo assotsiativnogo poiska video [Overview of methods for complex associative video search], *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the Novosibirsk State University. Series: Information technologies], 2014, Vol. 12, No. 4, pp. 71-82.
4. Kuznetsov A.A. Obzor vozmozhnosti obucheniya robotov pri pomoshchi algoritmov glubokogo obucheniya [Overview of the possibility of training robots using deep learning algorithms], *Vestnik nauki* [Bulletin of science], 2022, Vol. 2, No. 6(51), pp. 239-243.
5. Nikitin I.K. Elementy assotsiativnogo poiska po video [Elements of associative video search], *Novoe slovo v nauke: perspektivy razvitiya* [New word in science: development prospects], 2014, No. 1 (1), pp. 223-230.

6. *Poleshchuk Kh.A., Solomatin D.I.* Klassifikatsiya video po opisaniyam [Classification of videos by descriptions], *Sb. studencheskikh nauchnykh rabot fakul'teta komp'yuternykh nauk VGU: Sb. statey* [Collection of student scientific papers of the Faculty of Computer Science of the Voronezh State University: Collection of articles]. In 2nd part. Part 2, ed. by D.N. Borisova, Issue 13. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 2019, pp. 183-189.
7. *Bova V.V., Kravchenko Yu.A., Kuliev E.V., Kureychik V.V.* Modelirovanie povedeniya sub'ekta v Internet-servisakh na osnove modifitsirovannogo algoritma bakterial'noy optimizatsii [Modeling the subject's behavior in Internet services based on a modified bacterial optimization algorithm], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2019, Vol. 25, No. 7, pp. 397-404.
8. *Bratskikh I.A.* Iskusstvennyy intellekt, mashinnoe obucheniye, glubokoe obucheniye i neyronnye seti [Artificial intelligence, machine learning, deep learning and neural networks], *Pravoporyadok v Rossii: problemy sovershenstvovaniya: Sb. materialov XIV Vserossiyskoy konferentsii, Moskva, 11–14 fevralya 2020 goda* [Law and order in Russia: problems of improvement: Proceedings of the XIV All-Russian Conference, Moscow, February 11–14, 2020]. Moscow: Moskovskiy universitet MVD Rossii imeni V.Ya. Kikotya, 2020, pp. 285-286.
9. *Gorodnichev D.Yu.* Mashinnoe obucheniye i glubokoe obucheniye [Machine learning and deep learning], *Sovremennyye problemy lingvistiki i metodiki prepodavaniya russkogo yazyka v VUze i shkole* [Modern problems of linguistics and methods of teaching the Russian language at the university and school], 2022, No. 38, pp. 278-281.
10. *Hu F., Hao Q., and Bao K.* A survey on software-defined network and openflow: from concept to implementation, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, Vol. 16, No. 4, pp. 2181-2206.
11. *Naseer S., Saleem Y., Khalid S. et al.* Enhanced network anomaly detection based on deep neural networks, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 48231-48246.
12. *Vo A.H., Hoang Son L., Vo M.T., and Le T.* A novel framework for trash classification using deep transfer learning, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 178631-178639.
13. *Tong H., Chu J., and Shen J.* Image classification technology based on convolutional neural network, *Science and Technology Vision*, 2017, Vol. 1, No. 032, pp. 36-37.
14. *Zhang F. and Yan J.* Cloud image classification method based on deep convolutional neural network, *Xibe Gongye Daxue Xuebao, Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, Vol. 38, No. 4, pp. 740-746.
15. *Hecker A.* Knowledge Beyond the Individual. Making Sense of a Notion of Collective Knowledge in Organization Theory, *Organization Studies*, 2012, Vol. 33, pp. 423-445.
16. *Bova V.V., Kureichik V.V., Nuzhnov E.V.* The Combined Method of Semantic Similarity Estimation of Problem Oriented Knowledge on the Basis of Evolutionary Procedures, *Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems*, 2015, pp. 74-83.
17. *Rodzin S., Rodzina L.* Theory of Bioinspired Search for Optimal Solutions and its Application for the Processing of Problem-Oriented Knowledge, *8th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, 2014, pp. 142-147.
18. *Dolinina O., Suchkova N.* Formal Models of the Structural Errors in the Knowledge Bases of Intellectual Decision Making Systems, *Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems*, 2015, pp. 156-167.
19. *Jensen J.* A Systematic Literature Review of the Use of Semantic Web Technologies in Formal Education, *Br. J. Edu. Technol.*, 2019, Vol. 50, pp. 505-517.
20. *Gulyakina N.A., Davydenko I.T.* Semanticheskie modeli i metod soglasovannoy razrabotki baz znaniy [Semantic models and the method of coordinated development of knowledge bases], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2020, No. 3, pp. 420-429.
21. *Shalimov P.Yu.* Modeli kolichestvennoy shkaly otsenki semanticheskoy informatsii [Models of a quantitative scale for evaluating semantic information], *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management], 2020, No. 2 (8), pp. 24-32.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент С.Г. Буланов.

Слепцов Алексей Геннадьевич – Южный федеральный университет; e-mail: alslepcov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Берешполов Игорь Сергеевич – e-mail: bereshpolov@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Кравченко Юрий Алексеевич – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; доцент.

Sleptsov Aleksey Gennadievich – Southern Federal University; e-mail: alslepcov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; postgraduate.

Bereshpolov Igor Sergeevich – e-mail: bereshpolov@sfedu.ru; the department of computer aided design, postgraduate.

Kravchenko Yuriy Alekseevich – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; the department of computer aided design; dr. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.2.089

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-201-211

С.И. Клевцов

ПОРОГОВАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ СЕГМЕНТАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА

Для фиксации скачков среднего значения предложен способ детектирования, основанный на сегментации исследуемого сигнала на основе формирования кумулятивных сумм с использованием критерия Пейдж-Хинкли. Использование критерия правдоподобия Пейдж-Хинкли позволяет в реальном масштабе времени обнаружить скачкообразные изменения среднего значения контролируемого параметра объекта в условиях шума. При использовании метода предполагается, что сигнал описывается временным рядом значений исследуемого сигнала. Из этого ряда можно выделить отдельные последовательные участки, которые можно рассматривать как некоторые модели сигнала, ограниченные по времени. В основе метода лежит использование статистики критерия, на основе которой сравниваются две или три модели, оцененные по различным участкам сигнала, что позволяет обнаруживать скачкообразные изменения в параметрах модели. В методе предполагается, что рассматривается кусочно-постоянный сигнал с аддитивной помехой. В произвольные моменты времени происходят скачки среднего значения данного сигнала. Скачки среднего значения сигнала могут быть разными по знаку (фиксируются по разные стороны от оси времени) и значительно превышают исходное значение по модулю. Среднее значение сигнала – постоянная величина, близкая к нулю. Но возможна ситуация, когда повторный скачок будет сделан с уровня, отличного от близкого к нулю среднего значения, причем как в направлении возрастания, так и убывания среднего значения сигнала и изменения полярности сигнала (знака значений сигнала). Выбран критерий, который позволяет минимизировать время запаздывания в обнаружении скачка среднего значения снимаемого сигнала с минимумом ложных тревог. При этом используется сегментации исследуемого сигнала на основе формирования кумулятивных сумм с использованием критерия Пейдж-Хинкли. Использование критерия правдоподобия Пейдж-Хинкли позволяет в реальном масштабе времени обнаружить скачкообразные изменения среднего значения контролируемого параметра объекта в условиях шума.

Модель; критерий правдоподобия; скачок сигнала; детектирование; ускорение; объект.

S.I. Klevtsov

**THRESHOLD ASSESSMENT OF THE STATE OF A TECHNICAL OBJECT
BASED ON SEGMENTATION AND IDENTIFICATION
OF THE CONTROLLED PARAMETER MODEL**

To fix the jumps in the average value, a detection method based on the segmentation of the signal under study based on the formation of cumulative sums using the Page-Hinckley criterion is proposed. The use of the Page-Hinckley likelihood criterion makes it possible to detect abrupt changes in the average value of the controlled object parameter in real time under noisy conditions. When using the method, it is assumed that the signal is described by a time series of values of the signal under study. From this series, it is possible to single out separate successive sections, which can be considered as some signal models limited in time. The method is based on the use of criterion statistics, on the basis of which two or three models estimated from different parts of the signal are compared, which makes it possible to detect abrupt changes in the model parameters. The method assumes that a piecewise constant signal with additive noise is considered. At arbitrary moments of time, there are jumps in the average value of this signal. Jumps in the average value of the signal can be different in sign (fixed on different sides of the time axis) and significantly exceed the original value in absolute value. The average value of the signal is a constant value close to zero. But a situation is possible when a repeated jump will be made from a level different from the average value close to zero, both in the direction of increasing and decreasing the average value of the signal and changing the signal polarity (the sign of the signal values). A criterion has been chosen that allows minimizing the delay time in detecting a jump in the average value of the recorded signal with a minimum of false alarms. In this case, segmentation of the signal under study is used based on the formation of cumulative sums using the Page-Hinckley criterion. The use of the Page-Hinckley likelihood criterion makes it possible to detect abrupt changes in the average value of the controlled object parameter in real time under noisy conditions.

Model; likelihood criterion; signal jump; detection; acceleration; object.

Введение. Одной из важных задач систем контроля и управления является обеспечение безопасного функционирования технического объекта. В процессе контроля отслеживается изменение контролируемых параметров объекта [1–6]. Состояние технического объекта определяется совокупностью параметров, каждый из которых может меняться в заданном диапазоне значений без последствий для работоспособности объекта [7–9]. Из всей номенклатуры параметров можно выделить особо важные, выход которых за диапазон допустимых значений может привести к существенным потерям работоспособности или даже аварийной ситуации [9–13]. Система контроля и управления объектом в этом случае должна предпринять необходимые действия для устранения нештатной ситуации вплоть до остановки работы. Но эффективность этих действий зависит от того, как быстро были обнаружены недопустимые изменения и как быстро отреагировала система на них.

Снимаемые для анализа и реакции данные с технического объекта обрабатываются в системе контроля и управления с помощью микропроцессорных модулей [14]. Оценка изменения состояния объекта в микропроцессорном модуле на основе определения динамики изменения определяющего параметра может быть затруднено, если поступающий от датчика сигнал имеет шумовую составляющую.

В таком случае оценка состояния объекта может производиться путем сравнения среднего значения сигнала с границами областей значений параметра, характеризующих состояния объекта (границы нормы, опасной зоны, аварийной зоны) [15].

Особо опасны для функционирования объекта резкие, скачкообразные изменения параметра, которые сложно зафиксировать в период времени, в течение которого возможно эффективное противодействие развитию нештатной ситуации [16, 17]. Во многих случаях скачкообразное изменение среднего значения пара-

метра характеризует недопустимое изменение состояния объекта, когда можно говорить о переходе объекта из устойчивого в неустойчивое состояние, например, для автомобиля – в неустойчивое положение на дороге [18]. В этом случае важно зафиксировать величину скачка, чтобы в процессе сравнения с установленным пороговым значением λ определить факт перехода в другое состояние и момент этого перехода (время перехода в единицах времени от некоего фиксированного начального значения). Фактически речь идет об изменении моделей сигнала во времени. Основная задача сводится к задаче столь быстрого обнаружению скачка, чтобы иметь возможность в реальном времени фиксировать последующие существенные скачки и, следовательно, отслеживать существенные изменения в состоянии объекта.

Анализ задачи. Основные требования к процедуре детектирования заключаются в следующем [16]:

- ♦ Процедура должна быть малочувствительна к шуму. Иными словами, необходимо, чтобы среднее время между ложными срабатываниями T_L детектирующей процедуры было большим.

- ♦ Необходимо, чтобы запаздывание при обнаружении скачка среднего значения сигнала было небольшим, то есть среднее время запаздывания при обнаружении скачка T_Z было таким, чтобы процедура детектирования позволяла обнаружить абсолютное большинство существенных изменений состояния объекта в контролируемой ситуации.

Очевидно, что указанные требования в значительной степени противоречат друг другу, поэтому приходится принимать компромиссное решение $R = \alpha \cdot T_Z + \beta / T_L = \text{const}$ в рамках конкретной задачи.

Дополнительным требованием является невысокая вычислительная сложность алгоритма регистрации скачкообразного изменения среднего значения, определения величины скачка и момента времени его осуществления. Указанное требование связано с необходимостью выполнения алгоритма в микропроцессорном модуле системы контроля и управления в режиме реального времени в условиях ограничений, характерных для микроконтроллера, на быстродействие и объем хранимых промежуточных данных.

Для фиксации скачков среднего значения при отсутствии шума существует очень простой метод, связанный с регистрацией больших значений производной сигнала [16]. В более реалистичной версии подхода при наличии шума на первом этапе выполняется предварительная фильтрация сигнала, а затем оценка изменения производной. Однако, следует отметить, что в этом случае фильтрация сигнала приводит не только к снижению шума, но и к сглаживанию сигнала. Это, в свою очередь, может привести к неопределенности при установлении порогового значения λ в схеме сравнения этой константы с текущим значением производной и необходимости выработки процедуры уточнения базового значения λ . Более простым вариантом является установка «загрубленного» значения λ (например, значительно более низкого по отношению к базовому), но этом случае возможно увеличение ложных срабатываний.

В целом, как показывают сравнительные исследования, более эффективным способом детектирования является сегментации исследуемого сигнала на основе формирования кумулятивных сумм с использованием критерия Пейджа-Хинкли [16, 19, 20]. Использование критерия правдоподобия Пейджа-Хинкли позволяет в реальном масштабе времени обнаружить скачкообразные изменения среднего значения контролируемого параметра объекта в условиях шума.

При использовании метода предполагается, что сигнал описывается последовательными единицами, характеризуемыми некоторыми моделями. В основе метода лежит использование статистики критерия, на основе которой сравниваются две или три модели, оцененные по различным участкам сигнала, что позволяет обнаруживать скачкообразные изменения в параметрах модели.

Однако алгоритм реализации критерия Пейджа-Хинкли требует адаптации к особенностям задачи и ограничениям, связанным с его выполнением в микроконтроллере.

Постановка задачи. Предположим, что наблюдается кусочно-постоянный сигнал с аддитивной помехой. В произвольные моменты времени происходят скачки среднего значения данного сигнала.

Особенности поведения сигнала:

- ♦ Нормальный сигнал представляет собой кусочно-постоянный сигнал с аддитивной помехой. Среднее значение сигнала μ_0 – постоянная величина, близкая к нулю.

- ♦ Скачки среднего значения сигнала могут быть разными по знаку (фиксируются по разные стороны от оси времени) и значительно превышают исходное значение по модулю.

- ♦ Возможна ситуация, когда повторный скачок будет сделан с уровня, отличного от μ_0 , причем как в направлении возрастания, так и убывания среднего значения сигнала и изменения полярности сигнала (знака значений сигнала).

Необходимо выбрать критерий, который позволил бы минимизировать время запаздывания в обнаружении скачка среднего значения снимаемого сигнала с минимумом ложных тревог.

Пусть на входе некоторого датчика наблюдается последовательность дискретных сигналов $y = \{y(i)\}_{i=1}^n$, которые возмущаются белым шумом $\varepsilon = \{\varepsilon(i)\}_{i=1}^n$. Т.е. сигнал представляет собой последовательность независимых гауссовских случайных величин с дисперсией σ^2 и средним μ .

$$y = \mu + \varepsilon.$$

При этом в заведомо неизвестный момент времени τ происходит скачкообразное изменение среднего значения сигнала:

$$\mu = \begin{cases} \mu_0, & \text{если } n \leq \tau - 1, \\ \mu_1, & \text{если } n \geq \tau \end{cases},$$

где n – число, определяющее последовательность измерений сигнала из n временных отсчетов; τ – момент скачкообразного изменения.

То есть до момента времени $i=\tau-1$ значения временного ряда $y^{(0)} = \{y(i)\}_{i=1}^{\tau-1}$ принадлежат нормальному распределению с характеристиками σ^2 и μ_0 , а после момента времени $i=\tau$ значения временного ряда $y^{(1)} = \{y(i)\}_{i=\tau}^n$ принадлежат нормальному распределению с характеристиками σ^2 и μ_1 .

Временной ряд значений параметра y разбит на два временных ряда $y^{(0)}$ и $y^{(1)}$ так, что $y = \bigcup y^{(k)}, k = 0, 1$.

Задача состоит в обнаружении таких скачкообразных изменений в реальном масштабе времени.

Модель обнаружения скачкообразного изменения параметра. Основная проблема системы контроля и управления объекта сводится к скорейшему обнаружению скачкообразного изменения, чтобы иметь возможность обработать данные по другим каналам.

Необходимо решить противоречие между требованием относительно малого числа ошибочных тревог и малого запаздывания в обнаружении скачкообразного изменения, поскольку уменьшение времени обнаружения приводит к увеличению вероятности появления ошибочных тревог.

Детектор называют оптимальным, если при фиксированном среднем времени между ошибочными тревогами запаздывание в обнаружении скачкообразного изменения сигнала является минимальным.

Скачкообразное изменение сигнала свидетельствует об изменении состояния контролируемого объекта. При этом, как правило, известен порог опасного изменения параметра $Y_D = \{Y_{Dmin}, Y_{Dmax}\}$ (минимальное и максимальное значения) или величина опасного скачка параметра ΔY_D от уровня некоторого стабильного во времени.

В этом случае среднее значение сигнала после скачка можно определить, как $\mu_1 \approx \mu_0 \pm \Delta Y_D$.

Возможно

$$\mu_1 \approx \begin{cases} Y_{Dmax}, & \text{если считать, что } \mu_0 \ll |Y_D|. \\ Y_{Dmin} \end{cases}$$

Таким образом, будем считать, что множество измеренных значений параметра представляют собой случайные величины, распределенные по нормальному закону с плотностью вероятности

$$P_k(i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y^{(k)}(i) - \mu_k)^2}{2\sigma^2}}.$$

В выражении индекс k определяет временные интервалы сбора данных до скачка $[t_0, t_{\tau-1}]$ ($k = 0$) и после скачка $[t_{\tau}, t_n]$ ($k = 1$) соответственно. В рамках схемы использования критерия правдоподобия Пейджа–Хинкли индексу $k = 0$ эквивалентно принятие гипотезы H_0 на интервале $[t_0, t_{\tau-1}]$, что соответствует отсутствию скачка, а $k = 1$ – гипотезы H_1 на интервале $[t_{\tau}, t_n]$, что соответствует регистрации скачка среднего значения.

Обнаружение скачкообразного изменения является эквивалентом принятию гипотезы H_1 (есть скачкообразное изменение), когда она проверяется по отношению к гипотезе H_0 (нет скачкообразного изменения).

Критерий отношения правдоподобия для этих двух гипотез принимает вид [16, 19]:

$$\frac{\prod_{i=1}^{\tau-1} P_0(y_i) \cdot \prod_{i=\tau}^n P_1(y_i)}{\prod_{i=1}^n P_0(y_i)} = \prod_{i=\tau}^n \frac{P_1(y_i)}{P_0(y_i)}.$$

Здесь и далее для удобства полагаем $y_i = y(i)$

Логарифмирование дает статистику критерия:

$$\Lambda_n(\tau) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{i=\tau}^n (y_i - \frac{\mu_1 + \mu_0}{2}).$$

или

$$A_n(\tau) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{i=\tau}^n (y_i - \mu_0 - \frac{\mu_1 - \mu_0}{2}).$$

Окончательно

$$A_n(\tau) = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \delta \cdot \sum_{i=\tau}^n (y_i - \mu_0 - \frac{\delta}{2}),$$

$\delta = \mu_1 - \mu_0$ – величина скачкообразного изменения с учетом знака.

Введем обозначение

$$S_\tau^n(\mu_0, \delta) = \delta \cdot \sum_{i=\tau}^n (y_i - \mu_0 - \frac{\delta}{2}). \quad (1)$$

Критерий отношения правдоподобия для гипотез H_0 и H_1 тогда принимает вид

$$G_n = \max_{\tau} S_\tau^n(\mu_0, \delta) \begin{matrix} > \lambda \Rightarrow H_1, \\ < \lambda \Rightarrow H_0 \end{matrix} \quad (2)$$

где G_n – кумулятивная сумма; λ – пороговое значение критерия для принятия гипотезы H_0 или H_1 .

Оптимальность этого критерия состоит в том, что он минимизирует время запаздывания в обнаружении скачка среднего значения параметра при заданном среднем времени между ошибочными тревогами [21, 22].

Для обнаружения возникновения скачка среднего значения параметра, необходимо:

♦ априорно задать минимальное значение скачка δ_{min} , который необходимо обнаружить;

♦ на каждом шаге съема значения параметра одновременно выполнять процедуру обнаружения скачка как в сторону увеличения (3, 4), так и в сторону уменьшения (5, 6) среднего значения параметра.

Обнаружение увеличения среднего значения параметра и принятие гипотезы H_1^+ осуществляется с использованием следующих соотношений:

$$\begin{cases} \Theta_0 = 0, \\ \Theta_n = \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_0 - \frac{\delta_{min}}{2}) \quad (n \geq 1), \\ m_n = \min_{0 \leq v \leq n} \Theta_v, \end{cases} \quad (3)$$

Обнаружение фиксируется, если

$$\Theta_n - m_n \geq \frac{\lambda}{\delta_{min}}. \quad (4)$$

Обнаружение уменьшения среднего значения параметра и принятие гипотезы H_1^- осуществляется с использованием следующих соотношений:

$$\begin{cases} \Omega_0 = 0, \\ \Omega_n = \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_0 + \frac{\delta_{min}}{2}) \quad (n \geq 1), \\ M_n = \max_{0 \leq v \leq n} \Omega_v, \end{cases} \quad (5)$$

Обнаружение фиксируется, если

$$M_n - \Omega_n \geq \frac{\lambda}{\delta_{\min}}. \quad (6)$$

Если же совместно выполняются условия:

$$\Theta_n - m_n \leq \frac{\lambda}{\delta_{\min}}$$

и

$$M_n - \Omega_n \leq \frac{\lambda}{\delta_{\min}},$$

то фиксируется отсутствие увеличения и уменьшения среднего значения параметра выше критического, что соответствует принятию гипотезы H_0 .

Результаты моделирования. В качестве исходных данных для моделирования использовались данные результатов измерений ускорения при движении автомобиля по дороге с неровностями, изгибами и препятствиями (рис. 1). Измерения проводились с использованием трехосевого акселерометра, запись сигнала осуществлялась по каждой оси отдельно, шаг измерений составлял 0,015625 сек.

Как видно из рисунка, исходные данные характеризуются нестабильностью, имеются отдельные выбросы.

Для оценки параметра λ из соотношений (1) и (2) получим:

$$\frac{\sum_{i=\tau}^n y_i}{n - \tau + 1} - \mu_0 > \frac{\lambda}{\delta} + \frac{\delta}{2}.$$

Если обозначить

$$\mu_\tau = \frac{\sum_{i=\tau}^n y_i}{n - \tau + 1},$$

$$\text{то } \mu_\tau - \mu_0 > \frac{\delta}{2} + \frac{\lambda}{\delta}.$$

При фиксации скачка разность между средним значением сигнала в диапазоне $[\tau, n]$ отсчетов времени и средним значением до скачка μ_0 должна быть больше суммы половины значения контролируемой величины скачка δ и значения λ/δ . Величина λ может изменяться в диапазоне $(0 \div \delta^2/2)$. Если необходимо зафиксировать скачок как можно раньше, то $\lambda \sim 0 \div 0,1\delta^2$. Но в этом случае пороговое значение критерия достаточно низкое и есть вероятность ложной фиксации скачка. Приближение к верхней границе диапазона может привести к более позднему обнаружению скачка.

Например, при обработке сигнала, представленного на рис. 1, с использованием представленной методики, начало скачка сигнала зафиксировано при $\tau = 160$. Здесь τ измеряется в относительных единицах, каждая единица равна $\Delta\tau = 0,015625$ сек. С учетом интервала $[\tau, n]$ реальное время обнаружения скачка сигнала $\tau_{\text{jump}} = 230$ в относительных единицах. Величина скачкообразного изменения $\delta = -0,1g$.

Существующий интегральный способ обнаружения отклонений технологического процесса от заданного поля допусков может быть использован для фиксации скачка сигнала. В его основе лежит метод обнаружения нестационарности в случайном контролируемом процессе [8]. Сущность интегрального метода заключается в том, что в качестве критерия обнаружения отклонений технологического процесса от заданного поля допусков в контролируемом процессе $X(t)$ принимается площадь $S(t)$, ограниченная $X(t)$ и сглаженной реализацией $\bar{X}(t)$. Если величина площади отклонения $S(t)$ больше некоторого заданного критического значения ξ , то принимается решение о наличии отклонения от заданного поля допусков [8]. Момент превышения значения ξ можно считать моментом начала скачка сигнала.

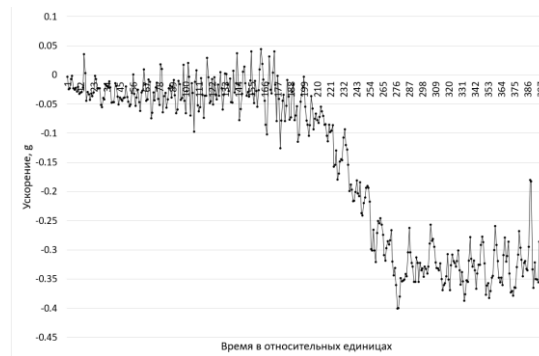


Рис. 1. График изменения ускорения от времени в относительных единицах

При определении скачка интегральным методом с предварительным сглаживанием сигнала, момент времени, когда зафиксирован скачок $\tau_{\text{jump}_r} = 272$. Разность $\tau_{\text{jump}_r} - \tau_{\text{jump}} = 42$, что составляет 0,65625 сек.

При проведении моделирования использовались данные об изменении ускорения по оси X акселерометра с характерными скачками ускорения, пронумерованными на рис. 2.

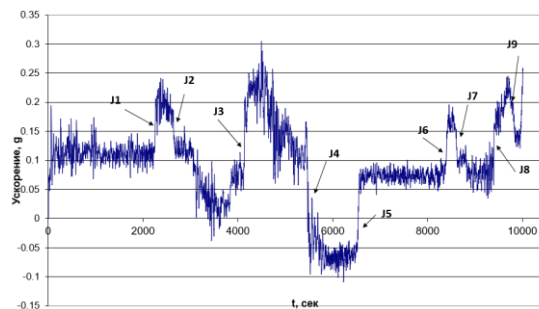


Рис. 2. График изменения ускорения по оси X акселерометра

На рис. 3 представлены результаты фиксации скачка сигнала с использованием предложенной методики и интегральным способом.

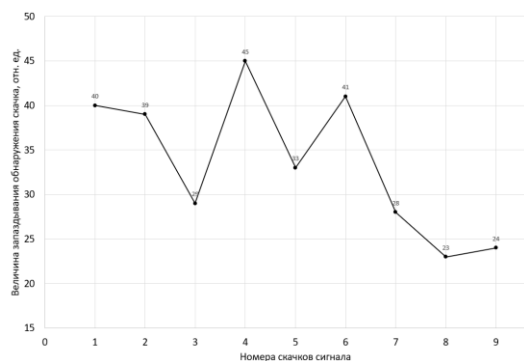


Рис. 3. Результаты сравнения времени определения скачка сигнала

Величина запаздывания момента обнаружения сигнала интегральным способом по сравнению с предлагаемым составляет в относительных единицах величину $\sim 23 \div 45$ или $\sim 0,359375 \div 0,703125$ сек. Для других исходных данных величина запаздывания будет, конечно, иной, но положительно определенной.

Заключение. Применяемый интегральный метод обнаружения нестационарности в случайном контролируемом процессе основан на накоплении результатов измерений за заданный промежуток времени. Это может привести к некоторой задержке обнаружения скачка сигнала и выходу его за технологические поля допусков.

Использование статистических критериев, таких, как отношения правдоподобия позволяет осуществить обнаружение скачкообразного изменения среднего значения параметра с минимальным запаздыванием. При этом повышается эффективность системы контроля технического объекта, достигается необходимая своевременность реакции на недопустимое отклонение контролируемого сигнала.

Это позволяет создать эффективную систему контроля состояния объекта в реальном времени и предотвратить развитие нештатного процесса за счет своевременного формирования сигнала об опасности и последующих действий по стабилизации состояния контролируемого объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бушмелева К.И., Плюснин И.И., Бушмелев П.Е., Увайсов С.У. Распределенная беспроводная система мониторинга технического состояния объектов газотранспортной сети // Измерительная техника. – 2013. – № 3. – С. 7-10.
2. Винограденко А.М., Кузнецов А.В. Система мониторинга технического состояния подвижных объектов // Техника средств связи. – 2018. – № 2 (142). – С. 103-108.
3. Винограденко А.М. Моделирование систем мониторинга технического состояния сложных технических объектов на основе методов теории энтропийных потенциалов // Техника средств связи. – 2019. – № 2 (146). – С. 71-78.
4. Бухтояров В.В. Исследование методов прогнозирования параметров технического состояния объектов при мониторинге и диагностике // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 12 (114). – С. 20-22.
5. Щербатов И.А., Долгушев А.Н., Белов М.К., Агibalов В.А., Салов И.В. Оценка технического состояния оборудования тепловой станции на примере конденсатора // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Vol. 11, No. 3. – P. 45-49.
6. Protalinsky O.M., Shcherbatov I.A., Stepanov P.V. Identification of the actual state and entity availability forecasting in power engineering using neural-network technologies // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 891, No. 1. – P. 012289.
7. Кан О.А. Организация адаптивного опроса датчиков в автоматизированной системе газового контроля // Автоматика и информатика. – 2002. – № 1-2. – С. 32-33.
8. Sadhukha. Change detection algorithms. – From <http://www.research.rutgers.edu/~sadhukha/file2.pdf>.
9. Кан О.А., Жаркимбекова А.Т., Кадирова Ж.Б., Жаксыбаева С.Р., Жолмагамбетова Б.Р. Обнаружение отклонений параметров технологического процесса в контролируемом объекте // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 5-2. – С. 186-189.
10. Ross G.J., Adams N.M., Tasoulis D.K., & Hand D.J. Exponentially Weighted Moving Average Charts for Detecting Concept Drift // Pattern Recognition Letters. – 2012. – 33 (2). – P. 191-198. – DOI: 10.1016/j.patrec.2011.08.019.
11. Raza H., Prasad G., and Li Y. Ewma model based shift-detection methods for detecting covariate shifts in non-stationary environments // Pattern Recognition. – 2015. – 48 (3). – P. 659-669. – <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.07.028>.
12. Barddal J.P., Gomes H.M., Enembreck F., Pfahringer B., & Bifet A. On dynamic feature weighting for feature drifting data streams / In P. Frasconi, N. Landwehr, G. Manco, & J. Vreeken (Eds.) // Proceedings of European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. – 2016. – Vol. LNAI 9852. – P. 129-144. Cham, Switzerland: Springer. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1_9.

13. Koroleva M.N., Burdo G.B. On ontological modeling of measurements in a complex monitoring system of technical object // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2019. – № 3. – С. 243-246.
14. Клевцов С.И. Прогнозирование измерения состояния параметров технического объекта с помощью интеллектуального микропроцессорного модуля // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010: Сб. научных трудов. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 619-622.
15. Клевцов С.И. Разработка модели и алгоритма отслеживания изменения состояния технического объекта на основе модифицированной нейронной сети Хэмминга // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 11. – С. 42-52.
16. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем: пер. с англ. М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвенист и др. / под ред. М. Бассвиль и А. Банвениста. – М.: Мир, 1989. – 278 с.
17. Ширяев А.Н. Задача скорейшего обнаружения нарушения стационарного режима // Доклады АН СССР. – 1961. – Т. 138, № 5. – С. 1039-1042.
18. Клевцов С.И. Определение момента скачкообразного изменения быстропеременной физической величины в реальном времени с использованием диаграмм Пуанкаре // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 108-113.
19. Hinkley D.V. Inference about the Change-Point from Cumulative Sum-Tests // Biometrika. – 1971. – 508, 3. – P. 509-523.
20. Mouss H., Mouss D., Mouss N., & Sefouhi L. Test of Page-Hinkley, an approach for fault detection in an agro-alimentary production system // In Proceedings of the Asian control conference. – 2004. – Vol. 2. – P. 815-818. – DOI: 10.1109/ASCC.2004.184970.
21. Basseville M. and Nikiforov I.V. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. – PTR Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. 1993. – 469 p.
22. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. – М.: Изд-во «Советское радио», 1968. – 256 с.

REFERENCES

1. Bushmeleva K.I., Plyusnin I.I., Bushmelev P.E., Uvaysov S.U. Raspredelennaya besprovodnaya sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya ob"ektov gazotransportnoy seti [Distributed wireless system for monitoring the technical condition of gas transmission network facilities], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2013, No. 3, pp. 7-10.
2. Vinogradenko A.M., Kuznetsov A.V. Sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnykh ob"ektov [Monitoring system of the technical condition of mobile objects], *Tekhnika sredstv svyazi* [Communication equipment], 2018, No. 2 (142), pp. 103-108.
3. Vinogradenko A.M. Modelirovanie sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov na osnove metodov teorii entropiynykh potentsialov [Modeling of systems for monitoring the technical condition of complex technical objects based on the methods of the theory of entropy potentials], *Tekhnika sredstv svyazi* [Communication equipment], 2019, No. 2 (146), pp. 71-78.
4. Bukhtoyarov V.V. Issledovanie metodov prognozirovaniya parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya ob"ektov pri monitoringe i diagnostike [Research of methods of forecasting parameters of the technical condition of objects during monitoring and diagnostics], *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: ways of development], 2020, No. 12 (114), pp. 20-22.
5. Shcherbatov I.A., Dolgushev A.N., Belov M.K., Agibalov V.A., Salov I.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya teplovoy stantsii na primere kondensatora [Assessment of the technical condition of the equipment of a thermal station on the example of a condenser], *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, Vol. 11, No. 3, pp. 45-49.
6. Protalinsky O.M., Shcherbatov I.A., Stepanov P.V. Identification of the actual state and entity availability forecasting in power engineering using neural-network technologies, *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2017, Vol. 891, No. 1, pp. 012289.
7. Kan O.A. Organizatsiya adaptivnogo oprosa datchikov v avtomatizirovannoy sisteme gazovogo kontrolya [Organization of adaptive survey of sensors in an automated gas control system], *Avtomatika i informatika* [Automation and computer science], 2002, No. 1-2, pp. 32-33.
8. Sadhukha. Change detection algorithms. From <http://www.research.rutgers.edu/~sadhukha/file2.pdf>.

9. Kan O.A., Zharkimbekova A.T., Kadirova Zh.B., Zhaksybaeva S.R., Zholmagambetova B.R. Obnaruzhenie odkloneniy parametrov tekhnologicheskogo protsessa v kontroliruemom ob"ekte [Detection of deviations of technological process parameters in a controlled object], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2015, No. 5-2, pp. 186-189.
10. Ross G.J., Adams N.M., Tasoulis D.K., & Hand D.J. Exponentially Weighted Moving Average Charts for Detecting Concept Drift, *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33 (2), pp. 191-198. DOI: 10.1016/j.patrec.2011.08.019.
11. Raza H., Prasad G., and Li Y. Ewma model based shift-detection methods for detecting covariate shifts in non-stationary environments, *Pattern Recognition*, 2015, 48 (3), pp. 659-669. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.07.028>.
12. Barddal J.P., Gomes H.M., Enembreck F., Pfahringer B., & Bifet A. On dynamic feature weighting for feature drifting data streams, In P. Frasconi, N. Landwehr, G. Manco, & J. Vreeken (Eds.), *Proceedings of European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, 2016, Vol. LNAI 9852, pp. 129-144. Cham, Switzerland: Springer. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1_9.
13. Koroleva M.N., Burdo G.B. On ontological modeling of measurements in a complex monitoring system of technical object, *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh system* [Open semantic technologies for designing intelligent systems], 2019, No. 3, pp. 243-246.
14. Klevtsov S.I. Prognozirovanie izmereniya sostoyaniya parametrov tekhnicheskogo ob"ekta s pomoshch'yu intellektual'nogo mikroprotsessornogo modulya [Predicting the measurement of the state of parameters of a technical object using an intelligent microprocessor module], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh system – 2010: Sb. nauchnykh trudov* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems – 2010: Collection of scientific papers]. Moscow: IPPM RAN, 2010, pp. 619-622.
15. Klevtsov S.I. Razrabotka modeli i algoritma otslezhivaniya izmeneniya sostoyaniya tekhnicheskogo ob"ekta na osnove modifitsirovannoy neyronnoy seti Khemminga [Development of a model and algorithm for tracking changes in the state of a technical object based on a modified Hamming neural network], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 11, pp. 42-52.
16. Obnaruzhenie izmeneniya svoystv signalov i dinamicheskikh system [Detection of changes in the properties of signals and dynamic systems]: transl. from engl. by M. Bassvil', A. Vilski, A. Banvenist i dr., ed. by M. Bassvil' i A. Banvenista. Moscow: Mir, 1989, 278 p.
17. Shiryayev A.N. Zadacha skoreyshego obnaruzheniya narusheniya statsionarnogo rezhima [The task of early detection of a violation of the stationary regime], *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1961, Vol. 138, No. 5, pp. 1039-1042.
18. Klevtsov S.I. Opredelenie momenta skachkoobraznogo izmeneniya bystroperemennoy fizicheskoy velichiny v real'nom vremeni s ispol'zovaniem diagramm Puankare [Determination of the moment of an abrupt change in a rapidly variable physical quantity in real time using Poincare diagrams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 5, pp. 108-113.
19. Hinkley D.V. Inference about the Change-Point from Cumulative Sum-Tests, *Biometrika*, 1971, 508, 3, pp. 509-523.
20. Mouss H., Mouss D., Mouss N., & Sefouhi L. Test of Page-Hinkley, an approach for fault detection in an agro-alimentary production system, In *Proceedings of the Asian control conference*, 2004, Vol. 2, pp. 815-818. DOI: 10.1109/ASCC.2004.184970.
21. Basseville M. and Nikiforov I.V. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. PTR Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. 1993, 469 p.
22. Romanenko A.F., Sergeev G.A. Voprosy prikladnogo analiza sluchaynykh protsessov [Questions of applied analysis of random processes]. Moscow: Izd-vo «Sovetskoe radio», 1968, 256 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: siklevcov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634680890, доб. 30107; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: siklevcov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634680890, ext. 30107; cand. of eng. sc.; associate professor.

Али Дж. Давуд Аль-Хафаджи, Г.С. Панатов, А.С. Болдырев

ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРЫЛА ПЕРЕМЕННОЙ СТРЕЛОВИДНОСТИ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) могут иметь различные формы в зависимости от типа и условий полета. В данной работе проведена оптимизация аэродинамических свойств БПЛА за счет угла стреловидности крыла (угла стреловидности) для уменьшения волнового сопротивления и задержки начала дивергенции сопротивления. Для этого использовались модели беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), разработанные с пятью различными углами стреловидности крыла (15° , 20° , 25° , 30° и 35°) и различным удлинением с постоянным коэффициентом конусности $= 0,2$. Каждое крыло было построено с аэродинамическим профилем для корневой и концевой хорд SD8020 с малым числом Маха, равным 0,058 (т. е. скоростью, равной 20 м/с). Все модели крыла были построены для трехмерного изображения с использованием программы SOLIDWORKS, а затем модели крыла были проанализированы с использованием ANSYS FLUENT. Были проведены расчеты значения аэродинамического качества для определения того, какой БПЛА имеет оптимальное значение подъемной силы и наименьшее лобовое сопротивление в зависимости от угла атаки (0° , 2° и 4°). Результаты показывают, что аэродинамические характеристики изменяются в зависимости от величины угла стреловидности и удлинения, максимальное аэродинамическое качество достигается у БПЛА с углом стреловидностью 15° и углом атаки 2° , минимальное аэродинамическое качество у БПЛА со стреловидностью 35° и углом атаки 0° . Из-за постоянного коэффициента конусности, равного 0,2, площадь крыла у каждой модели разная. Лучшая модель с максимальным отношением подъемной силы к лобовому сопротивлению имеет площадь крыла, равную $1,68 \text{ м}^2$, а модель с минимальным аэродинамическим сопротивлением имеет площадь крыла, равную $0,65 \text{ м}^2$.

Беспилотный летательный аппарат, подъем и перетаскивание, угол поворота, соотношение сторон, SOLIDWORKS, CFD, ANSYS (Fluent).

Ali J. Dawood Al-Khafaji, G.S. Panatov, A.S. Boldyrev

UNMANNED AERIAL VEHICLE AERODYNAMICS PERFORMANCE OPTIMIZATION USING VARIABLE SWEEP WING ANGLE

The unmanned aerial vehicles (UAVs) can take many forms depending on the type of UAV duty and condition of flight. In this project, optimization of UAVs aerodynamics property through the sweep angle of wing (sweepback angle) to reduce wave drag and delay the onset of drag divergence. therefor models of unmanned aerial vehicles (UAVs) designed with five different sweepback wing angle (15° , 20° , 25° , 30° , and 35°) and different aspect ratio with constant taper ratio $= 0.2$ have been used. Every wing was built with airfoil for root and tip chord SD8020, with low Mach number equal to 0.058 (i.e., Velocity equal to 20 m/s). The whole models of a wing were plotted for a three-dimensional using the SOLIDWORKS software program, and then the models of this wing were analyzed employing ANSYS FLUENT. Calculations of the value of lift to drag ratio were made for deciding which UAV has optimum value of lift and the lowest drag versus the attack angle (0° , 2° , and 4°). The results Show that the aerodynamics performance changes according to the value of the sweepback angle and aspect ratio, the maximum lift to drag ratio achieved at UAV with sweepback angle 15° and the angle of attack is 2° , minimum lift to drag ratio at UAV with sweepback angle 35° and the angle of attack is 0° . Due to constant taper ratio which equal to 0.2 the wing area different according to each model. Best model with maximum lift to drag ratio has wing area equal to 1.68 m^2 while model with minimum lift to drag has wing area equal to 0.65 m^2 .

UAV; lift and drag; sweepback angle; aspect ratio; SOLIDWORKS; CFD; ANSYS (Fluent).

1. Introduction. During the aircraft design process, an aircraft designer faces several of the challenges. Designing an efficient wing that meets the established standards is one of the most significant responsibilities. This is usually feasible due to the wing's various geometrical and aerodynamic properties being optimized [1]. Presently, aviation concentrates on cost-effective, fuel-efficient, long-range systems with minimal operational expenses. The increased need for airborne activities has led to the introduction of unmanned aircraft that can stay in the air for far longer periods of time than planes with pilots. To achieve these goals, the UAV design has been substantially explored. At the moment, UAVs can last for more than a day [2]. The term "unmanned aerial vehicle" (UAV) refers to a vehicle that may operate remotely, semi-autonomously, or fully autonomously without the need for a pilot. In comparison to piloted aerial photogrammetry, it is a current and low-cost application. UAVs come in a variety of kinds, classifications, and categories [3]. The size categories for unmanned aerial vehicles (UAVs) range from nano air vehicles (NAVs) with a wing span of under 4 cm to high altitude long endurance (HALE) aircraft with a wing span of 35 meters or more. Micro (MAV), mini, close-range, medium range or tactical, and medium altitude long endurance are some of the classifications of UAVs in between [4]. For decades, the aviation industry has been fascinated by the development of unmanned aerial vehicles (UAVs). In the conceptual design of an airplane, aerodynamic design is extremely important. The structure and systems of an aircraft, as well as the manufacturing process, are heavily influenced by the aerodynamic design layout. A good aerodynamic design allows an airplane to operate well while also lowering expenses due to decreased fuel consumption. Many criteria must be decided at the outset of the aircraft's conceptual design. For conventional aircraft, studies have established aircraft conceptual design processes and assessed numerous procedures [5].

A variety of performance characteristics may be used to classify UAVs. Wind loading, speed, range, endurance, and weight are all important characteristics that define different types of UAVs and provide the basis for appropriate classification. Depending on the Strategic, Tactical, UAV Size, and Special Task. According to their maximum gross take-off weight, usual flying altitude, and velocity, the US Department of Defence divided UAVs into five categories: small, medium, big, larger, and largest. The most frequent categories, however, are based on the size, endurance, and structure [6, 7].

2. Wing geometry parameters. A wing is formed of two-dimensional airfoil sections that form a three-dimensional shape. Wings, horizontal tails, vertical tails, canards, and/or other lifting surfaces are produced by arranging the airfoil sections in various spanwise configurations. When introducing the parameters that define the wing planform, it's important to pay attention to the presence of flow components in the spanwise direction (three-dimensional flow). In other words, airfoil section properties deal with two-dimensional flow, whereas wing planform qualities deal with three-dimensional flow. The planform (or projected shape) of a wing is often described using many concepts. The terms that are relevant to characterizing the aerodynamic properties of a wing are shown in Fig. 1 [8]:

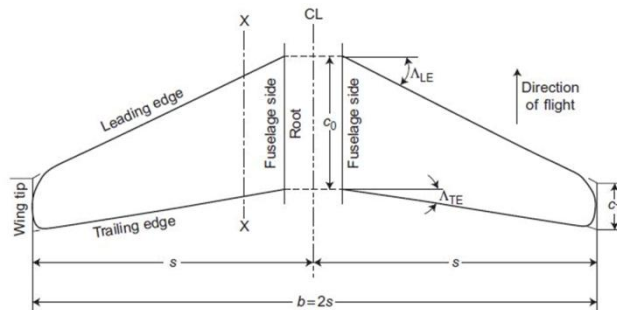


Fig. 1. Geometric characteristics of the wing planform [8]

2.1. Wingspan. The wingspan is defined as the distance between the two wingtips multiplied by the dimension b . The wing semi-span is the distance $b/2$ between each tip and the centreline [9].

2.2. Chords. The tip and root chords are the two lengths C_t and C_r , respectively; under the alternate convention, the root chord is the distance between the intersections of the leading and trailing edges formed with the fuselage centreline. The taper ratio is defined as C_t/C_r . The reciprocal of this, C_r/C_t , is sometimes used as the taper ratio. $C_t/C_r < 1$ for most wings [9].

2.3. Sweepback angle (Λ). The sweepback angle is the angle formed by the aircraft's OY lateral axis and the 25% MAC line (or occasionally the leading edge of the wing). The sweepback angle is denoted by the Greek letter Lambda. Increased sweepback angle has the benefit of lowering the effective thickness/chord ratio of the wing. The physical wing depth stays the same, but the effective wing depth is reduced, resulting in a higher critical Mach number. In contrast, too much sweepback angle can cause aileron reversal, aerodynamic tip stalling, shock stalling, and wing deformation due to partial spanwise flow towards the wingtips [8, 10]. Swept wings are usually associated with high-speed (transonic or supersonic) flight, while zero-sweep wings are occasionally used on high-speed aircraft, and many low-speed aircraft feature swept wings. The second group exists mostly due to stability concerns, particularly in the case of 'flying wing'-type aircraft, which can only be rendered statically stable with nonzero sweep in practice [11].

2.4. Area ratio. The planform area (or projected area) of the wing is simply referred to as the wing area, A . Despite the fact that a fuselage or nacelles may cover a section of the space, the pressure carryover on these surfaces permits reasonable examination of the full planform area [8]. The wing area ratio is calculated by dividing the wing area by the wingspan squared (A/b^2). The reciprocal of aspect ratio is area ratio [10].

$$A = 0.5 * (C_r + C_t) * s. \quad (1)$$

2.5. The aspect ratio (AR). The wing aspect ratio is a key feature that influences both the size and slope of the lift produced drag curve. As a result, it has a direct impact on performance as well as stability and control [1]. The aspect ratio is a measurement of the wing's slenderness or fineness ratio, or the proportions of the wing. It is critical for the aircraft designer to understand the aerodynamic properties of the wing as well as the structural weight analysis. The wing planform has a bigger impact than the wing area. The aspect ratio is defined as the ratio of wingspan to average wing chord (span/chord) or more succinctly (span²/wing area) and is determined by the tip-to-tip wingspan (b) and its chord (c).

$$AR = \frac{b^2}{A} \text{ or } \frac{b}{c} \quad (2)$$

The first ratio (b/c) is applied when calculating rectangular wings; the second ratio (b^2/S) is more efficient when calculating other planform wings. The aspect ratio is small. A high sweepback angle of at least 45° or larger, pointed wingtips, and a straight trailing edge characterize this wing. When opposed to a straight wing, the wing has a larger area per span, resulting in less wing loading and more fuel storage space. Because of its distance from the centre of gravity, the wing is free of flaps, which would be ineffective and operate as elevators, Fig. 2, [8, 10, 11].

For conventional subsonic aircraft and sailplanes, AR, which normally ranges from 6 to 22, has a far larger influence on the generated drag coefficient than the value of the boundary-layer thickness. As a result, the capacity to make the aspect ratio as big as feasible, rather than being near to an elliptical lift distribution, is the major design element for minimizing induced drag. One of Prandtl's lifting-line theory's major wins was the discovery that generated drag coefficient is inversely related to AR [12].

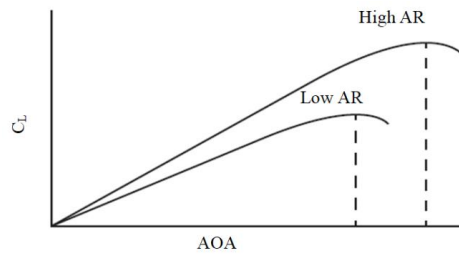


Fig. 2. Aspect Ratio & Lift Coefficient [10]

It's simple to start determining the remaining geometric parameters after the wing area and wingspan have been calculated. Aspect ratio, taper ratio, wing sweep, dihedral, and other features of the wing's geometric arrangement are only a few examples. The geometric arrangement of the wing is comprised of these. The layout has a significant impact on the whole design process, as well as a slew of other aspects of the project. These include, among other things, aerodynamics, performance, stability and control, as well as structural and system layout. The AR, TR, and LE sweeps allow the designer the most control over the wing's aerodynamic properties. This isn't to imply the others aren't significant; they may be thought of as dials for "fine-tuning" the wing design. The AR, TR, and sweep may be determined as a result of a sophisticated optimization; however, this is not always the case. The combined effect of AR and leading edge sweep in Fig. 3 [1].

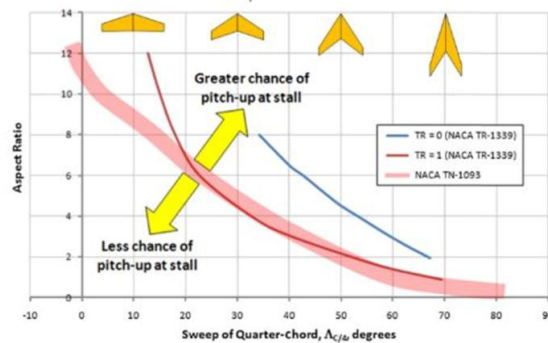


Fig. 3. Empirical pitch-up boundary for a swept-back wing [1]

3. Aerodynamics forces. 3.1. Introduction . For a very long time, aerodynamicists have employed force and moment coefficients to explain the aerodynamics of aircraft. Coefficients are non-dimensional quantities that reflect forces and moments without taking into account the effects of density, velocity, and size. When non-dimensionalizing forces and moments, not all flow properties may be considered. Because of this, even when considering some flight parameters in coefficient form, such as drag, Reynolds number and Mach number remain functions [8]. Thrust, lift, drag, and weight are the main factors that affect an airborne vehicle. The vehicle rotates around the pitch, roll, and yaw axes due to angular moments about those axes. Dynamic pressure, wing area, and dimensionless coefficients are used to calculate lift, drag, and rotational moments. The basic aerodynamic equations that control an air vehicle's performance are the expressions for these quantities [13].

In the context of an aircraft, lift is the amount of force that is directed upward and perpendicular to the direction of flight, or, in the case of an unbroken stream. The phrase "upward" refers to the pilot's head being above the ground. The effect of various atti-

tudes toward flying is depicted in Fig. 4. The vector V depicts the direction of flight, the vector L the lift acting upward, and the vector W the weight of the airplane and the downward vertical.

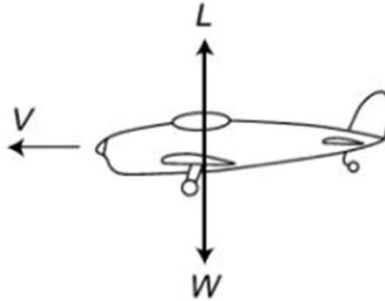


Fig. 4. Direction of the lift force in level flight [14]

Drag is the amount of force operating perpendicular to the path of flight or parallel to the direction of an unbroken stream. It is the force that opposes the aircraft's motion. Regarding its meaning or aim, there is no room for doubt. Therefore, the drag force is constantly in opposition to the lift force. When an airplane is flying horizontally, the moment known as pitching occurs in the plane containing the lift and the drag, or in the vertical plane. When it tends to elevate the aircraft's nose or increase the angle of attack, it is classified as positive [14].

3.2. Aerodynamic Coefficients. These non-dimensional pressure, force, and moment variables have an impact on the flying item. The free stream density ρ and velocity V are employed as characteristic values in non-dimensionalization. The pressure coefficient C_p is calculated using half of the dynamic pressure $\frac{1}{2}\rho V^2$. The wing surface area is taken into account as the typical length, half of the chord length, and as the characteristic area. The sectional lift coefficient C_L , drag coefficient C_D , and moment coefficient C_M , are calculated using the product of dynamic pressure and the half chord, where the square of the half chord is employed. However, the moment coefficient, the drag coefficient, and the coefficient of lift for the finite wing [15].

Lift coefficient

$$C_L = \frac{2L}{\rho S V^2} = \frac{L}{qS}$$

Drag coefficient

$$C_D = \frac{2D}{\rho S V^2} = \frac{D}{qS}$$

Moment coefficient

$$C_M = \frac{M}{qSl}$$

The reference area S and reference length l in the previous coefficients are selected to correspond to the specified geometric body form; for other shapes, S and l may be different things [12, 16–19].

3.3. Angles of attack. The geometric angle of attack is the angle between the relative wind direction and the mean chord of the wing, which is a line drawn between the leading edge and trailing edge of the wing in aeronautics. The orientation in which the wing has no lift is used to calculate the effective angle of attack. To avoid reader confusion, it is important to underline the distinction between the effective angle of attack employed here and the geometric angle of attack used in aeronautics. In Fig. 5, the orientation of a cambered

wing with no geometric angles of attack and the same wing with no effective angles of attack are shown. Since the air is being net-diverted downward, a cambered wing with zero geometric angles of attack has lifted. The same wing has no lift and no net air diversion when the effective angle of attack is zero, according to a definition. The geometric and actual angles of attack are the same in the case of a symmetric wing [20].

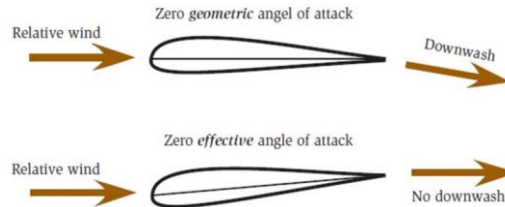


Fig. 5. Definition of geometric and effective angles of attack [20]

4. Model building and analyzing. SOLIDWORKS program was utilize to build four different models which are different in sweep wing angle. Fig. 6 shows the shapes of wings used in this paper with different sweep angle (15o, 20o, 25o, 30o, and 35o). Wing dimensions were used to build these models in 3 dimensions with root chord 1000 mm and tip chord 200 mm, taper ratio constant = 0.2; all models consist of one airfoil (SD8020). Computational Fluid Dynamics (CFD) software/ANSYS (Fluent) was used to analyse the models with assuming that: - enclosure uniform 1 m, mesh - relevance centre – fine, velocity magnitude (m/s) 20, and space three-dimensional time steady viscous SST k-omega. The unmanned aerial vehicles at altitude =3000m, air pressure (68189.15 Pa), (1.31 kg/m3) density, (1.7E-5 kg.m-1. s-1) dynamic viscosity, and (- 4.5 C°) temperature.

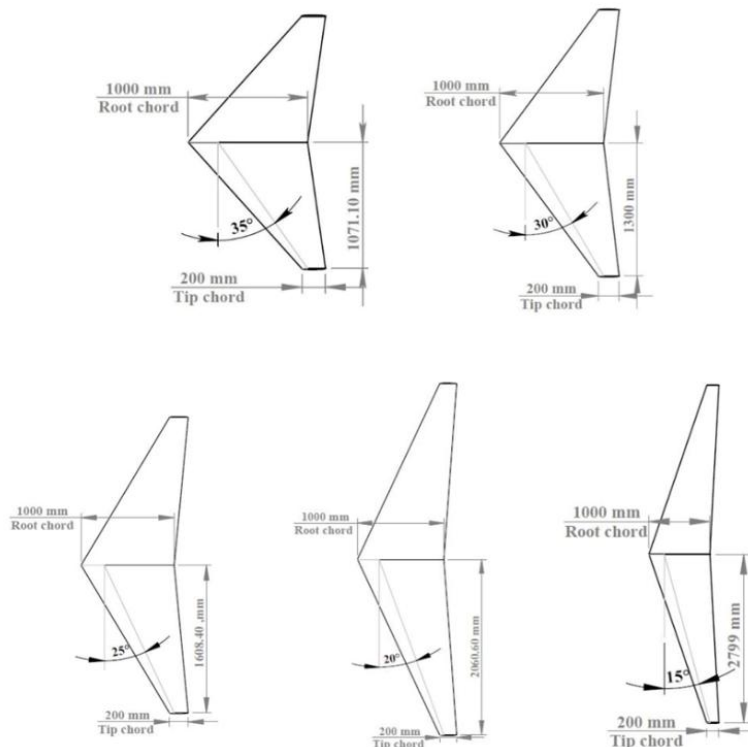


Fig. 6. Shapes and dimension of the five UAV used

5. Mesh Information's. Different angle combinations based on the angle of attack (0° , 2° , and 4°) were used to explore the variations in performance of different sweepback wing angles. The wing model is meshed using the tetrahedron meshing method in all of the simulations presented here. This method was chosen because it was able to capture near-wing complexity while also generating a very fine grid at the boundary layer. In most circumstances, the mesh resolution has a considerable influence on the quality of CFD simulations. The mesh resolution is determined by the number of cells in the computational domain. Increasing the mesh density has minimal influence on the output after a certain point. Mesh reports vary depending on the wing model; Table 1 illustrates a mesh report for a variety of models. Fig. 7 shows a wing mesh with various perspectives. The velocity inlet boundary condition is the intake boundary condition, whereas the pressure outlet boundary condition is the exit boundary condition.

Table 1

Mesh report for a variety of models

Domain / Box	Nodes	Elements
sweepback wing angle 15° , Angle of attack 2°	232371	1311394
sweepback wing angle 20° , Angle of attack 0°	214475	1209814
sweepback wing angle 25° , Angle of attack 4°	201947	1138868
sweepback wing angle 30° , Angle of attack -2°	189816	1069668
sweepback wing angle 35° , Angle of attack 0°	175559	987972

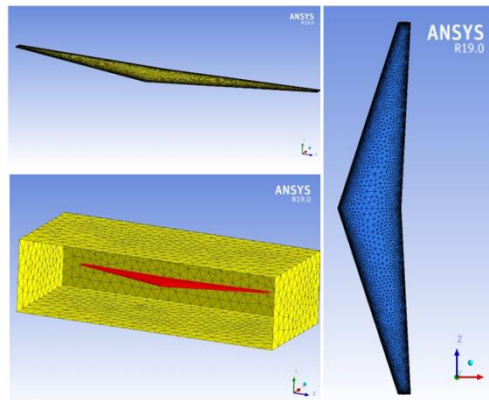


Fig. 7. Wing mesh with various viewpoints

6. Calculation and Results. 6.1. Calculated the aspect ratio. To calculate the AR, first wing area must be calculated, Wing area,

$$A = 0.5 * (C_r + C_t) * s.$$

Knowing $C_r = 1000 \text{ mm}$, $C_t = 200 \text{ mm}$

s : semi-span, $s = \frac{b}{2}$, is changing to each UAV model, b = Wing span.

For UAV with sweep angle = 35°, $s = 1071.1$ mm,
 sweep angle = 30°, $s = 1300$ mm,
 sweep angle = 25°, $s = 1608.4$ mm,
 sweep angle = 20°, $s = 2060.6$ mm,
 sweep angle = 15°, $s = 2799$ mm,

$A_{35} = 642660 \text{ mm}^2$
 $A_{30} = 780000 \text{ mm}^2$
 $A_{25} = 965040 \text{ mm}^2$
 $A_{20} = 1236360 \text{ mm}^2$
 $A_{15} = 1679400 \text{ mm}^2$

Aspect ratio, $AR = \frac{b^2}{A}$ or $\frac{b}{c}$

A = Wing area, c = chord, b = Wing span

$AR_{35} = 7.14$.

$AR_{30} = 8.66$.

$AR_{25} = 10.72$.

$AR_{20} = 13.74$.

$AR_{15} = 18.66$.

The results can see it in Fig. 8.

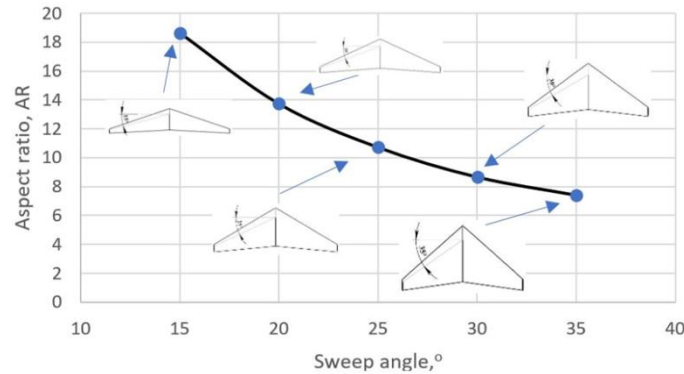


Fig. 8. Aspect ratio versus swept-back wing

6.2. Lift, drag, and Lift to drag ratio Calculations. A CFD Fluent (ANSYS) software simulation to five UAV models have been done, each model tested with three angles of attack (0° , 2° , and 4°). firstly, force of lift value calculated. The results in Fig. 9 show all models are close to each other at angle of attack 0° then the models start to differ in values gradually through angle of attach 2° until to reach maximum difference at angle of attack 4° . The most important thing to notice that the best results of lift force have lower sweepback angle as fallow (S refer to sweep-back angle), $S_{15} = 312$, $S_{20} = 210$, $S_{25} = 150$, $S_{30} = 109$, and $S_{35} = 81$ and all values at angle of attack equal to $AOA = 4^\circ$.

Secondly, the results of drag force shown in Fig. 10, the differ between the of value of drag force of models can be seen from angle of attack 0° and gradually increase with the increasing of angle of attack and also the best results of lift force have lower sweep-back angle as fallow $S_{15} = 7.5$, $S_{20} = 5.4$, $S_{25} = 4.1$, $S_{30} = 3.3$, and $S_{35} = 2.6$ and all values at angle of attack equal to $AOA = 4^\circ$.

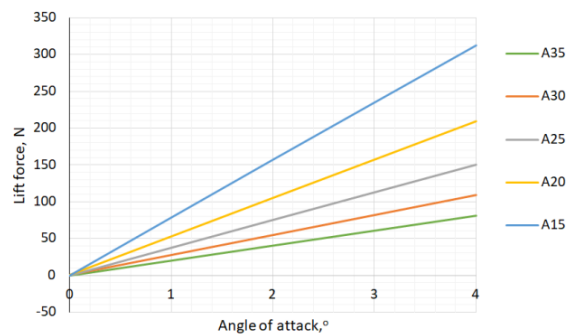


Fig. 9. The lift force versus the angle of attack

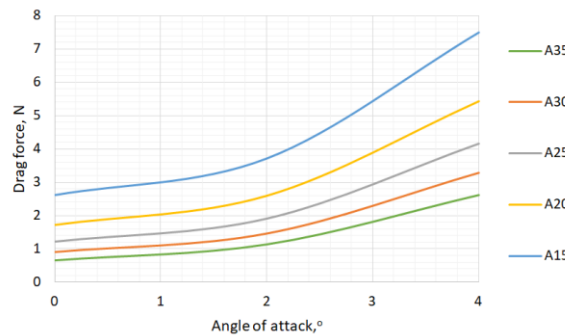


Fig. 10. The drag force versus the angle of attack

After calculation lift and drag force, the results are logical but it not gives us a good indication which model has better result because of the model not only must has high lift force but also lower drag force and lift to drag ratio gives us such indication. In Fig. 11, the results show that the values have almost same results at angle of attack equal to 0° and start to rises until it reaches angle of attack equal to 2° which is the best results, then the values of lift to drag minimize. Best results occur at low sweepback angle as fallow $S_{15} = 42$, $S_{20} = 40.5$, $S_{25} = 39.6$, $S_{30} = 37$, and $S_{35} = 35.5$ and all values at angle of attack equal to $AOA = 2^\circ$.

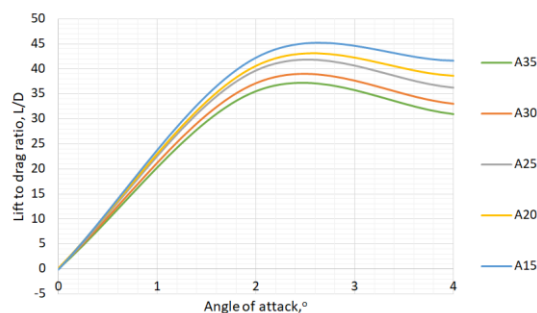


Fig. 11. Lift to drag ratio versus the angle of attack

6.3. CFD simulation analysis. In Fig. 12, the CFD simulation analysis for the UAV by the FLUENT ANSYS software for the two models (maximum value lift to drag ratio model UAV with $S_{15} A_2$ and minimum value lift to drag ratio model UAV with $S_{35} A_0$) for pressure counter, A & B for root chord, C for tip chord and the different of pressure distribution can be noticed for two models. In Fig. 9, case of maximum value of lift to drag ratio, the CFD photo show the pressure on the top of the wing is less than the pressure on the bottom of the wing. The difference in pressure creates a force on the wing that lifts the wing up into the air. And on the contrary, case of minimum value of the lift to drag ratio the pressure distribution over the wing is almost identical which cause minimum lift force.

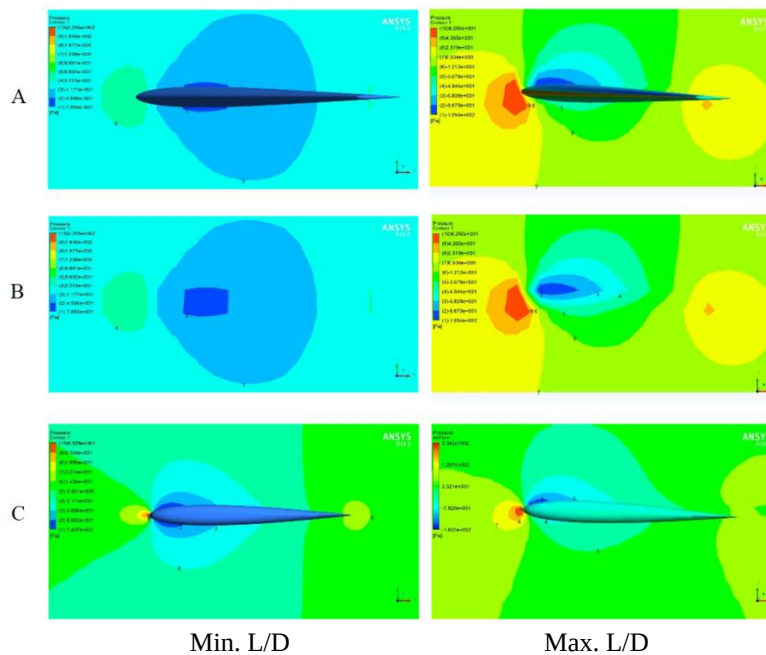


Fig. 12. Pressure contours for two UAV one with maximum lift to drag ratio and another with minimum lift to drag ratio

Conclusions. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are now widely employed in practically every industry, ranging from military to commercial. The creation of an unmanned aerial vehicle is in great demand. Because it's difficult to interpret UAV's conceptual design data due to a lack of data sheets, CFD is utilized instead. Due to considerable improvements in computers, Computational Fluid Dynamics (CFD) has become the most preferred approach for designers to obtain the component of the aircraft by completing the required aerodynamic form using fluid dynamics and pressure distribution. CFD gives precise predictions of the wing's aerodynamic properties, allowing them to be modified and optimized for the best outcomes. When viewed from above, the form of a wing is known as the shape of the wing. The induced drag coefficient and stalling characteristics are the key aerodynamic parameters impacted by shape, which are directly connected to the aspect ratio and taper. The wing's size and form, the angle at which it meets approaching air, the speed at which it passes through the air, and even the density of the air all have an impact on lift. In this paper, UAV designed with different sweep-back angle (15° , 20° , 25° , 30° , and 35°), SD8020 airfoil used for root chord = 1000 mm,

and tip chord = 200 mm, and different aspect ratio with constant taper ratio = 0.2, all models examine versus the attack angle (0° , 2° , and 4°), the results show that the lift to drag ratio (aerodynamics efficiency) increase by increasing the aspect ratio and increasing the sweepback angle. best results with maximum lift to drag ratio in UAV model with sweepback angle 15° at angle of attack = 2° with aspect ratio 18.66, lower lift to drag ratio occur in UAV model with sweepback angle 35° at angle of attack = 0° with aspect ratio 7.14.

REFERENCES

1. Gudmundsson S. General aviation aircraft design: Applied Methods and Procedures. Butterworth-Heinemann, 2013.
2. Bakar A., Ke L., Liu H., Xu Z., and Wen D. Design of low altitude long endurance solar-powered UAV using genetic algorithm, *Aerospace*, 2021, 8, (8), pp. 228.
3. Ruzgienė B., Aksamitauskas Č., Daugėla I., Prokopimas Š., Puodžiukas V., and Rekus D. UAV photogrammetry for road surface modelling, *Baltic journal of road and bridge engineering*, 2015, 10, (2), pp. 151-158.
4. Marqués P. Advanced UAV aerodynamics, flight stability and control: an Introduction, *Advanced UAV aerodynamics, flight stability and control: novel concepts, theory and applications*, 2017, pp. 1.
5. Chung P.-H., Ma D.-M., and Shiao J.-K. Design, manufacturing, and flight testing of an experimental flying wing UAV, *Applied Sciences*, 2019, 9, (15), pp. 3043.
6. Himer S.E., Ouaisa M., Ouaisa M., and Boulouard Z. General Parametric of Two Micro-Concentrator Photovoltaic Systems for Drone Application, *Computational Intelligence for Unmanned Aerial Vehicles Communication Networks*. Springer, 2022, pp. 275-289.
7. Al-Turjman F. Unmanned Aerial Vehicles in Smart Cities. Springer, 2020.
8. Bertin J.J., and Cummings R.M. Aerodynamics for engineers. Cambridge University Press, 2021.
9. Houghton E.L., and Carpenter P.W. Aerodynamics for engineering students. Elsevier, 2003.
10. Hitchens F. The encyclopedia of aerodynamics. Andrews UK Limited, 2015.
11. Söbester A., and Forrester A.I. Aircraft aerodynamic design: geometry and optimization. John Wiley & Sons, 2014.
12. Anderson J. EBOOK: Fundamentals of Aerodynamics (SI units). McGraw hill, 2011.
13. Fahlstrom P.G., Gleason T.J., and Sadraey M.H. Introduction to UAV systems. John Wiley & Sons, 2022.
14. Collicott S.H., Valentine D.T., Houghton E., and Carpenter P. Aerodynamics for Engineering Students. Butterworth-Heinemann, 2016.
15. Gülçat Ü. Fundamentals of modern unsteady aerodynamics. Springer, 2010.
16. Dragos L. Mathematical methods in aerodynamics. Springer Science & Business Media, 2003.
17. Nguyen M.T., Nguyen N.V., and Pham M.T. Aerodynamic analysis of aircraft wing, *VNU Journal of Science: Mathematics-Physics*, 2015, 31, (2).
18. Küchemann D. 'he aerodynamic design of aircraft' (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012.
19. Moran J. An introduction to theoretical and computational aerodynamics. Courier Corporation, 2003.
20. Anderson D.F., and Eberhardt S. Understanding flight. McGraw-Hill Education, 2010.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Аль-Хафаджи Али Дж. Давуд – Технологический университет; e-mail: alhafadzhi@sfedu.ru, ali.j.dawood@uotechnology.edu.iq; г. Багдад, Ирак; тел.: +79851677562, +9647724255278; преподаватель; канд. наук; аспирант ЮФУ.

Панатов Геннадий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: gspanatov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра летательных аппаратов; д.т.н.; профессор.

Болдырев Антон Сергеевич – e-mail: boldyrev@sfedu.ru; тел.: 89888987877; директор Института радиотехнических систем и управления ЮФУ; к.ф.-м.н.; доцент.

Al-Khafaji Ali J. Dawood – University of Technology; e-mail: alhafadzhi@sfedu.ru, ali.j.dawood@uotechnology.edu.iq; Baghdad, Iraq; phones: +79851677562, +9647724255278; lecturer; graduate student at Southern Federal University.

Panatov Gennadiy Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: gspanatov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; aircraft department; dr. of. eng. sc.; professor.

Boldyrev Anton Sergeevich – e-mail: boldyrev@sfedu.ru; phone: +79888987877; director of the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Раздел IV. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.373

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-224-232

Д.В. Беляев, А.Н. Зикий, А.С. Кочубей, А.Б. Ремпе

ГЕНЕРАТОР КОНТРОЛЬНЫХ СИГНАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Генераторы контрольных сигналов (ГКС) позволяют оперативно проводить оценку состояния радиоприёмной аппаратуры в период её эксплуатации, поэтому их исследованию и разработке уделяется большое внимание. Очень часто в качестве генераторов контрольных сигналов используют генераторы шума или генераторы на диодах Ганна с низкой стабильностью частоты. В связи с появлением доступных микросхем синтезаторов частоты со встроенным генератором управляемым напряжением предпринята попытка использовать синтезатор частоты в качестве задающего генератора в генераторе контрольных сигналов. Применение микросхемы синтезатора частоты с последовательной загрузкой кодов управления привело к необходимости использовать микроконтроллер. Проведено экспериментальное исследование двухчастотного генератора контрольных сигналов. Представлена функциональная схема ГКС. Дано краткое описание элементной базы. В качестве задающего генератора использован синтезатор двух частот Si4133GT. В качестве результатов исследования представлены: – спектр выходного сигнала; – осциллограммы выходного сигнала; – зависимость выходной мощности от частоты для трёх экземпляров ячейки; – зависимость выходной мощности от кода управления аттенюатором. Достигнуты следующие результаты: – рабочие частоты 450 и 1200 МГц; – выходная мощность каждого канала не менее 100 мкВт; – относительная нестабильность несущей частоты 10^{-5} ; – диапазон изменения затухания ступенчатого аттенюатора не менее 20 дБ; – глубина импульсной модуляции не менее 30 дБ; – диапазон длительностей модулирующих импульсов от 10 до 100 мкс; – диапазон изменения периода повторения от 300 до 1000 мкс; – имеется возможность ввода внешнего контрольного сигнала. По большинству параметров разработанный ГКС превосходит параметры ГКС, ранее разработанных на предприятии. ГКС предполагается использовать в составе многоканального приемника.

Генератор контрольных сигналов; синтезатор частот; импульсная модуляция; эксперимент; спектр выходного сигнала; осциллограммы.

D.V. Belyaev, A.N. Zikiy, A.S. Kochubey, A.B. Remppe

CONTROL SIGNAL GENERATOR OF A NEW GENERATION

Control signal generators (SCS) allow for the rapid assessment of the condition of radio receiving equipment during its operation, therefore, much attention is paid to their research and development. Very often, noise generators or generators on Gann diodes with low frequency stability are used as control signal generators. Due to the appearance of available frequency synthesizer chips with a built-in voltage-controlled generator, an attempt has been made to use a frequency synthesizer as a master generator in a control signal generator. The use of a frequency synthesizer chip with sequential loading of control codes led to the need to use a microcontroller. An experimental study of a two-frequency control signal generator has been carried out. The functional scheme of the GCS is presented. A brief description of the element base is given. A two-frequency synthesizer Si4133GT was used as a master generator. As the results of the study are presented: – output signal spectrum; – waveforms of the output signal; – dependence of the output

power on the frequency for three instances of the cell; – dependence of the output power on the attenuator control code. The following results have been achieved: – operating frequencies 450 and 1200 MHz; – the output power of each channel is at least 100 mW; – relative instability of the carrier frequency 10^{-5} ; – the attenuation range of the step attenuator is not less than 20 dB; – pulse modulation depth of at least 30 dB; – duration range of modulating pulses from 10 to 100 microseconds; – the range of variation of the repetition period from 300 to 1000 microseconds; – it is possible to enter an external control signal. By most parameters, the developed GCS exceeds the parameters of the GCS previously developed at the enterprise. GCS is supposed to be used as part of a multi-channel receiver.

Control signal generator; frequency synthesizer; pulse modulation; experiment; output signal spectrum; waveforms.

Введение. При проектировании многоканального приемника потребовался генератор контрольных сигналов (ГКС). По устройствам генерирования и формирования радиосигналов имеется обширная литература, в том числе монографии [1, 2], учебные пособия [3–7], статьи [8–11] и патенты [12, 13].

Традиционно в ГКС в качестве задающего генератора используется генераторы на поверхностных акустических волнах [7], транзисторные генераторы, стабилизированные диэлектрическими резонаторами [7], генераторы на диодах Ганна [8, 9, 11], генераторы, управляемые напряжением, на микросхеме [10]. В данной работе предпринята попытка использовать синтезатор частот [2, 6].

К генератору контрольных сигналов предъявляются следующие требования:

- ◆ Рабочие частоты 450 и 1200 МГц;
- ◆ Выходная мощность не менее 100 мВт;
- ◆ Импульсная модуляция выходных сигналов с параметрами;
- ◆ $\tau_d = 10\text{--}100$ мкс; Т повт. = 300–1000 мкс.;
- ◆ Относительная нестабильность выходных частот не хуже 10^{-5} ;
- ◆ Управление выходной мощностью в пределах 20–30 дБ;
- ◆ Глубина импульсной модуляции в пределах 30–40 дБ;
- ◆ Возможность ввода внешнего контрольного сигнала.

В соответствии с этими требованиями была разработана функциональная схема генератора контрольных сигналов, которая приведена на рис. 1.

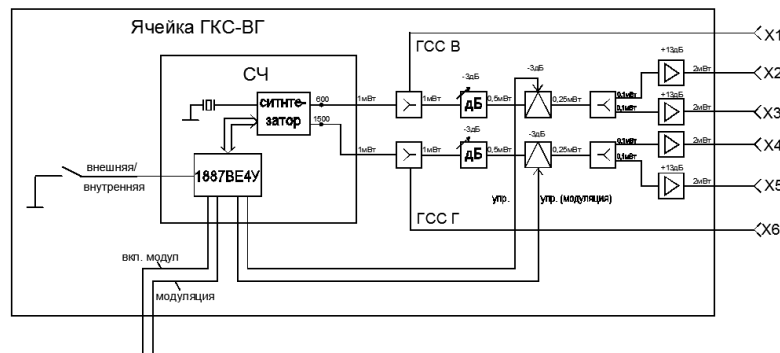


Рис. 1. Функциональная схема ячейки ГКС

Из этого рисунка видно, что задающим генератором является синтезатор двух частот типа Si4133 GT [14]. Выходные сигналы синтезатора объединяются вместе с внешними сигналами в сумматорах типа TCP-2-25, управляются по мощности в ступенчатых аттенюаторах типа МААТСС007 и поступают на импульсные модуляторы, которые построены на базе двухканальных переключателей типа НМС284MS [15]. После модуляторов сигналы делятся на две равные части по

мощности и усиливаются в маломощных усилителях типа ERA-3SM. Выходные сигналы с четырех усилителей ERA-3SM поступают на выходные соединители типа СК-9 [17].

Управление синтезатором частоты и модуляторами осуществляется с помощью микроконтроллера типа 1887BE4Y [19, 20].

Конструкция. Ячейка размещена на печатной плате размером 170 на 200 мм. С одной стороны печатной платы размещен низкочастотный разъем СМП 260 на 90 контактов. С другой стороны печатной платы установлены 6 соединителей типа СК9-РПМУ-Х-076.1.М (Тип IX по ГОСТ13317-89). Из них 2 входа и 4 выхода. Печатная плата имеет 4 металлических слоя и 3 диэлектрических. Внешние слои меди имеют толщину 18 мкм, внутренние слои (GND и питания) по 35 мкм. В качестве диэлектрика используют материал FR-4 [16].

Между высокочастотными проводниками и GND находится диэлектрик толщиной 0,3 мм и $\epsilon=4\ldots 6$.

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 2.

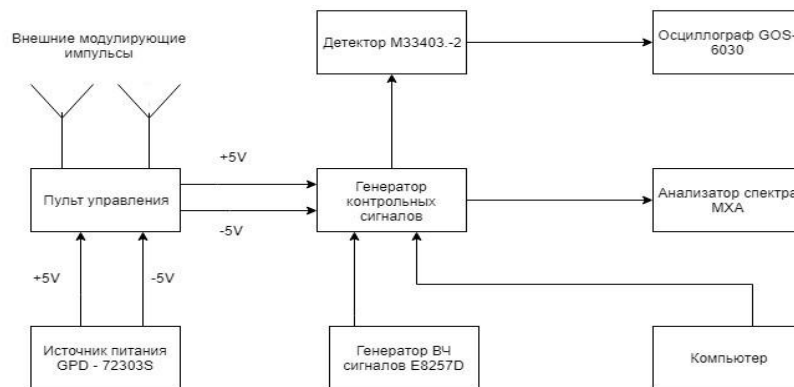


Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

Перед проведением измерений в микроконтроллер из компьютера загружалась программа его работы. После этого компьютер отключался. В режиме амплитудной модуляции выходной сигнал ГКС наблюдался на экране анализатора спектра (рис. 3).

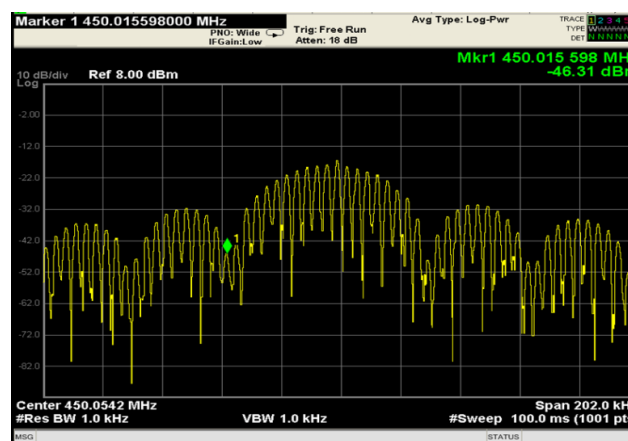


Рис. 3. Спектр радиопульсов с низшей частотой 450 МГц, длительностью 30 мкс и периодом 300 мкс

В режиме импульсной модуляции сигнал наблюдался на осциллографе как на радиочастоте (рис. 4 – верхний луч), так и после детектирования (рис. 4 – нижний луч).

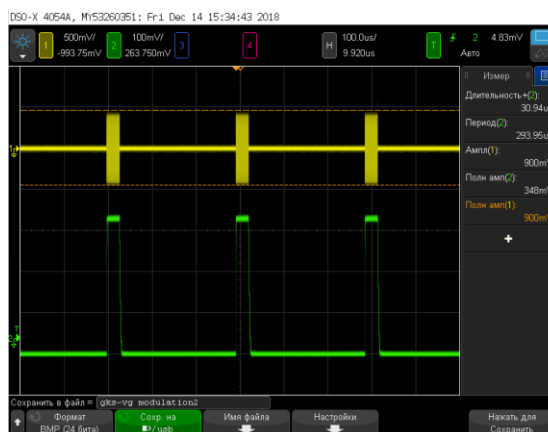


Рис. 4. Осциллограмма модулированного радиосигнала и его огибающей с выхода детектора

Результаты измерения выходной мощности ГКС в режиме непрерывной генерации заносились в табл. 1. По данным табл. 1 построены 4 графика на рис. 5. Измерения проводились только для верхнего диапазона частот, где наблюдался дефицит мощности. Измерения проводились в полосе рабочих частот синтезатора от 1100 МГц до 1430 МГц с шагом 10 МГц.

Таблица 1

Результаты испытаний ГКС в диапазоне частот

Частоты, МГц	Выходная мощность ГКС, мкВт			Частоты, МГц	Выходная мощность ГКС, мкВт		
	Экз.2	Экз.3	Экз.4		Экз.2	Экз.3	Экз.4
1100	-	271	58	1280	77	-	84
1110	-	293	58	1290	-	87	71
1120	-	-	63	1300	67	-	60
1130	-	-	69	1310	-	72	50
1140	-	-	75	1320	59	-	42
1150	195	206	81	1330	-	-	36
1160	-	-	86	1340	57	-	32
1170	156	-	95	1350	-	-	28
1180	-	-	103	1360	53	-	24
1190	-	-	114	1370	-	52	20
1200	125	-	125	1380	45	-	17
1210	-	-	134	1390	-	-	14
1220	110	-	138	1400	40	-	12
1230	-	-	136	1410	-	-	11
1240	95	-	128	1420	36	-	9
1250	-	91	118				
1260	82	-	107				
1270	-	86	96				
				1430	-	30	8

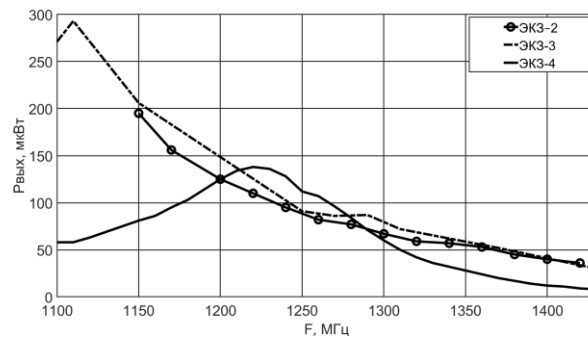


Рис. 5. Зависимость выходной мощности от рабочей частоты для нескольких экземпляров ГКС

В следующем эксперименте была снята зависимость выходной мощности ГКС от кода управления аттенуатором от пульта управления. Результаты измерений заносились в табл. 2. По данным табл. 2 построены графики на рис. 6. В этом эксперименте были задействованы 4 старших разряда аттенуаторов из 5, поэтому шаг изменения затухания находится около 2 дБ. При этом на частоте 320 МГц шаг изменения затухания несколько меньше 2 дБ, а на частоте 1330 МГц шаг изменения затухания несколько больше 2 дБ. Отклонения экспериментальных кривых от идеальных можно объяснить паразитными связями между проводниками.

Таблица 2

Зависимость выходной мощности ГКС от кода управления

Двоичный код управления Млд. р. ст.р.	Десятичный эквивалент кода	Мощность в нижнем канале (f=320МГц), дБм	Мощность в верхнем канале (f= 1330МГц), дБм
0000	0	-0,74	-15,31
1000	2	-2,77	-18,58
0100	4	-4,93	-21,15
1100	6	-6,83	-23,76
0010	8	-8,83	-25,87
1010	10	-10,60	-28,29
0110	12	-12,53	-30,29
1110	14	-14,24	-32,56
0001	16	-15,40	-35,07
1001	18	-17,01	-37,36
0101	20	-18,72	-39,26
1101	22	-20,19	-41,53
0011	24	-21,75	-43,28
1011	26	-23,01	-45,59
0111	28	-24,30	-47,20
1111	30	-25,36	-49,60

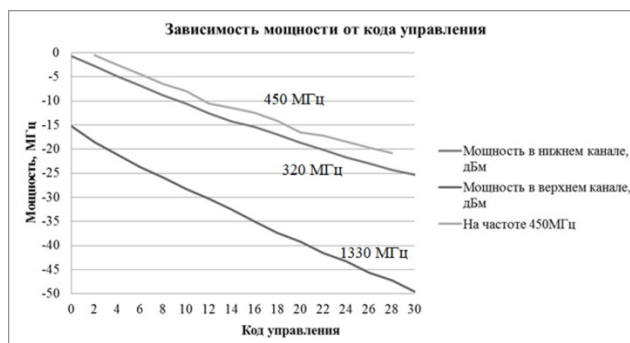


Рис. 6. Зависимость выходной мощности от кода управления

Ниже в табл. 3 приведено сравнение заданных и достигнутых параметров генератора контрольных сигналов.

Таблица 3

Основные параметры ГКС

Наименование параметра, размерность	Задано	Достигнуты	Аналог
Рабочие частоты, МГц	450 1200	450 1200	ДМВ ДМВ
Выходная мощность, мкВт	100-1000	125	100
Относительная нестабильность частоты	$\pm 10^{-5}$	$\pm 10^{-5}$	10^{-4}
Диапазон изменения затухания ступенчатого аттенюатора, дБ	20	>24 дБ в нижнем канале >34 дБ в верхнем канале	Нет функции
Глубина импульсной модуляции, дБ (подавление сигнала в паузе)	30-40	33	>30
Диапазон длительностей модулирующих импульсов, мкс	10-100	10-100	10-100
Диапазон изменения периода повторения, мкс	300-1000	300-1000	300-1000
Возможность ввода внешнего контрольного сигнала	Есть	есть	нет
Возможность перепрограммирования рабочих частот	Есть	есть	нет
Масса, кг	-	0,2	-
Габариты, мм	-	178x226x25,5	180x230

Выводы. Разработан комплект конструкторской документации на генератор контрольных сигналов. Изготовлен образец и проведены его испытания. Получены спектр и осциллограммы выходного сигнала, зависимость выходной мощности от частоты для трёх экземпляров генератора, зависимость выходной мощности от кода управления аттенюатором. Достигнуты следующие результаты:

- ◆ Рабочие частоты 450 и 1200 МГц;
- ◆ Выходная мощность каждого канала не менее 100 мкВт;

- ◆ Относительная нестабильность несущей частоты 10^{-5} ;
- ◆ Диапазон изменения затухания ступенчатого аттенюатора не менее 20 дБ;
- ◆ Глубина импульсной модуляции не менее 30 дБ;
- ◆ Диапазон длительностей модулирующих импульсов от 10 до 100 мкс;
- ◆ Диапазон изменения периода повторения от 300 до 1000 мкс;
- ◆ Имеется возможность ввода внешнего контрольного сигнала.

По большинству параметров разработанный ГКС превосходит параметры ГКС, ранее разработанных на предприятии. ГКС предполагается использовать в составе многоканального приёмника.

Таким образом, разработанный генератор контрольных сигналов по сравнению с аналогом имеет меньшую массу, габариты, стоимость, выше стабильность частоты и шире функциональные возможности по управлению частотой и мощностью.

Полученные результаты дают основания предположить, что в ближайшие годы генераторы контрольных сигналов на базе синтезаторов частоты будут созданы на нашем предприятии и в сантиметровом диапазоне волн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиопередающие устройства / под ред. О.А. Челнокова. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
2. Ченакин А.В., Горевой А.В. Практическое построение синтезаторов частот СВЧ диапазона. – М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 280 с.
3. Романюк В.А. Аналоговые устройства приёмопередатчиков: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2018. – 144 с.
4. Шахильдян В.В., Карякин В.Л. Проектирование устройств генерирования и формирования сигналов в системах подвижной радиосвязи: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2011. – 400 с.
5. Першин В.Т. Формирование и генерирование сигналов в цифровой радиосвязи: учеб. пособие. – М.: Инфра-М, 2013. – 614 с.
6. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты. – М.: Издательский дом МЭИ, 210. – 320 с.
7. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Стабильность частоты генераторов СВЧ: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 138 с.
8. Беляев Д.В., Зикий А.Н., Пономаренко А.А., Чернышова О.А. Экспериментальное исследование генератора контрольных сигналов миллиметрового диапазона // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия «Общие вопросы радиоэлектроники». – 2007. – № 1. – С. 178-181.
9. Зикий А.Н., Беляев Д.В., Додаев С.Э. Экспериментальное исследование генератора контрольных сигналов с магнитной перестройкой // Известия ТРТУ. – 2005. – № 9. – С. 141.
10. Зикий А.Н., Кучугура А.В., Сивокос Е.В., Шакунов С.А. Микрополосковый генератор контрольных сигналов миллиметрового диапазона // Международная научно-практическая конференция «Актуальные научные исследования в современном мире». – 2015. – № 1. – Ч. 2. – С. 47-50.
11. Зикий А.Н., Беляев Д.В., Додаев С.Э. Генератор контрольных сигналов с магнитной перестройкой // Вопросы специальной радиоэлектроники, серия Общие вопросы радиоэлектроники. – 2005. – № 1. – С. 72-76.
12. Романкевич А.М. и др. Генератор испытательных кодов. А.С. СССР №1.405.058. Опубл. 18.11.1986, м. кл. G06F 11/26.
13. Кочемасов В.Н. и др. Формирователь сигналов с заданным законом изменения фазы. А.С. СССР №1.385.239. Опубл. 20.11.1986., м. кл. H03C 3/00.
14. Dual-band RF Synthesizer WITH Integrated VCOS FOR Wireless Communication Si4133. Silicon Laboratories, Rev.1.13/01. – 34 p.
15. SPDT Non-reflective Switch HMC284MS86/HMC284MS86 Hittite Microwave Corporation. – P. 166-171.
16. Мылов Г.В. Печатные платы. Выбор базовых материалов. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2015. – 176 с.

17. Соединительные радиочастотные коаксиальные СК-9. ТУ6313-006-38970729-11. Технические условия. – 40 с.
18. Зикий А.Н., Зламан П.Н., Горбатенко О.А. Экспериментальное исследование ступенчатого аттенуатора // Матер. I Всероссийской научно-практической конференции «Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояния, проблемы и пути решения». Курск, 24-26 апреля 2014.
19. Микросхемы 1887BE / 1887BE4Y/ Технические условия АЕЯР.431280.537ТУ.
20. Микросхема 1887BE4Y. Техническое описание КФДЛ.431295.039ТС.

REFERENCES

1. Radioperedayushchie ustroystva [Radio transmitting devices], ed. by O.A. Chelnokova. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 256 p.
2. Chenakin A.V., Gorevoy A.V. Prakticheskoe postroenie sintezatorov chastot SVCh diapazona [Practical construction of microwave frequency synthesizers]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2021, 280 p.
3. Romanyuk V.A. Analogovye ustroystva priemopredatchikov: ucheb. posobie [Analog devices transceivers: a tutorial]. Moscow: Solon-Press, 2018, 144 p.
4. Shakhgil'dyan V.V., Karyakin V.L. Proektirovanie ustroystv generirovaniya i formirovaniya signalov v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi: ucheb. posobie [Designing devices for generating and forming signals in mobile radio systems: a tutorial]. Moscow: Solon-Press, 2011, 400 p.
5. Pershin V.T. Formirovanie i generirovanie signalov v tsifrovoy radiosvyazi: ucheb. posobie [Formation and generation of signals in digital radio communication: a tutorial]. Moscow: Infra-M, 2013, 614 p.
6. Belov L.A. Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty [Devices for the formation of microwave signals and their components]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 210, 320 p.
7. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Stabil'nost' chastoty generatorov SVCh: ucheb. posobie [Frequency stability of microwave generators: a tutorial]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 138 p.
8. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Ponomarenko A.A., Chernyshova O.A. Eksperimental'noe issledovanie generatora kontrol'nykh signalov millimetrovogo diapazona [Experimental study of the generator of control signals of the millimeter range], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya «Obshchie voprosy radioelektroniki»* [Issues of special radio electronics. Series "General questions of radio electronics"], 2007, No. 1, pp. 178-181.
9. Zikiy A.N., Belyaev D.V., Dodaev S.E. Eksperimental'noe issledovanie generatora kontrol'nykh signalov s magnitnoy perestroykoy [Experimental study of a control signal generator with magnetic tuning], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2005, No. 9, pp. 141.
10. Zikiy A.N., Kuchugura A.V., Sivokoz E.V., Shakunov S.A. Mikropoloskovyy generator kontrol'nykh signalov millimetrovogo diapazona [Microstrip generator of control signals in the millimeter range], *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire»* [International scientific-practical conference "Actual scientific research in the modern world"], 2015, No. 1, Part 2, pp. 47-50.
11. Zikiy A.N., Belyaev D.V., Dodaev S.E. Generator kontrol'nykh signalov s magnitnoy perestroykoy [Control signal generator with magnetic tuning], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki, seriya Obshchie voprosy radio-elektroniki* [Issues of special radio electronics, series General issues of radio electronics], 2005, No. 1, pp. 72-76.
12. Romankevich A.M. i dr. Generator ispytatel'nykh kodov. A.S. SSSR №1.405.058. Opubl. 18.11.1986, m. kl. G06F 11/26 [Test code generator. Author's certificate of the USSR No. 1.405.058. Published 11/18/1986, m. G06F 11/26].
13. Kochemasov V.N. i dr. Formirovatel' signalov s zadannym zakonom izmeneniya fazy. A.S. SSSR №1.385.239. Opubl. 20.11.1986., m. kl. H03S 3/00 [Signal shaper with a given law of phase change. Author's certificate of the USSR No. 1.385.239. Published 11/20/1986., M. class. H03C 3/00].
14. Dual-band RF Synthesizer WITH Integrated VCOS FOR Wireless Communication Si4133. Silicon Laboratories, Rev.1.13/01, 34 p.

15. SPDT Non-reflective Switch HMC284MS86/HMC284MS86 Hittite Microwave Corporation, pp. 166-171.
16. Mylov G.V. Pечатnye platy. Vybor bazovykh materialov [Printed circuit boards. Choice of base materials]. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2015, 176 p.
17. Soedinitel'nye radiochastotnye koaksial'nye SK-9. TU6313-006-38970729-11. Tekhnicheskie usloviya [Connecting radio-frequency coaxial SK-9. TU6313-006-38970729-11. Specifications], 40 p.
18. Zikiy A.N., Zlaman P.N., Gorbatenko O.A. Eksperimental'noe issledovanie stupenchatogo atenuatora [Experimental study of a step attenuator], *Mater. 1 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Infokommunikatsii i informatsionnaya bezopasnost': sostoyaniya, problemy i puti resheniya». Kursk, 24-26 aprelya 2014* [Proceedings of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference "Infocommunications and Information Security: States, Problems and Solutions". Kursk, April 24-26, 2014].
19. Mikroskhemy 1887BE / 1887BE4Y/ Tekhnicheskie usloviya AEYAR.431280.537TU [Micro-circuits 1887BE / 1887BE4Y / Specifications AEYAR.431280.537TU].
20. Mikroskhema 1887VE4U. Tekhnicheskoe opisanie KFDL.431295.039TS [Chip 1887BE4U. Technical description KFDL.431295.039TS].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Беляев Денис Владимирович – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: denisb2002@mail.ru; г. Таганрог, Россия; начальник НТИЦ.

Ремпе Антон Борисович – e-mail: antonrempe@yandex.ru; инженер.

Зикий Анатолий Николаевич – e-mail: zikiy50@mail.ru; к.т.н.; с.н.с.

Кочубей Алексей Сергеевич – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; тел.: 89896270939; магистр; инженер-конструктор 2 категории.

Belyaev Denis Vladimirovich – Taganrog Research Institute of Communications; e-mail: denisb2002@mail.ru; Taganrog, Russia; head of the STC.

Rempe Anton Borisovich – e-mail: antonrempe@yandex.ru; engineer.

Zikiy Anatoly Nikolaevich – e-mail: zikiy50@mail.ru; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Kochubey Alexey Sergeevich – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; phone: +79896270939; master; design engineer of the 2nd category.

УДК 528.811

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-232-240

Б.М. Азизов, А.Н. Бадалова, Х.Н. Мамедов

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрены основные рабочие параметры, характеризующие оптико-электронные приборы и исследованы особенности факторов, влияющих на них. Из рассматриваемых показателей были выделены функции чувствительности, разрешающей способности и передачи шумов. Проанализированы теоретические вопросы взаимосвязи между входящими параметрами. Исследования показали, что причиной возникновения ряда погрешностей является переход обрабатывающего оборудования из линейной области в нелинейный. Переход системы в нелинейный режим должен определяться в зависимости как от внутренних и внешних факторов, так и от интервала, в котором определяется функция. В процессе исследовательской работы было выявлено, что в качестве основного внутреннего фактора можно считать изменение температуры и связанных с ней другие параметры системы, а в качестве внешнего фактора – атмосферное влияние, обладающее большой ди-

наличием. В статье, с целью оценки формирования и количественного изменения чувствительности разрешающей способности и шумовых сигналов системы, анализированы некоторые вспомогательные функции, оказывающие воздействие на передаточную функцию и определены оптимизирующие значения для различных систем, работающих в разных режимах. В спутниковых системах дистанционного зондирования (ДЗ), из-за различия взаимодействия сигнала в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном областях оптического диапазона с атмосферой, передаточная функция приобретает сложный характер. В результате этого, соотношение сигнал/шум изменяется в широких пределах. Показано что, основным показателем, характеризующим систему в целом, является изменение выходного сигнала во времени. Поэтому, пространственно-временную функцию, характеризующую исследуемый объект в области наблюдения, целесообразно заменить функцией временного выходного сигнала. По результатам исследования, значение внутренних и внешних факторов, действующих на пространственно-временную функцию, позволяют оценить непосредственно временную функцию выходного сигнала.

Чувствительность; разрешающая способность; шум; передаточная функция; электрооптика; источники шума.

B.M. Azizov, A.N. Badalova, H.N. Mammadov

EVALUATION OF CHARACTERISTIC PARAMETERS OF OPTO-ELECTRONIC DEVICES USED IN REMOTE SENSING SYSTEMS

In the article under consideration, the main operating parameters characterizing optical-electronic devices and the features of the factors influencing them are investigated. From the indicators under consideration, the functions of sensitivity, resolution, and noise transmission were singled out, and theoretical issues of the relationship between the input parameters were analyzed. In the study, the transition to non-linearity intended for the development of equipment carried out according to a linear pattern causes many errors. The transition of the system to a nonlinear mode should be determined depending on both internal and external factors and on the function in which the system performs it. In the course of work, as the main internal factor, it is possible to show the change in temperature and other parameters of the system associated with it, and as an external factor, atmospheric change, which has great dynamism. To assess the formation and quantitative change in the sensitivity of the resolution and noise signals of the system, the article analyzes some auxiliary functions that affect the transfer function and determines the optimal values for different systems operating in different modes. In different satellite systems, due to the difference in the interaction of the signal with the atmosphere obtained in the optical range (ultraviolet, visible, and infrared), the transfer function becomes complex. As a result, the signal-to-noise ratio changes over a wide range. Based on the foregoing, it is shown that the main indicator characterizing the system as a whole is a change in the output signal over time. Therefore, it is expedient to replace the function of space and time, which characterizes the object under study in terms of the observation area, with the function of the temporal output signal. According to the results of the study, for one reason or another, the value of internal and external factors acting on the function in time and space allows us to directly evaluate the temporal function of the output signal.

Sensitivity; resolution; noise; transfer function; electro-optics; noise sources.

Введение. Оптико-электронные приборы в последние годы составляют основу многих сканеров, применяемых в дистанционном зондировании. В спутниковых системах ДЗ ведущих стран мира широко используются наиболее усовершенствованные мультиспектральные и гиперспектральные системы. В каждой последующей версии спутниковой системы наблюдается последовательное улучшение оптико-электронного обеспечения сканирующих систем, а также качественных показателей получаемой информации.

Следует отметить, что оптико-электронным устройствам, устанавливаемым в сканерах, присущ ряд проблем, для решения которых требуется особый подход. Примером тому является следующая особенность – несмотря на то, что характери-

стики оптико-электронных устройств современных сканирующих систем, устанавливаемых на спутниках, должны изменяться линейно, однако некоторые устройства этих систем работают в нелинейном режиме [1–3]. Так, в приемниках с ограниченным фоном его следует рассматривать как нелинейную систему, так как низкое значение уровня фона зависит от уровня прямого излучения.

Цель статьи – оценка характеристических параметров оптико-электронных устройств, используемых в системах дистанционного зондирования.

В статье рассмотрены вопросы оценки основных характеристических параметров, в том числе чувствительности, разрешающей способности и шумовых параметров сигналов оптико-электронных устройств, используемых в спутниках дистанционного зондирования Земли. Исследованы пути решения теоретических и практических задач влияния нестационарных показателей на значения указанных параметров.

Задачи исследования. Ввиду разнообразия источников помех в оптико-электронных системах определённую трудность представляет обоснование необходимости соответствующего выбора источника. Как известно, к источникам шума относят в основном флуктуации фотонного потока непространственных шумов, внутренние шумы приемника, шумы усилителей и других блоков. В рассматриваемых системах одним из затруднённых для учёта источников шума, является происходящее по тем или иным причинам изменение амплитуды сигнала.

Если к перечисленному также добавить и проблемы, связанные с оптическими материалами и зависимостью оптического пропускания атмосферы от ряда факторов, в том числе и нестабильностью спектральных и фазовых характеристик объекта и фона поглощения, а также эмиссионных характеристик атмосферы в различных условиях, то в итоге сложится полное представление о существующей проблеме [4, 5].

Именно поэтому для облегчения решения упомянутых выше проблем, в представленной статье особое внимание уделено теоретическому обоснованию факторов, влияющих как на показатели чувствительности системы, так и на разрешающую способность и образование шума.

Чувствительность оптических систем. Значение чувствительности оптической системы, соответствует потоку излучения на входе системы, при котором отношение сигнал-импеданс на выходе из системы равно единице. Использование такого значения чувствительности считается благоприятным, если отношение сигнала к среднеквадратичному значению помехи велико. В ряде случаев, например, при регистрации слабых световых сигналов, среднеквадратичная мощность помехи вовсе не считается универсальным параметром для оценки качества системы. При этом, предпочтение отдается статистическим показателям помехи [6, 7].

В качестве основного показателя, характеризующего оптический передатчик (датчик), в основном используется понятие эквивалентной барьерной температуры. Предполагается, что эквивалентный коэффициент излучения передатчика, создающего тепловой эффект, равен коэффициенту излучения абсолютно черного тела, т.е. единице. В этом случае, исходя из эквивалентной температуры барьера, чувствительность оптической системы можно рассчитать по нижеследующей формуле:

$$W_{e.m.t} = \left(\frac{4\sqrt{K_{fd}}}{\pi K_0 K_e \sqrt{K_{SE} \cdot K_{OV}}} \right) \left(\frac{d}{D_0 \cdot D_S^* \cdot \sqrt{N}} \right) \left(\frac{\sqrt{\Omega_S}}{T_f} \right), \quad (1)$$

где K_{fd} – постоянная величина, характеризующая отношение эквивалентной барьерной полосы частоты к полосе излучения электронного тракта;

K_0 – коэффициент оптического пропускания;

K_e – коэффициент полезного действия (к.п.д.) электронного оборудования;
 K_{SE} – к.п.д. сканирования;
 K_{OV} – коэффициент покрытия (площадь, которую приемник не видит при сканировании);
 d – диаметр оптического приемника;
 D_o – диаметр оптики общего коллектора;
 Ω – угол обзора сканирования;
 T_f – время, затраченное на получение единичного изображения.

Как видно, формула (1) состоит из трех частей. Каждая часть и входящие в нее параметры имеют характерную особенность. Первая группа параметров K_e , K_o , K_{fd} , K_{ov} являются параметрами, которые характеризуют к.п.д. системы. Значения K_e и K_o определяются непосредственно в процессе конструирования оптической системы. Коэффициент оптического пропускания K_o для современных оптико-электронных систем (ОЭС) составляет от 60 до 85%.

Величина K_e , являющаяся к.п.д. используемого оборудования, обычно может составлять от 0,8 до 0,95 в зависимости от спектров основных частот электро-фильтров, их полос излучения и скорости сканирования. Верная оценка указанного коэффициента возможна при правильном определении передаточной функции электрического блока обработки сигналов, оптической системы и приемника. Коэффициент K_{fd} определяется после выбора передаточной функции формирующего фильтра.

Разрешающая способность. Форма передаточной функции считается одним из определяющих факторов при оценке разрешающей способности системы оптического преобразователя. Заданная передаточная функция (STF) в основном учитывает влияние нескольких функций, в том числе оптической передаточной функции (OTF), пространственной (DsTF) и временной функции процесса (DtTF):

$$STF = (OTF)(D_sTF)(D_tTF). \quad (2)$$

Это утверждение верно в случае линейности системы. Когда система нелинейна, расчет разрешения становится довольно сложным. Рассмотрим влияние указанных функций на полученные результаты.

1. Оптическая передаточная функция (OTF – Optical Transfer Function). Оптическая передаточная функция представляет собой двумерное преобразование Фурье и функцию, характеризующую распределение излучения в изображении идеального точечного излучателя. При анализе ОЭС обычно используют два типа OTF:

а) для узкой спектральной полосы систем, с ограниченной круговой апертурой:

$$OTF = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \frac{f_s}{f_{se}} - \frac{f_s}{f_{se}} \left[1 - \left(\frac{f_s}{f_{se}} \right)^2 \right] \right\}, 0 \leq \frac{f_s}{f_{se}} \leq 1, \quad (3)$$

где f_s – пространственная частота;

f_{se} – верхний предел пространственной частоты для рассматриваемой оптической системы.

б) для широкой спектральной полосы с учётом влияния аберрации:

$$OTF = \exp \left(-2\pi^2 [f_x^2 \delta_x^2 + f_y^2 \delta_y^2] \right), \quad (4)$$

где f_x и f_y – пространственные частоты;

δ_x и δ_y – соответствующие стандартные отклонения гауссовой аппаратной функции по координатам x и y , соответственно.

2. Фазовая передаточная функция (DsTF) для сканирующих приемников прямоугольной формы:

$$D_sTF = W_1 \frac{\sin \pi W_1 f_s}{\pi W_1 f_s}, \quad (5)$$

где W_1 – мощность сигнала на входе приемника;

f_s – пространственная частота.

3. Пространственная передаточная функция приемника (DtTF) определяется следующим выражением:

$$D_tTF = \frac{R_0}{1 + 2\pi T_D T_f}, \quad (6)$$

где R_0 – чувствительность приемника к постоянному току;

T_D – постоянная времени приемника.

Следует отметить, что значение пространственной частоты (f_s) для сканирующих систем варьируется в зависимости от скорости сканирования и рассчитывается следующим образом:

$$f = f_s \cdot V_s, \quad (7)$$

где f – значение частоты, генерируемой в процессе сканирования;

V_s – скорость сканирования.

Поскольку оценка передаточной функции в ОЭС сложна, обычно термин «разрешение» рассматривается как способность регистрации минимального размера (пикселя) системы. Хотя это довольно грубый подход и не позволяет оценить факторы, влияющие на этот показатель системы, он широко используется при решении практических задач и является простым способом для того, чтобы выразить показатели влияния сложной функции. В целом, следует приложить некоторые усилия для упрощения определения разрешения ОЭС. Это обозначение должно определяться в тесной связи с функцией системы.

В системах визуализации под «разрешением» понимается определение объектов (пикселей) наименьшего размера на изображении, а в системах регистрации под «разрешением» понимается точность измерения положения объекта в пространстве [8–12].

На пространственное разрешение влияют многие параметры, включая размеры приемника, скорость сканирования, пропускную способность электронной трассировки и другие. Особое внимание следует уделить основным влияющим факторам из указанных показателей. Наиболее важными из них являются габариты приемника [13–17]. Влияние этого фактора учитывается непосредственно в проектировании оптических систем. Для выбора соответствующего приемника необходимо учитывать порог возникновения оптической дифракции:

$$\vartheta \geq \frac{2.44\lambda_{max}}{D_0}, \quad (8)$$

где ϑ – угловое разрешение приемника, измеряемое в радианах; λ_{max} – максимальное значение длины волны в рабочем спектральном диапазоне приемника, измеряемое в см; D_0 – размер апертуры оптического приемника, измеряемый в см.

Соответственно, при выборе оптико-электронную систему основными факторами являются размер разделительных элементов напрямую связан с повышением точности расчетных передаточных функций и коэффициент отношения сигнал/шум.

Сигналы помех оптико-электронных систем. Существует ряд помех, т.е. причин и источников, ухудшающих чувствительность ОЭС. Среди наиболее существенных, являются шумы фоновых источников: тепловых, вибрационных, контактных, генерационно – рекомбинационных, фотонных шумов, а также шумы квантования, которые считаются наиболее проблемными среди перечисленных сигналов помех [18–21]. Указанные шумы различаются с точки зрения их появления и входа в систему ОЭС. Ниже приведены точки входа некоторых характерных помех для ОЭС (рис. 1).

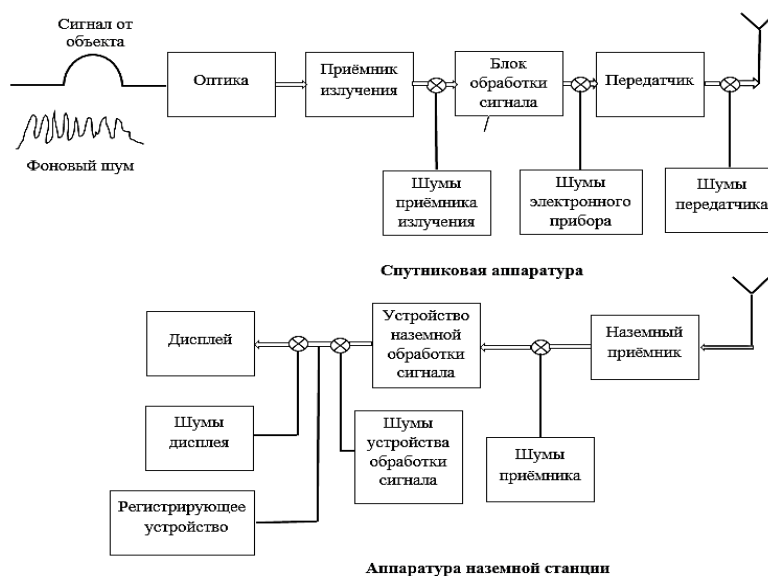


Рис. 1. Блок-схема основных источников помех спутниковых и наземных ОЭС

В упомянутых сигналах помех за счет внешних источников формируются только фоновые помехи. Другие препятствия являются непосредственно внутренними помехами ОЭС. Основными трудностями анализа помех считаются показатели их влияния на системную чувствительность, определение их источников, уровня его воздействия и количественная оценка каждого сигнала.

Заключение. Результаты проведенных исследований показывают, что функция, характеризующая фоновое излучение, является нестационарной, вызванная влиянием внешних факторов. Поэтому к применению винеровского спектра следует подходить с некоторой осторожностью. Следует учитывать, что оптический сигнал проходит через те же блоки, что и фоновые шумы, обладающие фотонными барьерами и флуктуирующей характеристикой. Таким образом, значения излучаемой или отраженной энергии в объекте также являются переменной в зависимости от их свойств.

Поскольку шумы в оптико-электронной системе складываются из суммы множественных шумов и создаются разными независимыми физическими источниками, то их статистические характеристики следует учитывать при рассмотрении шумов в целом.

Ввиду того, что основной фактор, характеризующий уменьшение размеров разделительных элементов напрямую связан с повышением точности расчетных передаточных функций и коэффициента отношения сигнал/шум, целесообразно использовать оптико-электронную систему Landsat 8 OLI 2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуляев Ю.В., Коротков В.А. Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения // Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. – 2013. – № 12. – С. 1-12.
2. Seyrafi Khalil. Electro-Optical Systems Analysis. – Publisher. Electro-Optical Research Co; Publication date. January 1, 1993. – 356 p. – ISBN-10.
3. Гудмен Д.Ж. Статистическая оптика. – М.: Мир, 1988. – 527 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1071 с.

5. Глаубер Р. Оптическая когерентность и фотостатистика. – М.: Мир, 1986. – 451 с.
6. Соболев В.С. Максимально правдоподобные оценки параметров оптических сигналов с учетом дробных и фоновых шумов // Компьютерная оптика. – 2006. – Т. 30. – С. 90-108.
7. Лебетро Э.Г. Системы оптической локации. – СПб.: Изд-во "СРУ-ПМО", 2012. – 129 с.
8. Березин В.В., Цицулин А.К. Обнаружение и оценка координат изображений точечных объектов в астронавигации и адаптивной оптике // Вестник ТОГУ. – 2008. – № 1 (8). – С. 11-20.
9. Zhou J., Li X. Finite-Time Mode Control Design for Unknown Nonaffine Pure-Feedback Systems // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015, Article ID 653739. – 9 p. – <http://dx.doi.org/10.1155/2015/653739>.
10. Howard A.M., Nibbelink N., Bernardes S., Fragaszy D.M. & Madden M.M. Remote sensing and habitat mapping for bearded capuchin monkeys (*Sapajus libidinosus*): landscapes for the use of stone tools // Journal of Applied Remote Sensing. – 2015. – 9 (1), 096020. – DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.096020>.
11. Aljamali N.M., & Mahsiin F. Review on Design Engineering Control Devices for Laboratory and Medical Devices with Innovative Technology // Journal of Instrumentation and Innovation Sciences. – 2021. – P. 13-20.
12. Nagham Mahmood Aljamali, Jihan Razzaq Moslim. Review on Engineering Designs for Laboratory Chemical Devices and Displays // Journal of Control and Instrumentation Engineering. – 2021. – 7, 2. – P. 38-46.
13. Шаповалов П.А., Михайлов Ю.В., Фролов А.В., Савватеев Д.О. Методологические основы и практические аспекты решения задач оптимизации несущих систем бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1 (231). – С. 252-265. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-252-265.
14. Report ITU-R SM.2405-1. Spectrum management principles, challenges and issues related to dynamic access to frequency bands by means of radio systems employing cognitive capabilities. – Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2405-1-2021>.
15. Matyszkiew R., Kaniewski P., Polak R., Laskowski D. Selected methods of protecting wireless communications against interferences // 2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). – Budva: IEEE, 2019. – P. 1-5.
16. Mitola J., Maquire G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal // IEEE Personal Communications. – 1999. – Vol. 6, Issue 4. – P. 13-18.
17. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). – Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf.
18. Zhzhikashvili A.V. Category-Theoretic Technology of Creation and Development of Knowledge-Based Intelligent Systems // Information processes. – 2016. – Vol. 16, No. 4. – P. 312-332.
19. Lawrence A. Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control. – Springer, 2012. – 278 p.
20. Noureldin A., Karamat T.B., and Georgy J. Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration. – Springer, 2013. – P. 297-313.
21. Бочаров Н.А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно - аппаратной платформе "Эльбрус" // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 8-14. – DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.

REFERENCES

1. Gulyaev Yu.V., Korotkov V.A. Korrektsiya prostranstvennogo spektra, iskazhennogo opticheskoy sistemoy, s pomoshch'yu metoda opornogo izobrazheniya [Correction of the spatial spectrum distorted by the optical system using the reference image method], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2013, No. 12, pp. 1-12.
2. Seyrafi Khalil. Electro-Optical Systems Analysis. Publisher. Electro-Optical Research Co; Publication date. January 1, 1993, 356 p. ISBN-10.
3. Gudmen D.Zh. Statisticheskaya optika [Statistical optics]. Moscow: Mir, 1988, 527 p.
4. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1071 p.

5. *Glauber R.* Opticheskaya kogerentnost' i fotostatistika [Optical coherence and photostatistics]. Moscow: Mir, 1986, 451 p.
6. *Sobolev V.S.* Maksimal'no pravdopodobnye otsenki parametrov opticheskikh signalov s uchetom drobnykh i fonovykh shumov [Maximum plausible estimates of optical signal parameters taking into account fractional and background noises], *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2006, Vol. 30, pp. 90-108.
7. *Lebetro E.G.* Sistemy opticheskoy lokatsii [Optical location systems]. St. Petersburg: Izd-vo "SRU-PMO", 2012, 129 p.
8. *Berezin V.V., Tsytulin A.K.* Obnaruzhenie i otsenka koordinat izobrazheniy tochechnykh ob"ektov v astronavigatsii i adaptivnoy optike [Detection and estimation of coordinates of images of point objects in astronavigation and adaptive optics], *Vestnik TOGU* [Bulletin of PNU], 2008, No. 1 (8), pp. 11-20.
9. *Zhou J., Li X.* Finite-Time Mode Control Design for Unknown Nonaffine Pure-Feedback Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, Vol. 2015, Article ID 653739, 9 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/653739>.
10. *Howard A.M., Nibbelink N., Bernardes S., Fragaszy D.M. & Madden M.M.* Remote sensing and habitat mapping for bearded capuchin monkeys (*Sapajus libidinosus*): landscapes for the use of stone tools, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9 (1), 096020. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.096020>.
11. *Aljamali N.M., & Mahsiin F.* Review on Design Engineering Control Devices for Laboratory and Medical Devices with Innovative Technology, *Journal of Instrumentation and Innovation Sciences*, 2021, pp. 13-20.
12. *Nagham Mahmood Aljamali, Jihan Razzaq Moslim.* Review on Engineering Designs for Laboratory Chemical Devices and Displays, *Journal of Control and Instrumentation Engineering*, 2021, 7, 2, pp. 38-46.
13. *Shapovalov P.A., Mikhaylov Yu.V., Frolov A.V., Savvateev D.O.* Metodologicheskie osnovy i prakticheskie aspekty resheniya zadach optimizatsii nesushchikh sistem besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh system [Methodological foundations and practical aspects of solving problems of optimizing the carrier systems of strapdown inertial navigation systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 1 (231), pp. 252-265. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-252-265.
14. Report ITU-R SM.2405-1. Spectrum management principles, challenges and issues related to dynamic access to frequency bands by means of radio systems employing cognitive capabilities. Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2405-1-2021>.
15. *Matyszkiewicz R., Kaniewski P., Polak R., Laskowski D.* Selected methods of protecting wireless communications against interferences, *2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*. Budva: IEEE, 2019, pp. 1-5.
16. *Mitola J., Maguire G.Q.* Cognitive radio: making software radios more personal, *IEEE Personal Communications*, 1999, Vol. 6, Issue 4, pp. 13-18.
17. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf.
18. *Zhozhikashvili A.V.* Category-Theoretic Technology of Creation and Development of Knowledge-Based Intelligent Systems, *Information processes*, 2016, Vol. 16, No. 4, pp. 312-332.
19. *Lawrence A.* Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control. Springer, 2012. – 278 p.
20. *Noureldin A., Karamat T.B., and Georgy J.* Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration. Springer, 2013, pp. 297-313.
21. *Bocharov N.A.* Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno-apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling algorithms for disaster tolerance of groups of robots on the software and hardware platform "Elbrus"], *Radiopromyshlennost'* [Radio industry], 2019, No. 3, pp. 8-14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Азизов Бахтияр Магатил оглу – Национальная Академия Авиации Азербайджана; e-mail: bakhtiyar48@mail.ru; г. Баку, Азербайджан; тел.: +994506275543; кафедра аэрокосмического мониторинга окружающей среды; д.т.н.; профессор.

Бадалова Айтадж Назиф кызы – e-mail: badalova-aytac60@rambler.ru; тел.: +994506234290; кафедра аэрокосмического мониторинга окружающей среды; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Мамедов Хикмет Назим оглу – e-mail: hikmat.mammadov@mail.ru; тел.: +994554554282; к.т.н.; начальник Аналитического отдела по научно-исследовательским работам.

Azizov Bakhtiyar Magatil – Azerbaijan National Aviation Academy; e-mail: bakhtiyar48@mail.ru; Baku, Azerbaijan; phone: +994506275543; the department of aerospace environmental monitoring; dr. of eng. sc.; professor.

Badalova Aytaj Nazif – e-mail: badalova-aytac60@rambler.ru; phone: +994506234290; the department of aerospace environmental monitoring; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Mammadov Hikmat Nazim – e-mail: hikmat.mammadov@mail.ru; phone: +994554554282; cand. of eng. sc.; head of the Analytical Department of Scientific Research.

УДК 621.372.82; 537.862

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-240-251

Д.Е. Титова

КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ВОЗБУЖДЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ИМПЕДАНСНЫМИ СТЕНКАМИ

Решение задач о поведении электромагнитных волн во вращающихся волноводах необходимо для объяснения экспериментов с электромагнитными полями во вращающихся интерферометрах и гироскопах и разработки новых методов измерения частоты вращения. Сложность постановки и решения подобных задач связана с тем, что вращающаяся система отсчета является неинерциальной, а пространство, ей соответствующее, из-за наличия центробежных сил и сил Кориолиса является искривленным. В данной работе выполнены постановка и решение в строгом виде задачи возбуждения сторонними источниками токов и зарядов электромагнитного поля во вращающемся цилиндрическом волноводе и исследовано влияния вращения на основные характеристики волновода. Строгая постановка и решение задач во вращающейся системе отсчета, учитывающие влияние эквивалентного гравитационного поля на электромагнитное поле в присутствии вращения, получены с использованием ковариантных уравнений Максвелла. Решена граничная задача возбуждения электромагнитного поля во вращающемся цилиндрическом волноводе с импедансными стенками при заполнении волновода диэлектриком. На основе полученных решений построены частотные характеристики вращающегося волновода. Показана зависимость параметров возбуждаемого электромагнитного поля от частоты вращения волновода. Расчетами подтвержден эффект расщепления критической частоты волновода при вращении на две новых частоты, равных разности критической частоты волновода в покое и частоты вращения, умноженной на порядок возбужденной моды. Зависимость параметров электромагнитного поля от частоты вращения может использоваться для измерения частоты вращения волновода, а полученное строгое решение – для планирования, проведения и трактовки результатов экспериментов.

Волноводы; гироскопы; граничные задачи; граничные условия; измерение частоты вращения; критические частоты; релятивистские эффекты; теория возбуждения волноводов; цилиндрические волноводы; частота вращения.

D.E. Titova

BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR EXCITING A ROTATING CYLINDRICAL WAVEGUIDE WITH IMPEDANCE WALLS

The aim of the paper is to study the behavior of electromagnetic field excited in rotating waveguides. Solution of the problem of excitation of electromagnetic waves in rotating waveguides is important for interpreting the experiments with electromagnetic waves in rotating interferometers and gyroscopes. It can also be used for development of new methods of rotation rate measurement. Formulation and solution of such problems in rigorous way is complicated due to the fact that the rotating reference frames are non-inertial, and the presence of centrifugal forces and Coriolis forces make the space curved. In this paper, formulation and solution of the problem of excitation of electromagnetic field in a rotating cylindrical waveguide is presented in a rigorous form. The rigorous solution of the problems is derived with covariant Maxwell equations and take into account the effect of an equivalent gravitational field on the electromagnetic field in rotating reference frames. Influence of the rotation on the main characteristics of the waveguide is studied. Impedance boundary problem of excitation of an electromagnetic field in a rotating cylindrical waveguide with constant impedance walls is solved. Frequency responses of the rotating waveguide are calculated on the basis of the analytical solutions. It is shown that the parameters of the excited electromagnetic field depend on the waveguide rotation rate. It is shown, that the azimuthal harmonics, which propagate in the clockwise and counterclockwise directions in the waveguide have different wavelengths and propagation constants. Calculations confirm the effect of splitting of the waveguide cut-off frequency into two new cut-off frequencies due to rotation. The new cut-off frequencies are equal to the difference between the cut-off frequency of the waveguide at rest and the rotation rate of the waveguide multiplied by the order of the mode, which is excited in it. The dependence of the electromagnetic field parameters on the rotation rate can be used for rotation rate measurement. The solution derived can be used for setting up and analysis of the results of scientific experiments with rotating waveguides.

Boundary conditions; boundary value problems; circular waveguides; cut-off frequency; electromagnetic waveguides; gyroscopes; relativistic effects; rotational measurement; rotational speed; waveguide theory.

Введение. Решение задач о поведении электромагнитных (ЭМ) волн во вращающихся волноводах и резонаторах необходимо для объяснения экспериментов с ЭМ полями в различного рода вращающихся интерферометрах и гироскопах [1–5].

Сложность поставленной задачи обусловлена тем, что вращающиеся системы отсчета (СО) являются неинерциальными СО, и пространство и время в них искривлены под действием центробежных сил и силы Кориолиса. Это подразумевает обращение к общей теории относительности [6–8] и использование ковариантной формы уравнений электродинамики [9–12]. Однако в большинстве известных случаев при решении подобных задач либо используются инерциальных СО, либо нековариантные формулировки уравнений Максвелла, либо различные упрощающие допущения. Такие методы приводят к приближенным результатам, эквивалентным результатам в инерциальных СО или описывающим частные случаи [9–14], а многие из полученных подобными способами решений нуждаются в экспериментальной проверке, определении величины принятых допущений и границ их (допущений) применения.

Строгая постановка и решение задач электродинамики во вращающихся СО с использованием ковариантных уравнений Максвелла [9, 15, 16], учитывающие влияние эквивалентного гравитационного поля на ЭМ поле в присутствии вращения, приведены в [17, 18]. Полученное строгое решение дало возможность установить эффекты зависимости параметров ЭМ поля от частоты вращения, дать строгое электродинамическое обоснование эффекта Саньяка [19] и предложить новые способы измерения частоты вращения [20]. В частности, было показано, что в

присутствии вращения критические частоты волновода в покое ω_0 расщепляются на две новых частоты $\omega_n = \omega_0 \pm n\Omega$, где n – порядок распространяющейся в волноводе моды. Однако численные исследования параметров ЭМ поля во вращающемся волноводе не проводились, а в реальности при наличии источника ЭМ поля и потерь в металлических стенках волновода, необходимо ставить и решать задачу возбуждения ЭМ поля сторонними источниками токов и зарядов в волноводе с импедансными стенками.

В настоящей работе полученные в [17] уравнения электродинамики используются для постановки и решения задачи возбуждения произвольным распределением токов и зарядов ЭМ поля во вращающемся цилиндрическом волноводе, являющемся математической моделью интерферометра. Задача имеет принципиальное значение для опытов с применением вращающихся интерферометров и лазерных гироскопов на основе трубок [2, 4] а полученное решение может быть использовано для реализации одноволнового способа измерения частоты вращения [20].

Постановка общей задачи. Введем инерциальную СО $K'(x', y', z', iv_\phi t) = K'(r', \varphi', z', iv_\phi t) = K'(x^{j'})$ и вращающуюся СО $K(r, \varphi, z, t) = K(x^\alpha, t)$, где i – мнимая единица, t – время, $v_\phi = c/\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$, – скорость света в неограниченном пространстве, c – скорость света в вакууме, $x^{j'} = (x^{1'}, x^{2'}, x^{3'}, x^0)$, $x^\alpha = (r', \varphi', z')$ – цилиндрические координаты, $\alpha' = (1', 2', 3')$. СО K вращается с частотой Ω относительно оси z' СО K' , оси z и z' совпадают между собой, $r' = r$, $\varphi' = \varphi + \Omega t$, $z' = z$. Цилиндрический волновод радиуса a с конечной проводимостью стенок σ_1 , заполненный изотропной однородной линейной средой с диэлектрической $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' - i\varepsilon_r'')$ и магнитной $\mu = \mu_0 \mu_r$ проницаемостями, где ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, $\mu_r = 1$, вращается в СО K' вокруг своей оси, которая совпадает с осью z' , с постоянной угловой частотой Ω , то есть находится в покое в СО K . ЭМ поле в волноводе на частоте ω_0 , измеренной в мировом времени t ($\exp(i\omega_0 t)$) – зависимость сторонних токов и зарядов от времени t) возбуждается сторонними источниками токов и зарядов, расположенными в области V_j и вращающимися вместе с волноводом. Считаем, что параметры σ_1 , ε , μ и a измерены в СО K (рис. 1), линейные скорости Ωa всех точек области V_j меньше скорости света [16, 17].

В трехмерном пространстве внутри цилиндрического волновода, где векторные операции тождественны операциям в R_3 , уравнения Максвелла для ЭМ поля можно записать следующим образом [15, 17]:

$$\text{rot} \hat{H} = \frac{\partial \hat{D}}{\partial t} + \hat{j}^E, \quad \text{rot} \bar{E} = \frac{-\partial \bar{B}}{\partial t} - \bar{j}^H, \quad \text{div} \hat{D} = \hat{\rho}^E, \quad \text{div} \bar{B} = \rho^H, \quad (1)$$

где $\bar{E} = E_\alpha = (E_r, rE_\varphi, E_z)$ – ковариантный вектор; $\hat{H} = \hat{H}^{\alpha\beta} = (H_r, rH_\varphi, H_z)$ – контравариантная бивекторная плотность веса +1; $\hat{D} = \hat{D}^\alpha = (r\hat{D}^r, \hat{D}^\varphi, r\hat{D}^z)$ – контравариантная векторная плотность веса +1; $\bar{B} = B_{\alpha\beta} = (rB_{r\varphi}, B_{rz}, rB_{\varphi z})$ – ковариантный бивектор; $\hat{j}^E = \hat{j}^{E,\alpha} = (r\hat{j}^{E,r}, \hat{j}^{E,\varphi}, r\hat{j}^{E,z})$ – контравариантная векторная плотность объемного стороннего электрического тока, $\hat{\rho}^E$ – скалярная плотность стороннего объемного электрического заряда, $\bar{j}^H = \bar{j}_{\alpha\beta}^H = (r\bar{j}^{H,r}, \bar{j}^{H,\varphi}, r\bar{j}^{H,z})$ – бивектор плотности объемного стороннего магнитного тока, ρ^H – простая скаляр-плотность объемного магнитного заряда [9, 15, 17].

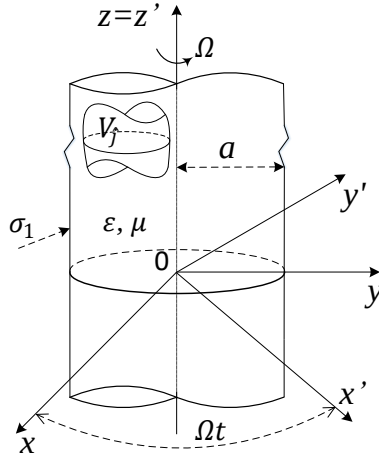


Рис. 1. К постановке задачи

Для разделения ЭМ поля во вращающейся СО K (1) на ЭМ поля электрического типа (E -типа, $B_{r\phi} = 0$) и магнитного типа (H -типа, $\hat{D}^z = 0$) используются материальные уравнения [17] и вводятся электрический V^E и магнитный V^H потенциалы Дебая, которые в СО K удовлетворяют волновому уравнению [17]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial V^{E,H}}{\partial r} + \frac{1-\beta^2}{r^2} \frac{\partial^2 V^{E,H}}{\partial \varphi^2} + \frac{2\beta}{v_\phi r} \frac{\partial^2 V^{E,H}}{\partial \varphi \partial t} + \frac{\partial^2 V^{E,H}}{\partial z^2} - \frac{1}{v_\phi^2} \frac{\partial^2 V^{E,H}}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где $\beta = \Omega r / v_\phi$, $v_\phi = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ – фазовая скорость в среде.

Для решения общей задачи возбуждения вращающегося цилиндрического волновода источниками сторонних токов и зарядов необходимо определить выражения для функций $V^{E,H}$.

Решение общей задачи. ЭМ поле во вращающемся цилиндрическом волноводе будем искать как сумму первичного ЭМ поля $\bar{E}^{E,H,P}$, $\bar{H}^{E,H,P}$, возбуждаемого источниками сторонних токов и зарядов, расположенными в области V_j , и вторичного ЭМ поля $\bar{E}^{E,H,S}$, $\bar{H}^{E,H,S}$, возбуждаемого эквивалентными поверхностными токами и зарядами на границе раздела сред при $r = a$. В таком случае выражение для полного ЭМ поля $\bar{E}^{E,H}$, $\bar{H}^{E,H}$ имеет вид:

$$\begin{aligned} E^E &= E^{E,P} + E^{E,S}, & E^H &= E^{H,P} + E^{H,S}, \\ H^E &= H^{E,P} + H^{E,S}, & H^H &= H^{H,P} + H^{H,S}. \end{aligned} \quad (3)$$

Потенциалы Дебая полного ЭМ поля (3) при наличии сторонних источников токов и зарядов [17] записываются в форме

$$V^{E,H} = V^{E,H,P} + V^{E,H,S} = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\alpha^2} U_n^{E,H} d\alpha, \quad (4)$$

где линейная комбинация цилиндрических функций $U_n^{E,H}$ полного ЭМ поля (3) выражается как сумма функций первичного $U_n^{E,H,P}$ и вторичного $U_n^{E,H,S}$ ЭМ полей (3):

$$U_n^{E,H} = U_n^{E,H,P} + U_n^{E,H,S}. \quad (5)$$

Функции $U_n^{E,H,P}$ первичного ЭМ поля при наличии сторонних источников токов и зарядов V_j в случае отсутствия границы раздела сред известны и записываются в общей форме как [17]:

$$U_n^{E,H,P} = e^{-in\varphi} e^{\pm\sqrt{\mathfrak{x}^2 - k_n^2}z} \frac{\mathfrak{x}}{\sqrt{\mathfrak{x}^2 - k_n^2}} \begin{cases} H_n^{(2)}(\mathfrak{x}r) F_n^{(2)E,H}(\mathfrak{x}), & r > \rho \\ J_n(\mathfrak{x}r) F_n^{(1)E,H}(\mathfrak{x}), & r < \rho, \end{cases} \quad (6)$$

где $\mathfrak{x}$ – поперечный коэффициент распространения азимутальной гармоники ЭМ поля, $\chi_n = \sqrt{k_n^2 - \mathfrak{x}^2}$ – продольный коэффициент распространения, $H_n^{(2)}(x)$, $J_n(x)$, – цилиндрические функции Ганкеля и Бесселя соответственно, $k_n = k_0 + n\Omega/v_\phi$, $k_0 = \omega_0/v_\phi$, $F_n^{(s),E,H}$ – коэффициенты, определяемые сторонними токами и зарядами [17]. Волновое число $k_n = \frac{\omega_n}{v_\phi} = (\omega_0 + n\Omega)/v_\phi = k_0 + n\Omega/v_\phi$ получается при решении волнового уравнения (2) для потенциалов Дебая в форме (4), (6) при наложении на последние условия периодичности $U_n^{E,H}(r, \varphi, z) = U_n^{E,H}(r, \varphi + 2\pi, z)$ и условия излучения при $z \rightarrow \pm\infty$ [17].

Выражения $U_n^{E,H,S}$ для вторичного ЭМ поля $\bar{E}^{E,H,S}$, $\bar{H}^{E,H,S}$ (5) при учете, что составляющие векторов напряженностей ЭМ поля должны иметь конечные величины на оси волновода при $r = 0$, представим как

$$U_n^{E,H,S} = e^{-in\varphi} e^{\pm\sqrt{\mathfrak{x}^2 - k_n^2}z} \frac{\mathfrak{x}}{\sqrt{\mathfrak{x}^2 - k_n^2}} a_n^{E,H} J_n(\mathfrak{x}r), \quad 0 \leq r \leq a, \quad (7)$$

где коэффициенты $a_n^{E,H}$ определяются из граничных условий (ГУ) и содержат информацию о токах, наведенных на стенках волновода сторонними источниками токов и зарядов.

Линейная комбинация цилиндрических функций полного ЭМ поля (3), (5) выражается как

$$U_n^{E,H} = e^{-in\varphi} e^{\pm\sqrt{\mathfrak{x}^2 - k_n^2}z} \frac{\mathfrak{x}}{\sqrt{\mathfrak{x}^2 - k_n^2}} \begin{cases} H_n^{(2)}(\mathfrak{x}r) F_n^{(2)E,H}(\mathfrak{x}) + \\ J_n(\mathfrak{x}r) F_n^{(1)E,H}(\mathfrak{x}) \end{cases} + \begin{cases} anE, H/n\mathfrak{x}r, & r > \rho \\ r < \rho. \end{cases} \quad (8)$$

В результате разделения ЭМ полей с помощью потенциалов Дебая $V^{E,H}$ (4) с учетом (8) получаем составляющие компонент напряженностей ЭМ поля электрического типа $\bar{E}^E$, $\hat{H}^E$ [17]:

$$\begin{aligned} E_r^E &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_{rn}^E = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\mathfrak{x}^2} \frac{\partial^2 U_n^E(\mathfrak{x})}{\partial r \partial z} d\mathfrak{x}, \\ E_\varphi^E &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_{\varphi n}^E = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\mathfrak{x}^2 r} \frac{\partial^2 U_n^E(\mathfrak{x})}{\partial \varphi \partial z} d\mathfrak{x}, \\ E_z^E &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_{zn}^E = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mathfrak{x}^2 - k_n^2}{\mathfrak{x}^2} U_n^E(\mathfrak{x}) d\mathfrak{x}, \\ H_r^E &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_{rn}^E = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{i\omega_0 \varepsilon}{\mathfrak{x}^2 r} \frac{\partial U_n^E(\mathfrak{x})}{\partial \varphi} + W^{-1} \frac{1}{\mathfrak{x}^2} \frac{\partial}{\partial r} \beta \frac{\partial U_n^E(\mathfrak{x})}{\partial r} \right) d\mathfrak{x}, \\ H_\varphi^E &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_{\varphi n}^E = -e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{i\omega_0 \varepsilon}{\mathfrak{x}^2} \frac{\partial U_n^E(\mathfrak{x})}{\partial r} - \frac{W^{-1} \beta}{\mathfrak{x}^2 r} \frac{\partial^2 U_n^E(\mathfrak{x})}{\partial \varphi \partial r} \right) d\mathfrak{x}, \\ H_z^E &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_{zn}^E = W^{-1} \beta E_r^E, \end{aligned} \quad (9)$$

и магнитного $\bar{E}^H$, $\hat{H}^H$ типа

$$\begin{aligned} E_r^H &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_{rn}^H = -e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{i\omega_0 \mu}{\mathfrak{x}^2 r} \frac{\partial U_n^H(\mathfrak{x})}{\partial \varphi} + W \frac{1}{\mathfrak{x}^2} \frac{\partial}{\partial r} \beta \frac{\partial U_n^H(\mathfrak{x})}{\partial r} \right) d\mathfrak{x}, \\ E_\varphi^H &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_{\varphi n}^H = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{i\omega_0 \mu}{\mathfrak{x}^2} \frac{\partial U_n^H(\mathfrak{x})}{\partial r} - \frac{W \beta}{\mathfrak{x}^2 r} \frac{\partial^2 U_n^H(\mathfrak{x})}{\partial \varphi \partial r} \right) d\mathfrak{x}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 E_z^H &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_{zn}^H = -\beta W H_r^H, \\
 H_r^H &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_{rn}^H = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\mathfrak{x}^2} \frac{\partial^2 U_n^H(\mathfrak{x})}{\partial r \partial z} d\mathfrak{x}, \\
 H_\varphi^H &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_{\varphi n}^H = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\mathfrak{x}^2 r} \frac{\partial^2 U_n^H(\mathfrak{x})}{\partial \varphi \partial z} d\mathfrak{x}, \\
 H_z^H &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_{zn}^H = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mathfrak{x}^2 - K_n k_n}{\mathfrak{x}^2} U_n^H(\mathfrak{x}) d\mathfrak{x},
 \end{aligned}$$

т.е. ЭМ поле имеет гармонический спектр частот.

Выражения (8), (9), (10) представляют собой общее решение задачи возбуждения ЭМ поля во вращающемся цилиндрическом волноводе сторонними источниками токов и зарядов. Для определения коэффициентов a_n^E и a_n^H из (8) необходимо сформулировать импедансные граничные условия (ИГУ) при $r = a$.

Частное решение задачи при импедансных стенках волновода. ИГУ на внутренней поверхности вращающегося волновода в общем виде имеют форму [17]:

$$\begin{aligned}
 E_z &= -(1 - \beta^2)^{-1/2} Z_2^\omega(\varphi, z) H_\varphi, \quad r = a, \\
 E_\varphi &= (1 - \beta^2)^{1/2} Z_1^\omega(\varphi, z) H_z, \quad r = a,
 \end{aligned} \tag{11}$$

где $Z_{1,2}^\omega(\varphi, z)$ – поверхностное сопротивление металла стенок волновода на частоте ω_0 . Считаем, что стенки волновода выполнены из однородного металла, а $\beta = \Omega r / v_\phi \ll 1$. Тогда $(1 - \beta^2)^{1/2} \approx (1 - \beta^2)^{-1/2} \approx 1$ и в приближении малости линейной скорости вращения Ωr по сравнению со скоростью света в среде v_ϕ ИГУ (11) примут классический вид [21]:

$$E_z = -Z^\omega H_\varphi, \quad E_\varphi = Z^\omega H_z, \quad r = a, \tag{12}$$

где $Z^\omega = R^\omega + iX^\omega$, R^ω и X^ω – активная и реактивная составляющие поверхностного импеданса металлических стенок волновода соответственно, $Z^\omega = W^\omega \approx (\omega_0 \mu_1 / \sigma_1)^{1/2} \exp(i\pi/4)$, W^ω – характеристическое сопротивление проводника, δ – глубина проникновения ЭМ поля в металлические стенки, $R^\omega \approx X^\omega \approx (\omega_0 \mu_1 / 2\sigma_1)^{1/2}$. С учетом $E_z = E_z^E + E_z^H$, $H_z = H_z^E + H_z^H$, $E_\varphi = E_\varphi^E + E_\varphi^H$ и $H_\varphi = H_\varphi^E + H_\varphi^H$, (9) и (10) запишем ИГУ для компонент пространственного спектра ЭМ поля как

$$E_{z,n}^E = -Z^\omega H_{\varphi,n}^E, \quad E_{\varphi,n}^E = Z^\omega H_{z,n}^E, \quad r = a, \tag{13}$$

$$E_{z,n}^H = -Z^\omega H_{\varphi,n}^H, \quad E_{\varphi,n}^H = Z^\omega H_{z,n}^H, \quad r = a. \tag{14}$$

Подставляя выражения из (9) и (10) в ИГУ (13), (14), учитывая (8), умножая полученные выражения на $e^{im\psi - i\chi\zeta}$, где m – целое число, χ – фиксированное число, и интегрируя результат по ψ от 0 до 2π , а по ζ – от $-\infty$ до $+\infty$, с учетом свойств функции, сокращая общие множители, получим для электрической и магнитной функций $U_{nm}^{E,H}$ следующие ИГУ:

$$\begin{aligned}
 (\mathfrak{x}^2 - K_n k_n) U_n^E(\mathfrak{x}) &= i Z_0^\omega k_n \frac{\partial U_n^E(\mathfrak{x})}{\partial r}, \quad r = a, \\
 i k_n \frac{\partial U_n^H(\mathfrak{x})}{\partial r} &= Z_0^\omega (\mathfrak{x}^2 - K_n k_n) U_n^H(\mathfrak{x}), \quad r = a,
 \end{aligned} \tag{15}$$

где $Z_0^\omega = Z^\omega / W$ – нормированное значение импеданса стенок волновода. Разделяя второе из равенств (15) на Z_0^ω , обозначая через $Y_0 = Z_0^{-1}$ поверхностную проводимость, можно убедиться в том, что ИГУ для ЭМ полей E - и H -типов симметричны.

Подставляя в (15) выражения для $U_n^{E,H}$ из (8) при $r = a$ ($r > \rho$), получим выражения для коэффициентов $a_n^{E,H}$ в (8):

$$\begin{aligned} a_n^E &= -\frac{(\mathfrak{x}^2 - K_n k_n) H_n^{(2)}(\mathfrak{x}r) - Z_0^\omega i k_n \frac{\partial}{\partial r} (H_n^{(2)}(\mathfrak{x}r))}{(\mathfrak{x}^2 - K_n k_n) J_n(\mathfrak{x}r) - Z_0^\omega i k_n \frac{\partial}{\partial r} (J_n(\mathfrak{x}r))} F_n^{(2)E}(\mathfrak{x}), \quad r = a. \\ a_n^H &= -\frac{i k_n \frac{\partial}{\partial r} (H_n^{(2)}(\mathfrak{x}r)) - Z_0^\omega (\mathfrak{x}^2 - K_n k_n) H_n^{(2)}(\mathfrak{x}r)}{i k_n \frac{\partial}{\partial r} (J_n(\mathfrak{x}r)) - Z_0^\omega (\mathfrak{x}^2 - K_n k_n) J_n(\mathfrak{x}r)} F_n^{(2)H}(\mathfrak{x}), \quad r = a. \end{aligned} \quad (16)$$

Если в полученном выражении положить равным нулю импеданс $Z_0^\omega = 0$, то получаем значение коэффициента $a_n^{E,H}$ для идеально проводящих стенок волновода ($\sigma_1 \rightarrow \infty$):

$$a_n^E = -\frac{H_n^{(2)}(\mathfrak{x}a)}{J_n(\mathfrak{x}a)} F_n^{(2)E}, \quad a_n^H = -\frac{(H_n^{(2)}(\mathfrak{x}a))'}{(J_n(\mathfrak{x}a))'} F_n^{(2)H}, \quad r = a, \quad (17)$$

где штрих означает производную по r при $r = a$.

Таким образом, решение импедансной граничной задачи возбуждения ЭМ поля во вращающемся цилиндрическом волноводе сторонними источниками токов и зарядов для ЭМ поля E - и H -типов определяется выражениями (8), (9), (10) и (16).

Анализ решения. Анализ полученных выражений для ЭМ поля E -типа (9) показывает, что ЭМ поле в пространстве V_3 состоит из бесконечного спектра неоднородных цилиндрических волн, распространяющихся от плоскости $z' = \zeta$ при $\mathfrak{x} < k_n$ (когда коэффициент распространения $\chi_n = \sqrt{k_n^2 - \mathfrak{x}^2} > 0$ имеет действительные значения) и экспоненциально затухающих при $\mathfrak{x} > k_n$ ($\chi_n = \sqrt{k_n^2 - \mathfrak{x}^2} < 0$). При этом все составляющие векторов ЭМ поля зависят от частоты вращения Ω через коэффициент $\beta = \Omega r / v_\phi$ и волновое число $k_n = k_0 + n\Omega / v_\phi$. Такая зависимость приводит к тому, что при вращении, то есть при $\Omega \neq 0$, $\omega_0 \neq 0$, существенно изменяются радиальная и азимутальная составляющие и появляется продольная составляющая вектора $\vec{H}$ (9). При равенстве частоты источника ЭМ поля нулю, то есть при $\omega_0 = 0$, но при $\Omega \neq 0$ волновое число $k_n = n\Omega / v_\phi \neq 0$ и в волноводе возбуждаются все три составляющие векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$, но последние пропорциональны частоте вращения, так как $\beta = \Omega r / v_\phi$. В таком случае можно говорить о том, что при отсутствии источника колебаний ($\omega_0 = 0$) электрическое поле $\vec{E}$ во вращающейся полости за счет эквивалентных гравитационных сил порождает (возбуждает) магнитное поле $\vec{H}$. Аналогичные изменения происходят и в составляющих вектора $\vec{E}$ для ЭМ поля H -типа (10).

Как было отмечено в [17], анализ полученных выражений (8)-(10) показывает, что ЭМ поле в волноводе представляет из себя набор пространственных гармоник с коэффициентами распространения χ_n , зависящими от частоты вращения Ω и номера гармоники n через волновое число $k_n = k_0 + n\Omega / v_\phi$:

$$\chi_n = \sqrt{\left(\frac{\omega_0 + n\Omega}{v_\phi}\right)^2 - \mathfrak{x}^2}. \quad (18)$$

Как было показано в [17], в таком случае критическое значение волнового числа будет определяться как $k_{n,кр} = \mathfrak{x} = u_{np}^E / a$, а критическая частота волновода $\omega_{0,кр}$ и критическая длина волны $\lambda_{0,кр}$ для моды порядка n будет равна

$$\omega_{0,кр} = \frac{u_{np}^E v_\phi}{a} - n\Omega, \quad \lambda_{0,кр} = \frac{2\pi a}{u_{np}^E - an\Omega / v_\phi}, \quad (19)$$

где $u_{np}^E = \alpha a$ – корни порядка $p = 1, 2, 3 \dots$ дисперсионного уравнения $J_n(\alpha a) = 0$ для ЭМ поля E -типа, u_{np}^H – корни порядка $p = 1, 2, 3 \dots$ дисперсионного уравнения $(J_n(\alpha a))' = 0$ для ЭМ поля H -типа [17].

Тогда каждой паре значений n и p будет соответствовать ЭМ волна E_{np}^E , распространяющаяся во вращающемся цилиндрическом волноводе. Выражение для полного ЭМ поля E -волн во вращающемся волноводе состоит из наложения ЭМ полей E_{np}^E -волн:

$$\begin{aligned} E_z^E &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\varphi} E_{zn1}^E + \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\varphi} E_{zn2}^E + \dots \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\varphi} E_{zn p}^E = \\ &= E_{z01}^E + E_{z02}^E + E_{z03}^E + \dots + e^{-in\varphi} (E_{z11}^E + E_{z12}^E + E_{z13}^E + \dots) + \\ &+ e^{in\varphi} (E_{z-11}^E + E_{z-12}^E + E_{z-13}^E + \dots) + \dots \end{aligned} \quad (20)$$

При этом, как было показано для задачи существования ЭМ колебаний во вращающемся волноводе в [17], критическая частота $\omega_{n, \text{кр}}$ и критическая длина $\lambda_{0, \text{кр}}$ волны вращающегося волновода (19) для ЭМ поля E_{np} будут определяться частотой вращения волновода Ω и отличаться для различных значений $n = 1, 2, 3 \dots$ и $n = -1, -2, -3 \dots$, т.е. для вращающихся по и против часовой стрелки парциальных гармоник E_{np} ЭМ поля:

$$\begin{aligned} \lambda_{0, \text{кр}}^+ &= \frac{2\pi a}{u_{np}^E - a|n|\Omega/v_\phi}, \quad \lambda_{0, \text{кр}}^- = \frac{2\pi a}{u_{np}^E + a|n|\Omega/v_\phi}, \\ \omega_{0, np}^{+ \text{кр}} &= \frac{u_{np}^E v_\phi}{a} - n\Omega, \quad \omega_{0, np}^{- \text{кр}} = \frac{u_{np}^E v_\phi}{a} + n\Omega. \end{aligned} \quad (21)$$

Согласно (21), если $n = 0$, $\Omega \neq 0$, в волноводе возбуждается мода E_{0p} с критической частотой $\omega_0 = u_{0p}^E v_\phi / a$, которая не несет в себе информации о вращении. Если волновод радиуса $a = u_{np}^E v_\phi / \omega_0$ вращается с угловой частотой Ω и в нем возбуждается ЭМ поле при $n \geq 1$, то в нем могут распространяться типы волн с критическими частотами $\omega_{0, np}^{\pm \text{кр}} = \frac{u_{np}^E v_\phi}{a} \mp n\Omega$ (21), что можно использовать для определения частоты вращения волновода [17, 20] как $\Omega = |\omega_{0, np}^{\text{кр}, 0} - \omega_{0, np}^{+ \text{кр}}|$. Однако при любом выбранном $N = n \geq 1$ во вращающемся волноводе будут распространяться моды порядка $n < N$ (в случае $N = 1$ – мода порядка $n = 0$), которые для определения $\omega_{0, Np}^{+ \text{кр}}$ необходимо будет отфильтровать.

Частотная характеристика вращающегося цилиндрического волновода.

Для численного анализа полученного решения запишем выражения для коэффициентов $F_n^{(s), E, H}$, определяемых сторонними токами и зарядами [17]. Для частного случая возбуждения ЭМ поля продольным элементарным электрическим вибратором $j^{E, r} = j^{E, \varphi} = 0$, $j_{\alpha, \beta}^H = 0$, $\rho^H = 0$ при условии $\Omega/\omega_0 \ll 1$ коэффициенты $F_n^{(s), E, H}$ запишутся как:

$$\begin{aligned} F_n^{(1)E} &\approx -\frac{i\alpha^2 W \hat{I}^E L}{8\pi k_n} e^{in\varphi_0} e^{\mp \sqrt{\alpha^2 - k_n^2} z_0} H_n^{(2)}(\alpha r_0), \\ F_n^{(2)E} &\approx -\frac{i\alpha^2 W \hat{I}^E L}{8\pi k_n} e^{in\varphi_0} e^{\mp \sqrt{\alpha^2 - k_n^2} z_0} J_n(\alpha r_0), \\ F_n^{(s)H} &\approx 0, \end{aligned} \quad (22)$$

где координаты $0 < r_0 < a$, z_0 , φ_0 определяют положение ЭЭВ в волноводе, L – длина ЭЭВ, $\hat{I}^E$ – плотность линейного тока. Таким образом, в приближении $\Omega/\omega_0 \ll 1$ $U_n^H \approx 0$ и ЭМ поля магнитного типа в полости отсутствуют.

Полученные выражения (9), (8), (16), (22) для составляющих векторов ЭМ поля, возбужденного ЭЭВ во вращающемся цилиндрическом волноводе, дают возможность построить частотную характеристику (ЧХ) ЭМ поля внутри волновода. При выбранном значении $n = N$ для случаев $\Omega = 0$ и $\Omega \neq 0$ ЧХ E_{Np} -волн (9) будем рассчитывать как

$$G_N = |\hat{D}_N^z(\omega)|^2 / |\hat{D}_N^z(\omega)|_{max}^2, \quad (23)$$

где $\hat{D}_N^z = e^{i\omega_0 t} \varepsilon \int_{-\infty}^{\infty} U_N^E d\alpha$ – электрическая индукция возбужденного во вращающемся цилиндрическом волноводе ЭМ поля [17].

В работе представленные ЧХ рассчитаны для следующего случая: ЭЭВ возбуждает во вращающемся цилиндрическом волноводе ЭМ поле на частоте $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$, $f_0 = 10$ ГГц, волновод заполнен кварцем с параметрами $\varepsilon_r' = 3,8$, $tg\delta = 10^{-4}$, стенки изготовлены из материала с проводимостью $\sigma_1 = 6,1 \cdot 10^7$ См/м, частота вращения $\Omega = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^6$ рад/с, радиусы волновода $a = 9,4$ мм ($n = N = 1$) и $a = 15,6$ мм ($n = N = 3$) выбраны из условия $a = u_{np}^E v_\phi / \omega_0$ (19) при $\Omega = 0$ и $p = 1$ (рис. 2). Для учета тепловых потерь на нагревание диэлектрика, заполняющего волновод, использовалось следующее выражение для волнового числа:

$$k_n^{E,H} \approx \omega_n \sqrt{\varepsilon' \mu} - i \frac{\omega_n}{2\omega_0} \sigma W, \quad (24)$$

где $\varepsilon' = \varepsilon_0 \varepsilon_r'$ – действительная часть диэлектрической проницаемости, σ – удельная проводимость диэлектрика (См/м).

Из ЧХ (23) для индукций ЭМ поля можно наблюдать эффект расщепления критических частот волновода, то есть «сдвиг» ЧХ влево ввиду появления новой критической частоты во вращающемся волноводе $\omega_0 - N\Omega$. Данный эффект расщепления критической частоты волновода радиуса a_{N1} при вращении с частотой Ω позволяет измерять скорость вращения волновода Ω как (21):

$$\Omega = \frac{1}{N} \left(\frac{u_{N1}^E v_\phi}{a_{N1}} - \omega_{0,N1}^{+кр} \right). \quad (25)$$

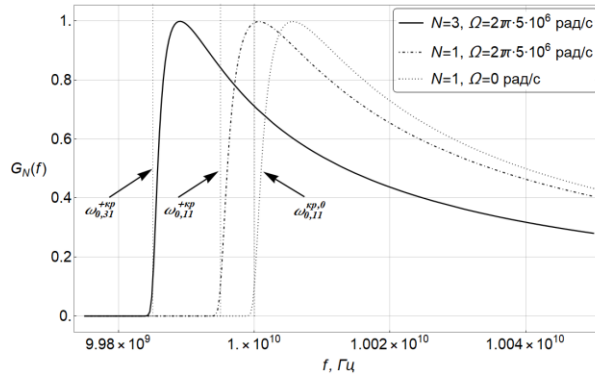


Рис. 2. Нормированные ЧХ волновода (23)

На графике виден сдвиг частотной характеристики вращающегося цилиндрического волновода в сторону меньших частот за счет того, что при вращении первой в волноводе радиуса $a = u_{Np}^E v_\phi / \omega_0$ начинает распространяться мода с частотой $\omega_{0,Np}^{+кр} = \frac{u_{Np}^E v_\phi}{a} - N\Omega$ (21) (при условии фильтрации моды с частотой $\omega_{0,np}^{+кр} = \frac{u_{np}^E v_\phi}{a}$ для $n < N$).

Выводы. Поставленная и решенная в строгом виде граничная задача о возбуждении ЭМ поля во вращающемся цилиндрическом волноводе с использованием уравнений Максвелла в ковариантной форме, позволила рассчитать параметры возбуждаемого ЭМ поля и показать их зависимость от частоты вращения. Подтвержден эффект расщепления критической частоты волновода при вращении на две новых частоты [17], равных разности критической частоты волновода в покое и частоты вращения, умноженной на порядок возбужденной моды: $\omega_n = \omega_0 \pm n\Omega$, где n – порядок распространяющейся в волноводе моды. Полученное решение позволило построить ЧХ вращающегося цилиндрического волновода и показать изменение спектра ЭМ поля при вращении. Полученное решение может быть использовано для экспериментов с применением вращающихся интерферометров и лазерных гироскопов на основе трубок [2, 4], а также для реализации радиочастотного способа измерения частоты вращения [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nagel M., Parker S., Kovalchuk E., Stanwix P.L., Hartnett J.G., Ivanov E.N., Peters A., Tobar M.E. Direct terrestrial test of Lorentz symmetry in electrodynamics to 10^{-18} // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6, No. 1.
2. Igel H., Schreiber K.U., Gebauer A., Bernauer F., Egendorf S., Simonelli A., Lin C.J., Wassermann J., Donner S., Hadziioannou C., Yuan S., Brotzer A., Kodet J., Tanimoto T., Hugentobler U., Wells J.P.R. ROMY: a multicomponent ring laser for geodesy and geophysics // *Geophysical Journal International*. – 2021. – Vol. 225, No. 1. – P. 684-698.
3. Schreiber K.U., Wells J.P.R. Invited Review Article: Large ring lasers for rotation sensing // *Review of Scientific Instruments*. – 2013. – Vol. 84.
4. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D., Abernathy M.R., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Physical Review Letters*. – 2016. – Vol. 6, No. 116.
5. Liu K., Zhang F.L., Li Z.Y., Feng X.H., Li K., Lu Z.H., Schreiber K.U., Luo J., Zhang J. Large-scale passive laser gyroscope for Earth Rotation Sensing // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44, No. 11.
6. Laue M.V. Translation: On the Experiment of F. Harress. – URL: https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Experiment_of_F._Harress (дата обращения: 10.03.2023).
7. Schiff L.I. A Question in General Relativity // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 1939. – Vol. 25, No. 7. – P. 391-395.
8. Benedetto E., Feleppa F., Licata I., Moradpour H., Corda C. On the general relativistic framework of the Sagnac effect // *The European Physical Journal C*. – 2019.
9. Post E.J. Sagnac effect // *Reviews of Modern Physics*. – 1967. – Vol. 39, No. 2. – P. 475-493.
10. Heer C.V. Resonant frequencies of an electromagnetic cavity in an accelerated system of reference // *Physical Review*. – 1964. – Vol. 134.
11. Yildiz A., Tang C.H. Electromagnetic cavity resonances in accelerated systems // *Physical Review*. – 1966. – Vol. 146, No. 4. – P. 947-954.
12. Anderson J.L., Ryon J.W. Electromagnetic radiation in Accelerated Systems // *Physical Review*. – 1969. – Vol. 181, No. 5. – P. 1765-1775.
13. Shiozawa T. Phenomenological and electron-theoretical study of the electrodynamics of Rotating Systems // *Proceedings of the IEEE*. – 1973. – Vol. 61, No. 12. – P. 1694-1702.
14. Volkov A.M., Kiselev V.A. Proper frequencies of a rotating ring resonator // *Soviet Physics JETP*. – 1973. – Vol. 30, No. 4. – P. 733-736.
15. Schouten J.A. Tensor analysis for physicists. – New York: Dover Publications, Inc., 1989.
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория Поля. – 7-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
17. Петров Б.М. Электромагнитные поля во вращающихся интерферометрах и гироскопах. – М.: Горячая линия - Телеком, 2015.

18. Петров Б.М. Прикладная электродинамика вращающихся тел. – М.: Горячая линия - Телеком, 2009.
19. Petrov B.M. Electrodynamics theory of Sagnac effect // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2010. – Vol. 53, No. 10. – P. 511-520.
20. Петров Б.М. Одноволновый способ измерения частоты вращения интерферометра. Патент на изобретение, № RU2554316 от 2015.
21. Senior T.B.A., Volakis J.L. *Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics*. – Bath, England: Bookcraft, 1995.

REFERENCES

1. Nagel M., Parker S., Kovalchuk E., Stanwix P.L., Hartnett J.G., Ivanov E.N., Peters A., Tobar M.E. Direct terrestrial test of Lorentz symmetry in electrodynamics to 10^{-18} , *Nature Communications*, 2015, Vol. 6, No. 1.
2. Igel H., Schreiber K.U., Gebauer A., Bernauer F., Egdorf S., Simonelli A., Lin C.J., Wassermann J., Donner S., Hadziioannou C., Yuan S., Brotzer A., Kodet J., Tanimoto T., Hugentobler U., Wells J.P.R. ROMY: a multicomponent ring laser for geodesy and geophysics, *Geophysical Journal International*, 2021, Vol. 225, No. 1, pp. 684-698.
3. Schreiber K.U., Wells J.P.R. Invited Review Article: Large ring lasers for rotation sensing, *Review of Scientific Instruments*, 2013, Vol. 84.
4. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D., Abernathy M.R., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Physical Review Letters*, 2016, Vol. 116, No. 6.
5. Liu K., Zhang F.L., Li Z.Y., Feng X.H., Li K., Lu Z.H., Schreiber K.U., Luo J., Zhang J. Large-scale passive laser gyroscope for Earth Rotation Sensing, *Optics Letters*, 2019, Vol. 44, No. 11.
6. Laue M.V. Translation: On the Experiment of F. Harress. Available at: https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Experiment_of_F._Harress (accessed 10 March 2023).
7. Schiff L.I. A Question in General Relativity, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1939, Vol. 25, No. 7, pp. 391-395.
8. Benedetto E., Feleppa F., Licata I., Moradpour H., Corda C. On the general relativistic framework of the Sagnac effect, *The European Physical Journal C*, 2019.
9. Post E.J. Sagnac effect, *Reviews of Modern Physics*, 1967, Vol. 39, No. 2, pp. 475-493.
10. Heer C.V. Resonant frequencies of an electromagnetic cavity in an accelerated system of reference, *Physical Review*, 1964, Vol. 134.
11. Yildiz A., Tang C.H. Electromagnetic cavity resonances in accelerated systems, *Physical Review*, 1966, Vol. 146, No. 4, pp. 947-954.
12. Anderson J.L., Ryon J.W. Electromagnetic radiation in Accelerated Systems, *Physical Review*, 1969, Vol. 181, No. 5, pp. 1765-1775.
13. Shiozawa T. Phenomenological and electron-theoretical study of the electrodynamics of Rotating Systems, *Proceedings of the IEEE*, 1973, Vol. 61, No. 12, pp. 1694-1702.
14. Volkov A.M., Kiselev V.A. Proper frequencies of a rotating ring resonator, *Soviet Physics JETP*, 1973, Vol. 30, No. 4, pp. 733-736.
15. Schouten J.A. *Tensor analysis for physicists*. New York: Dover Publications, Inc., 1989.
16. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. Teoriya Polya* [Theoretical physics. Field theory]. 7 th ed. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988.
17. Petrov B.M. *Elektromagnitnye polya vo vrashchayushchikhsya interferometrach i giroskopakh* [Electromagnetic fields in rotating interferometers and gyroscopes]. Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2015.
18. Petrov B.M. *Prikladnaya elektrodinamika vrashchayushchikhsya tel* [Applied electrodynamics of rotating bodies]. Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2009.
19. Petrov B.M. Electrodynamics theory of Sagnac effect, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2010, Vol. 53, No. 10, pp. 511-520.

20. Petrov B.M. Odnovolnovyy sposob izmereniya chastoty vrashcheniya interferometra. Patent na izobretenie, № RU2554316 ot 2015 [Single-wave method for measuring the rotation frequency of the interferometer. Patent for invention, No. RU2554316 dated 2015].
21. Senior T.B.A., Volakis J.L. Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics. Bath, England: Bookcraft, 1995.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Титова Дарья Евгеньевна – Передовая инженерная школа ЮФУ; e-mail: dtitova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89094408014; научный сотрудник.

Titova Daria Evgen'evna – Advanced Engineering School, Southern Federal University; e-mail: dtitova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79094408014; researcher.

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-251-266

Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков, М.Н. Дубяго, О.В. Качелаев

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена расчету напряженности электромагнитного поля (ЭМП) в изоляционном материале силового кабеля (СК). Исследовано магнитное поле одиночного образца кабеля марки АПвПу-10 1х240/70. Приведены теоретические сведения для расчета напряженности электростатического осесимметричного поля на основе решения интегральных уравнений Фредгольма в кусочно-однородной линейной полимерной изоляции с включениями. Построены модели для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной площади и с разными электрофизическими параметрами (заполнением). При прохождении ЭМП через различные материалы, заполняющие включение наблюдается поглощение энергии волн этими веществами. На основе проведенного моделирования с применением программы Comsol выполнен анализ ЭМП на границе раздела диэлектрических сред между сферическим микровключением и основной изоляцией. Показано, что в твердых диэлектриках, проводниках поглощение ЭМП значительно. Если волна встречает какой-либо проводник, то большая часть ее энергии поглощается им. Наличие в изоляции неоднородностей (дефектов) на границах раздела изоляция – неоднородность вызывает скачки напряженности электрического поля ϵ_1/ϵ_2 , ϵ_2/ϵ_3 . Проведено моделирование и анализ распределения напряженности электрического поля в области дефекта и установлено, что с увеличением $S_{\text{деф}}$ амплитуда всплеска магнитной индукции (B) на первой границе дефекта возрастает. На второй границе наоборот. С увеличением $S_{\text{деф}}$ глубина провала индукции (B) увеличивается. Однако при сохранении общей картины величины провалов при различных типах заполнения включения различны: – наибольший градиент наблюдается при заполнении водой, наименьшие при заполнении углерод плюс сшитый полиэтилен (С+СПЭ). Таким образом это может являться диагностическим параметром качества изоляции СК. Результаты работы представляют интерес при решении комплекса задач, связанных с различными аспектами электромагнитной совместимости, и надежности функционирования электроэнергетических систем.

Электроэнергетическое оборудование; полимерные изоляционные материалы; диэлектрическая проницаемость; распределение напряженности электрического поля; разрушающие методы диагностики; анализ.

N.K. Poluyanovich, D.V. Burkov, M.N. Dubyago, O.V. Kachelaev

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN CABLE SYSTEMS WITH INSULATION FROM POLYMER MATERIALS

The article is devoted to the calculation of the electromagnetic field strength (EMF) in the insulating material of a power cable (SC). The magnetic field of a single sample of the APvPu-10 1x240/70 cable was investigated. Theoretical information is given for calculating the strength of an electrostatic axisymmetric field based on the solution of Fredholm integral equations in a

piecewise homogeneous linear polymer insulation with inclusions. Models are constructed for calculating and analyzing the intensity distribution of inhomogeneous electric fields in a dielectric medium with inclusions of different areas and with different electrophysical parameters (filling). When the EMF passes through various materials filling the inclusion, the absorption of wave energy by these substances is observed. Based on the simulation performed using the Comsol program, the analysis of EMF at the interface of dielectric media between spherical micro-inclusion and the main insulation was performed. It is shown that in solid dielectrics, conductors, EMF absorption is significant. If a wave meets any conductor, then most of its energy is absorbed by it. The presence of inhomogeneities in the insulation at the insulation – inhomogeneity interface causes jumps in the electric field strength $\varepsilon_1/\varepsilon_2$, $\varepsilon_2/\varepsilon_3$. The simulation and analysis of the electric field voltage distribution in the defect region were carried out and it was found that with increasing S_{def} , the amplitude of the magnetic induction surge (B) at the first boundary of the defect increases. On the second border, the opposite is true. With increasing S_{def} , the depth of the induction failure (B) increases. However, while maintaining the overall picture, the values of dips with different types of filling inclusions are different: – the greatest gradient is observed when filling with water, the smallest when filling with carbon plus cross-linked polyethylene (C + SPE). Thus, it can be a diagnostic parameter of the quality of the insulation of the IC. The results of the work are of interest in solving a complex of problems related to various aspects of electromagnetic compatibility and reliability of functioning of electric power systems.

Electric power equipment; polymer insulating materials; dielectric permeation; electric field strength distribution; non-destructive diagnostic methods; analysis.

Введение и постановка задачи. В силовых кабелях в условиях воздействия электрического поля старение полиэтилена (ПЭ) определяется наличием неоднородностей, образованием низкомолекулярных продуктов (в том числе и воды) на технологической стадии изготовления при сшивке полиэтиленовой изоляции и увлажнении в процессе эксплуатации. Такие дефекты являются конструктивными, технологическими и эксплуатационными неоднородностями, которые приводят к локальному изменению напряженности электрического поля [1]. Любая неоднородность приводит к локальному повышению напряженности поля и развитию дендритов, которые являются источником частичных разрядов в изоляции и приводят, в конечном итоге, к преждевременному пробою кабеля.

Вопросам построения моделей для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной формы, взаимным расположением и с разными электрофизическими параметрами посвящен ряд работ [2, 3].

Численные расчеты выполняются с использованием пакетов прикладных программ, реализующих метод конечных элементов [4]. Так, расчеты, выполненные в [4], показывают, что коэффициент неоднородности электрического поля (отношение максимального значения напряженности поля в расчетной области к среднему значению напряженности во всей изоляции) возрастает более чем в три раза (с 20 до 87) при увеличении диаметра водяного включения в 10 раз (с 5 до 50 мкм). В [1] на основе разработанной математической модели с применением пакета прикладных программ Comsol Multiphysics получено распределение напряженности электрического поля в изоляции с гетерогенными включениями разных наполнений. Исследованы закономерности увеличения максимальной напряженности электрического поля в диэлектриках при увеличении размеров электропроводящих включений и уменьшении расстояния между ними вдоль поля.

Статистическая модель определения степени разрушения изоляционного слоя. Наиболее вероятные формы возникновения дефекта – эллиптическая, распределенная по радиусу кабеля, т.к. дефекты изоляции, которые приводят к пробою, обычно представляют собой дендритные образования – структурные каналы в изоляции, заполненные жидкостью, твердыми примесями или газами. Для воз-

никновения напряженности электрического поля выше пробивной, принятой 6 кВ/мм для состаренного кабеля, необходимо разрушить около 78 % изоляции по радиусу, согласно картине электрического поля и распределению напряженности электрического поля в области дефекта, рис.1,б. Вероятности пробоя изменяется по закону распределения Вейбулла, которое выражается формулой:

$$f = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

где k – коэффициент формы, λ – коэффициент масштаба.

Для математического расчета остаточного ресурса изоляции кабелей требуется знать функцию вероятности пробоя в зависимости от степени разрушения материала. Для распределения Вейбулла она имеет вид:

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

1. Заполнение неоднородностей изоляционного материала. Полиэтиленовая изоляция по своей морфологии является неоднородной, гетерогенной средой, т.к. содержит, прежде всего, аморфную и кристаллическую фазы, свойства которых отличаются. Требования к однородности изоляции кабелей среднего и высокого напряжения достаточно высоки [5–11]. Размер допустимых примесей не должен превышать 200 и 100 мкм для кабелей класса напряжения 6-35 кВ. Диэлектрическая проницаемость играет ключевую роль в понимании физических процессов, происходящих внутри материалов, и ее исследование помогает разрабатывать новые технологии, приборы и оборудование. Относительная диэлектрическая проницаемость полиэтиленовой (ПЭ) изоляции $\epsilon_2 = 2,28$.

Во время вулканизации полиэтилена возникает большое количество микрополостей (включений) диаметром 1-30 мкм (производственные включения). Такие микропоры могут возникнуть из-за несовершенного (неравномерного) распределения наполнителя в полимерной матрице.

При сшивании с помощью полифункциональных групп максимальный размер микропустот составляет 200 мкм при том же количестве в единице объема, которые могут быть частично заполнены влагой (водные включения). Влага не образуется в процессе реакции сшивания, а образуется в течение последующих технологических реакций. В изоляции всегда имеются небольшие количества воды в виде растворов или гомогенно распределенные по толщине (0.02-0.5%). Вода проникает в изоляцию также в процессе эксплуатации из электропроводящих слоев и внешней среды; увлажнение возникает также в результате теплопередачи. Если изоляция из сшитого полиэтилена окружена водой, то водяные пары диффундируют в изоляцию и насыщают ее в тем большей степени, чем выше ее температура. Например, при температурах 25, 55 и 90°C насыщение изоляции водой достигается соответственно при 25, 55 и 450 1/млн. Размер молекулы воды составляет порядка $2,5^\circ\text{A} = 0,25$ нм. В результате совместного действия воды, микродефектов, напряженности электрического поля и температуры (термомеханических напряжений) на полиэтиленовую изоляцию в ней развиваются водные тринги – окисленные участки изоляции с суб- и микропустотами, заполненные водой. Полиэтиленовая изоляция способна растворить определенное количество влаги: коэффициент растворимости в зависимости от плотности при температуре 20°C варьируется от 1,66 до 11,2 кг/(м³·Па) [5].

Под действием электрического поля высоко полярная молекула воды за счет сил, возникающих при электрофорезе, притягивается к местам с повышенной напряженностью (микропоры, пористые загрязнения, микротрещины). В результате образуются местные скопления воды, по своей структуре близкие к пере-

насыщенным водным растворам. Наличие водных включений сферической формы приводит к возрастанию напряженности в 5-10 раз. Водные триинги (ВТ) зарождаются уже при напряженностях (Е), равных 2–3 кВ/мм. Уже при средней напряженности электрического поля, превышающей 2МВ/м, следует учитывать возможность быстрого образования ВТ.

Диэлектрическая проницаемость воды это функция $\epsilon = f(t; ВВ; М)$, где t – время, ВВ – вид воды, М – наличие солей. Вода обладает электрической проводимостью, то при этом возникает ряд специфических электрофизических эффектов, наиболее важным из которых является эффект Фарадея. Он состоит в возбуждении в движущейся проводящей среде электрического и вторичного магнитного полей. Относительная диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды – 80. В реальности в ней всегда присутствуют те или иные растворенные соли, а значит - отрицательные и положительные ионы. В переменных электрических полях диэлектрическая проницаемость воды уменьшается с ростом частоты приложенного поля, достигая значения 4-5 для частот больше 10-12 Гц.

Воздушные включения. При производстве кабеля толщина воздушных включений в изоляции не должна превышать 0,5 мм. В изоляции высоковольтных кабелей воздушные включения недопустимы, т.к. в них могут развиваться частичные разряды при нормальных условиях эксплуатации или перенапряжениях. ЧР приводят к быстрой деградации полимерной изоляции [9], т.к. под действием разрядов в полимерах развиваются дендриты – древовидные каналы неполного пробоя. Развитие дендритов приводит к пробое изоляции. При наличии сферических включений, наполненных воздухом, напряженность на поверхности включения не превышает среднее значение 2 кВ/мм для силовых кабелей среднего напряжения. При средней напряженности электрического поля, превышающей 2 МВ/м, следует учитывать возможность быстрого образования триингов.

Оценка слабых мест. В кабельных изделиях с пластмассовой изоляцией имеются и могут образовываться включения (воздушные, газовые и СПЭ) различных форм и размеров. Минимальное значение электрической прочности изоляции определяется прочностью слабых мест, к которым относятся различные включения. Электрическая прочность включений связана с их геометрическими размерами и внутренним заполнением. Для оценки слабых мест выполним расчет напряженности электрического поля, возникающего во включении определенного размера и в определенной толщине изоляции. Напряженность внутри включения рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{в}} = \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{в}} \cdot \epsilon_{\text{в}} \cdot \left[\frac{1}{\epsilon_{\text{д}}} \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{в}}}{r_{\text{ж}}}\right) + \frac{1}{\epsilon_{\text{в}}} \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{в}} \Delta_{\text{в}}}{r_{\text{в}}}\right) + \frac{1}{\epsilon_{\text{д}}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{из}}}{r_{\text{в}} + \Delta_{\text{в}}}\right) \right]}$$

где $\epsilon_{\text{г}} = 1.00057$ – диэлектрическая проницаемость воздуха, $\epsilon_{\text{д}} = 2.28$ – диэлектрическая проницаемость ПЭ.

При толщине поры $\Delta_{\text{в}} > 0,5$ мм напряженность поля в поре становится выше электрической прочности воздуха, что приведет к пробое изоляции.

2. Уравнения для расчета напряженности осесимметричного поля. Кабели напряжением 6-35 кВ выпускаются, как правило, в одножильном исполнении, рис. 1. Коаксиальная конструкция кабелей [11] в одножильном исполнении имеет осевую симметрию и состоит из: токопроводящей жилы; трехслойной изоляции, включая полупроводящий экран по жиле, полимерную изоляцию, полупроводящий экран по изоляции; медного экрана; защитной полимерной оболочки, рис. 1.

В основе численного метода расчета напряженности поля лежат интегральные уравнения Фредгольма первого и второго рода (метод вторичных источников) для осесимметричного поля [6]. Для неизвестной плотности поверхностных зарядов $\sigma(M)$ осесимметричного тела при размещении точки Q на поверхности токопроводящей жилы, потенциал U которого задан, интегральное уравнение Фредгольма первого рода имеет вид:

$$\frac{1}{\pi\epsilon_0} \int \frac{K(k) * R_M * \sigma(M)}{\sqrt{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}} * dL_M = U, \quad (1)$$

где $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода;

$k = \frac{\sqrt{4R_Q * R_M}}{\sqrt{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}}$ – аргумент полного эллиптического интеграла первого рода $K(k)$; R_Q , R_M – радиус-векторы точек Q (где ищется потенциал) и M (где размещен кольцевой заряд; R_M – радиус кольцевого заряда); Z_Q – высота точки Q ; Z_M – высота кольцевого заряда над осью радиусов R (рис. 1 [7]).

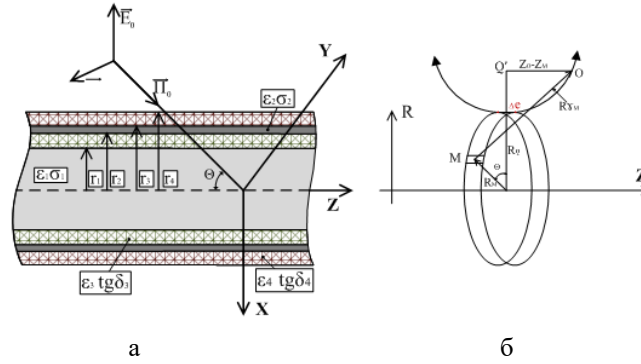


Рис. 1. Падение ЭМ волны на экранированный кабель

Поверхность осесимметричного тела является результатом вращения образующей L вокруг оси симметрии OZ (рис. 1,б): при вращении отрезка ΔL вокруг оси образуется элементарный круговой пояс. Плотность поверхностного заряда σ кругового пояса в силу осевой симметрии одна и та же по длине окружности. Заменяя в (1) интеграл конечной суммой

$$\frac{1}{\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{K(k_{ij}) * R_j * \sigma(M_j)}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} \quad (2)$$

и записывая (2) N раз, помещая каждый раз точку i в новое место, получим систему линейных алгебраических уравнений, решив которую можно найти искомые плотности поверхностных зарядов $\sigma(M_j)$ [индексом i обозначена точка пространства, где ищется потенциал, а индексом j – точка, где находится кольцевой заряд]. В матричной форме система линейных алгебраических уравнений:

$$\bar{A} * \bar{\sigma} = \bar{U}. \quad (3)$$

Коэффициенты a_{ij} СЛАУ (3) определяются по формулам:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\pi\epsilon_0} * \frac{K(k_{ij}) * R_j * \sigma(M_j)}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} & \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \ln\left(\frac{16 * R_j}{\Delta L_j / e}\right) * \Delta L_j & \forall i = j \end{cases}$$

При работе кабеля под переменным напряжением частоты 50 Гц постоянная времени τ саморазряда кабеля, определяемая емкостью и сопротивлением высококачественной неполярной полиэтиленовой изоляции, больше полупериода приложенного напряжения $\tau \gg 1/(2f)$. В такой изоляции объемные заряды не успевают накапливаться, и напряженность поля распределяется в соответствии со значениями диэлектрических проницаемостей: $\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 = \varepsilon_3 E_3$.

При наличии в изоляции неоднородностей на границах раздела изоляция – неоднородность будут наблюдаться скачки напряженности электрического поля $\varepsilon_1/\varepsilon_2$, $\varepsilon_2/\varepsilon_3$, рис. 1. Расчет поля в кусочно-однородной диэлектрической среде с относительными диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 сводится к расчету поля в однородной среде с дополнительными вторичными источниками расположенными так, чтобы на границе раздела диэлектрических сред для нормальных составляющих, претерпевающих излом, выполнялось условие: $\varepsilon_1 \cdot E_{1n} = \varepsilon_2 \cdot E_{2n}$ [6, 7]. Интегральное уравнение Фредгольма второго рода для связанных зарядов на границе диэлектрических сред для осесимметричного поля имеет вид:

$$\frac{\sigma(Q)}{2\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \int n_R dE_R + n_Z dE_Z = 0, \quad (5)$$

где n_R , n_Z – компоненты вектора нормали к образующей в точке Q; dE_R , dE_Z – радиальная и осевая компоненты вектора напряженности поля в i -й точке при единичной поверхностной плотности заряда j -го пояса ($\sigma_j = 1$ Кл/м²)

$$dE_R = \frac{\Delta L_M}{4\pi\varepsilon_0 R_Q} * \sqrt{\frac{R_M}{R_Q}} * k^2 \left\{ \frac{k}{2} K(k) * \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) - \right. \\ \left. - K'(k) * \left[1 - \frac{k^2}{2} \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) \right] \right\};$$

$$dE_Z = \frac{\Delta L_M}{4\pi\varepsilon_0 R_Q} * \frac{k^3 (Z_Q - Z_M)}{2\sqrt{R_Q R_M}} * [K(k) + k * K'(k)], \quad (6)$$

где $K'(k)$ – производная функции полного эллиптического интеграла первого рода по параметру k ; k'_{RQ} – производная параметра k по радиальной координате точки Q; k'_{ZQ} – то же самое по осевой координате точки Q. Производная функции полного эллиптического интеграла первого рода $K'(k)$ вычисляется путем дифференцирования аналитического приближения к $K(k)$:

$$K(k) \approx a_0 + a_1 m + a_2 m^2 + (b_0 + b_1 m + b_2 m^2) * \ln \frac{1}{m}, \quad m = 1 - k^2;$$

$$K'(k) \approx \left[a_1 + 2 * a_2 m + (b_1 + 2b_2 m) * \ln \frac{1}{m} + (b_0 + b_1 m + b_2 m^2) * m \left(-\frac{1}{m^2} \right) \right] * (-2k),$$

где $a_0 = 1,3862944$; $a_1 = 0,1119723$; $a_2 = 0,0725296$; $b_0 = 0,5$; $b_1 = 0,1213478$; $b_2 = 0,0288729$; $a_1 = 0,4630151$; $a_2 = 0,1077812$; $b_1 = 0,2452727$; $b_2 = 0,0412497$ [5].

Уравнение (5) сводится к СЛАУ вида:

$$\bar{B} * \bar{\sigma} = 0, \quad (7)$$

в которой элементы матрицы коэффициентов определяются как

$$b_{ij} = \begin{cases} -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} * (n_R dE_R + n_Z dE_Z) & \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} & \forall i = j \end{cases}. \quad (8)$$

Плотность поверхностных зарядов на границах раздела сред с учетом неоднородности диэлектрика определится в результате решения составной на основе (3) и (7) СЛАУ вида:

$$\bar{A} * \bar{\sigma} = \bar{U}, \quad (9)$$

где σ – матрица-столбец неизвестных расчетных плотностей вторичных зарядов, Кл/м²; U – матрица-столбец, первые $N_e/2$ членов которой отражают заданные потенциалы узлов, лежащих на токопроводящей жиле, а вторые $N_e/2$ – на заземленном экране и остальные $N_d = N_e + 1 : N$ на границах раздела диэлектрических сред – равны нулю; A – квадратная матрица коэффициентов, элементы которой a_{ij} и b_{ij} находятся по формулам (4) и (8), вытекающих из интегральных уравнений Фредгольма первого рода для узлов, лежащих на электродах, и второго рода – для узлов, лежащих на границе раздела диэлектрических сред (в данном случае изоляции и сферических включений). После решения СЛАУ (9) напряженность электрического поля (нормальная составляющая) находится по формулам:

$$E_{i\perp} = \begin{cases} \sigma_i / \varepsilon_0; & i = 1 : N_e; \\ \varepsilon_i / (2\varepsilon_0) * (I + I * \beta); & i = N_e + 1 : N \end{cases} \quad (10)$$

где $\beta = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$ – параметр, связанный с разностью диэлектрических проницаемостей по направлению нормали к границе раздела сред.

3. Исходные данные. Объект исследования кабель из сшитого полиэтилена, рис. 2.

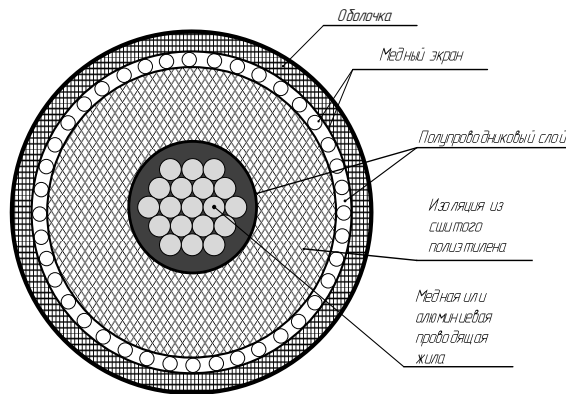


Рис. 2. Послойное расположение материалов СПЭ кабеля

В табл. 1, приведены расчетные параметры одножильного кабеля АПВПУ 1х240/25-10.

Таблица 1

Расчетные параметры одножильного кабеля АПВПУ 1х240/25-10

Номинальное сечение жилы (сечение экрана), мм ²	Число проволок, шт.	Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение, мм ²	Диаметр провода, мм	Наружный диаметр Кабеля 10 кВ	Толщина наружной изоляции
240 (25)	19	4	238,7	20,0	35,8	3

Толщина полупроводящего слоя, мм: 0,3–0,9; сечение медного экрана 70 мм², диаметр экрана 55 мм.

В табл. 2, представлены физические свойства материалов кабеля.

Таблица 2

Физические свойства материалов кабеля

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельная электропроводность, См/м	ТКС	Относительная диэлектрическая проницаемость, д.е.	Удельная теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Проводники						
Алюминий	2700	$3,3 \cdot 10^7$	0,0044	–	221	860
Медь	8900	$5,6 \cdot 10^7$	0,0041	–	380	385
Сталь	7850	$2,1 \cdot 10^7$	0,0088	–	58	457
Диэлектрики						
Сшитый полиэтилен	920-960	$10^{-14} \div 10^{-15}$	–	2,2÷2,4	0,3÷0,4	2000
Полупроводящий слой	920-960	$10^{-4} \div 10^{-5}$	–	2,2÷2,4	0,3÷0,4	2000
ПВХ-пластикат	1400	10^{-17}	–	3,2÷3,6	0,19	2140
Воздух	1,15	–	–	1	–	1006

4. Моделирования физических процессов. 4.1. Распределение напряженности электрического поля по толщине однородной сшитой полиэтиленовой изоляции в одножильном высоковольтном силовом кабеле [12, 13] идеальной коаксиальной конструкции. При работе кабеля под переменным напряжением частоты 50 Гц постоянная времени τ саморазряда кабеля, определяемая емкостью и сопротивлением высококачественной неполярной полиэтиленовой изоляции больше полу периода приложенного напряжения $\tau \gg 1/(2f)$. Электрическая прочность при переменном напряжении составила 6 МВ/м. При наличии в изоляции неоднородностей на границах раздела изоляция – неоднородность будут наблюдаться скачки напряженности электрического поля ϵ_1/ϵ_2 , ϵ_2/ϵ_3 . Однако наиболее часто для характеристики магнитных свойств веществ используют относительную магнитную проницаемость μ_r . Таким образом, связь между напряженностью и магнитной индукцией будет иметь следующий вид

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ_r – относительная магнитная проницаемость вещества, B – магнитная индукция, μ_r – относительная магнитная проницаемость вещества.

Выражения напряженности для магнитного поля, создаваемого прямым проводом с током:

$$H = \frac{I}{2\pi b},$$

где I – ток протекающий по проводнику, b – расстояние от центра провода до точки, в которой считается напряженность магнитного поля.

Индукция магнитного поля бесконечно длинного проводника

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0},$$

r_0 – расстояние от проводника до точки где измеряем магнитную индукцию.

Средняя рабочая напряженность электрического поля составляет 2 и 6 кВ/мм для кабелей среднего и высокого напряжения соответственно. При таких значениях напряженностей электрического поля вероятность разрыва связей в полиэтиленовой изоляции маловероятна. В структуре изоляции возникают нано размерные субмикротрещины, накопление которых приводит к образованию микротрещин. Для полиэтилена, как и других полимерных материалов, характерна внутримолекулярная и межмолекулярная пористость (от 1 до 5 нм). В термопластичном полиэтилене количество микропустот составляет, в среднем, до 10^4 в 1 мм^3 при максимальном размере до 80 мкм [5].

4.2. Влияние среды на распространение ЭМВ. При распространении ЭМВ в среде происходит потеря энергии [14, 15], обусловленные диэлектрическими потерями (на запаздывание – поляризацией молекул вещества в переменном магнитном поле). Диэлектрические потери характеризуются эквивалентной удельной проводимостью. Потери зависят от среды. Поглощающую среду характеризуют отношением амплитуд плотностей токов проводимости и смещения $d\mu / d\sigma$. Если отношение μ к бесконечности, то среда приближается к идеальному проводнику, а при приближении к 0 – к идеальному диэлектрику. Реально суммарный ток в средах состоит из двух составляющих – тока проводимости и тока смещения.

При прохождении ЭМП через различные вещества наблюдается поглощение энергии волн этими веществами [16]. Очень мало поглощение в неионизированном воздухе. В твердых диэлектриках, проводниках поглощение радиоволн значительно. Если волна встречает какой-либо проводник, то большая часть ее энергии поглощается им. Объясняется это тем, что волна приводит в движение электроны проводника и создает в нем ток высокой частоты. На образование его и расходуется энергия волны.

Диэлектрики также поглощают энергию волн. Поле волны создает в молекулах диэлектриков смещение электронов – ток смещения. Он является током высокой частоты, т. е. представляет собой колебание электронов внутри молекул. Токи смещения вызывают нагревание диэлектрика, на что расходуется энергия.

4.3 Моделирование распространения поля. Для получения численных результатов [17, 18] по ЭМ полю в основной изоляции СКЛ [19–22], проводилось численное моделирование распространения поля с помощью программы COMSOL. А именно, построение моделей для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной площади и с разными электрофизическими параметрами (заполнением). Моделирование ЭМП проводилось при заполнении дефекта различными материалами (воздух, вода, спекшийся ПЭ). Площадь дефекта $R_{\text{деф}}$: $0,1*0,05$; $0,2*0,1$; $0,25*0,15$; $0,3*0,2$; $0,35*0,25$; $0,4*0,3$; $0,45*0,35$; $0,5*0,4$; $0,55*0,45 \text{ мм}$. Расстояние от жилы до центра дефекта $r=0,5$; $r=1$; $r=1,5$; $r=2$; $r=2,5$.

Таблица 3

Параметры вещества, заполняющего включение

Заполнении дефекта	Отн. магн. прониц μ_r , Гн/м	Относит диэл. проницаем ϵ_r	Удельная проводимость δ , См/м
Вода, H_2O	0.999992	4	$5,5 \cdot 10^{-6}$
Воздух, N_2 , O_2	1	1	0
Углерод+СПЭ ($-CH_2-CH_2-$) + 2C	1,02	1,2	1800
СПЭ + углерод, ($-CH_2-CH_2-$) + C	1,05	1,7	1200
Спеч СПЭ, ($-CH_2-CH_2-$) ₂ + C	1,02	2	900
Углерод C	1	1	3000

СПЭ чистый δ (См/м) $= 1 \cdot 10^{-15}$

Линии магнитного поля на включении представлены на рис. 3 для одного из случаев. Неоднородность заполнена водой и расположена на расстоянии 0,5 мм от жилы.

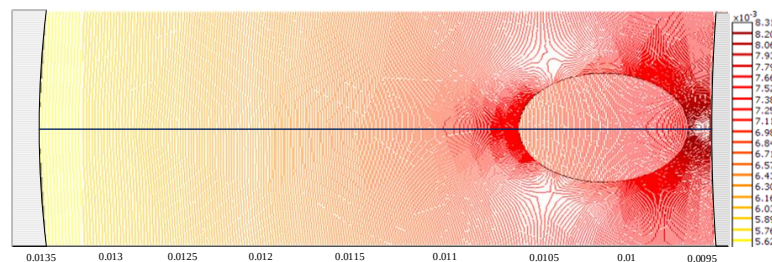


Рис. 3. Линии магнитного поля при моделировании в COMSOL. Заполнение – вода. Удаление от жилы 0.5 мм. Размер дефекта 0.4x0.3 мм

На рис. 4 приведены зависимости изменения индукции $B(r)$ от площади включения, при его заполнении водой и углеродом плюс СПЭ.

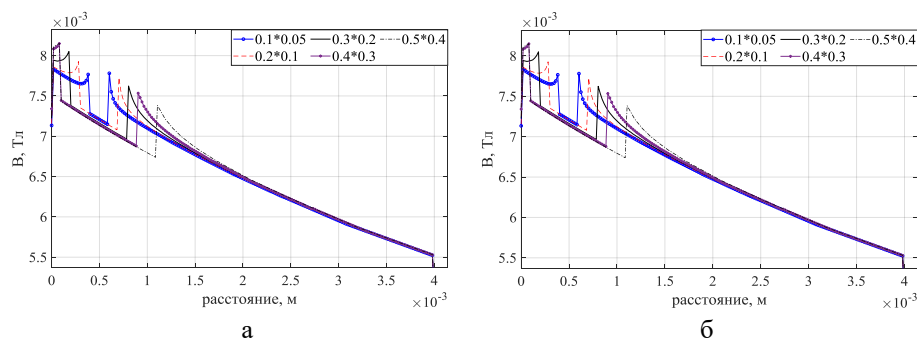


Рис. 4. Зависимости изменения индукции $B(r)$ от площади включения, при:
а – заполнение включения – вода; б – заполнение включения C+СПЭ

На рис. 5 приведены зависимости изменения напряженности $H(r)$ от площади включения, при его заполнении водой и углеродом плюс СПЭ.

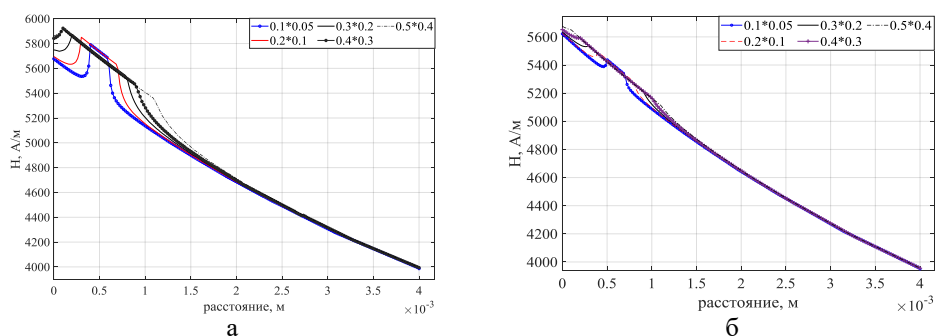


Рис. 5. Зависимости изменение напряженности $H(r)$ от площади включения, при: а – заполнение включения вода; б – заполнение включения С+СПЭ

Амплитуда скачков по индукции (В) и напряженности (Н) с различными материалами заполнения дефекта, и размерах дефекта $0,1 \times 0,05$ мм, приведена в табл. 4, 5 (соответственно).

Таблица 4

Амплитуда скачков по индукции (В)

Материал заполнения включения	Первый скачок		Второй скачок	
	Расстояние, м	Значение, Тл	Расстояние, м	Значение, Тл
Вода (H_2O)	0,0003819	0,007766	0,000603	0,007781
Воздух (N_2, O_2)	0,0003819	0,007697	0,000603	0,007711
С+СПЭ $(-CH_2-CH_2-)n + C$	0,0004824	0,007505	0,0007035	0,007424

Таблица 5

Амплитуда скачков напряженность (Н)

Материал заполнения включения	Первый скачок		Второй скачок	
	Расстояние, м	Значение, А/м	Расстояние, м	Значение, А/м
Вода (H_2O)	0,000402	5790	0,0005829	5689
Воздух (N_2, O_2)	0,000402	5739	0,0005829	5638
С+СПЭ $(-CH_2-CH_2-)n + C$	0,0005025	5504	0,0006834	5408

На рис. 6 приведены зависимости изменения индукции $B(m)$ от расстояния до дефекта, при различных материалах заполняющих включения

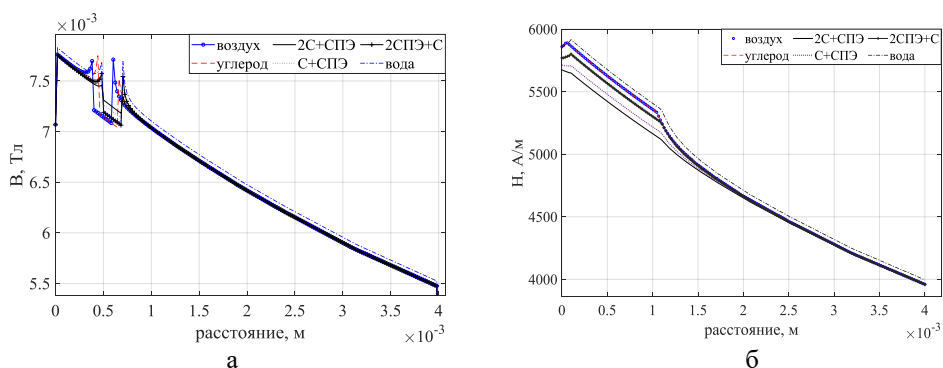


Рис. 6. Зависимости изменение индукции $B(m)$ от расстояния до дефекта, при: а – размер включения $0,1 \times 0,05$ мм; б – размер включения $0,5 \times 0,4$ мм

На рис. 7 приведены зависимости изменения напряженности (H) от расстояния до дефекта, при различных материалах заполняющих включение

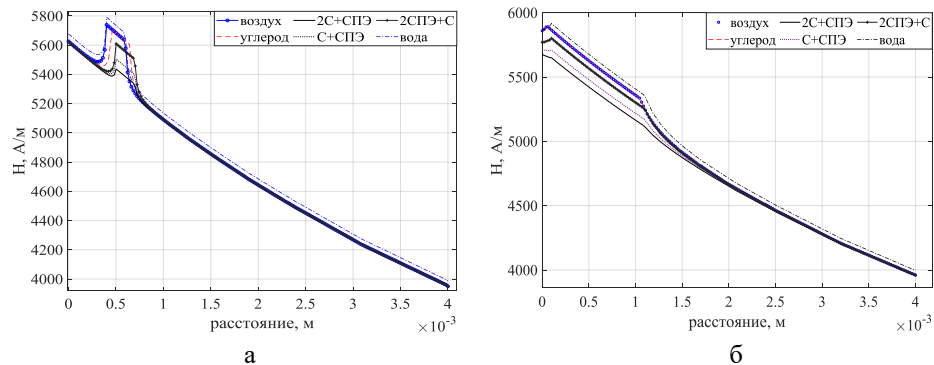


Рис. 7. Зависимости изменение напряженности (H) от расстояния до дефекта, при: а–размер дефекта 0.1×0.05 мм; б–размер включения 0.5×0.4 мм

Таким образом, получены модели проведен расчет и анализ распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями с разными электрофизическими параметрами выполнено в программе Comsol. С увеличением $S_{\text{деф}}$ амплитуда всплеска магнитной индукции (B) на первой границе дефекта возрастает. На второй границе наоборот. С увеличением $S_{\text{деф}}$, глубина провала (B) увеличивается. Однако при сохранении общей картины величины провалов при различных типах заполнения включения – различны: – наибольшие при заполнении водой, а наименьшие при заполнении $C+СПЭ$.

Проведение натурного эксперимента по распространению ЭМП внутри изоляционного материала не представляется возможным. Поэтому проведено сравнение полученных нами результатов с известными результатами моделирования. Так, в работе [23] посвященной исследованию поля в изоляции с включениями, заполненными только водой и воздухом, расположенными близко к экрану, и моделировалось только электростатическое поле.

Заключение. Исследовано магнитное поле одиночного образца кабеля марки АПвПу-10 $1 \times 240/70$ при различных: расстояния неоднородности (включения) от жилы, при различном заполнении неоднородности. На основе проведенного моделирования с применением программы Comsol выполнен анализ ЭМП на границе раздела диэлектрических сред между сферическим микровключением и основной изоляцией. Построены модели для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной площади и с разными электрофизическими параметрами (заполнением). Установлено, что при наличии в изоляции неоднородностей на границах раздела изоляция – неоднородность будут наблюдаться всплески напряженности электрического поля ϵ_1/ϵ_2 , ϵ_2/ϵ_3 . Так в области раздела диэлектрических сред между однородной изоляцией и включением воды в большей степени наблюдается искажение поля. С увеличением геометрии включения ($a \times b$) в изоляционном материале (от 0.1×0.05 до 0.5×0.4 мм). Увеличение площади включения (с 0.0157 мм^2 до 0.628 мм^2) привело: – к росту магнитной индукции и напряженности ЭМП в среднем на десять процентов (рис. 3,а,б); – градиент первого скачка магнитной индукции (B) на включении, при различном заполнении включения (воздух, вода, плотный СПЭ), увеличивается в несколько раз. Градиент второго скачка магнитной индукции (B) на включении, при различном заполнении включения (воздух, вода, плотный СПЭ),

уменьшается на порядок; – градиент первого скачка напряженности (Н) на включении, при различном заполнении включения (воздух, вода, плотный СПЭ), уменьшается в несколько раз. Градиент второго скачка напряженности (Н) на включении, при различном заполнении включения (воздух, вода, плотный СПЭ), увеличивается примерно в два раза. Таким образом, это может являться диагностическим параметром качества изоляции СКЛ.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №22-29-00370.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Щерба А.А., Щерба М.А.* Моделирование и анализ электрического поля в диэлектрической среде, возмущенного проводящими микровключениями разных размеров и конфигураций // *Техническая электродинамика*. – 2010. – № 6. – С. 3-9.
2. *Щерба А.А., Перетятко Ю.В., Золотарев В.М.* Моделирование электрических полей и расчет объемов с критической напряженностью в полимерной изоляции высоковольтных кабелей и СИП // *Техническая электродинамика*. – 2008. – № 2. – С. 113-119.
3. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М.* Математическая модель и методика численного расчета неоднородного электрического поля и нагрева полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых кабелей при возникновении дендритных микроканалов // *Техническая электродинамика*. – 2006. – № 4. – С. 116-120.
4. *Щерба А.А., Перетятко Ю.В.* Моделирование неоднородных электрических полей в высоковольтной твердой полимерной изоляции с гетерогенными микровключениями // *Вестник национального университета "Львовская политехника"*. – 2007. – № 597. – С. 123-129.
5. *Беспрозванных А.В., Кессаев А.Г.* Вычислительные эксперименты для расчета напряженности осесимметричного электростатического поля в кусочно-однородной изоляции со сферическими включениями // *Электротехника и электромеханика*. – 2014. – № 5. – С. 67-72.
6. *Тозони О.В.* Метод вторичных источников в электротехнике. – М.: Энергия, 1975. – 295 с.
7. *Набока Б.Г.* Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: учеб. пособие для студентов электроэнергетических специальностей. – К.: ИСДО, 1995. – 120 с.
8. *Полуянович Н.К., Тибейко И.А.* Эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. – Таганрог: ЮФУ, 2014.
9. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.
10. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод селекции сигнала ЧР с помощью Вейвлет-преобразования // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 2 (139). – С. 99-104.
11. *Poluyanovich N.K., Burkov D.V., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Kosenko E.Y.* The influence of the electro-magnetic field on the neural network monitoring of insulation materials for electric cable networks // *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2021*. – С. 9590839.
12. *León F., Anders G.J.* Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2008. – Vol. 23, No. 2. – P. 537-543.
13. *Li H.J.* Estimation of Soil Thermal Parameters from Surface Temperature of Underground Cables and Prediction of Cable Rating // *IEEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.* – 2005. – Vol. 152, No. 6. – P. 849-854.
14. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Прогнозирование ресурса кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 3 (205). – С. 51-62.
15. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишихонов В.Х.* Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 7 (168). – С. 230-237.
16. *Poluyanovich N.K., Shurykin A.A., Dubyago M.N.* Evaluation of the Cable Line Resource from the Aging Degree of Its Insulating Material // *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021*. – 2021. – P. 1165-1169.

17. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Анализ и выбор методики в решении задач интеллектуализации систем прогнозирования термофлуктуационных процессов в кабельных сетях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2 (212). – С. 52-66.
18. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Азаров Н.В., Огреничев А.В. Нейросетевой метод в задачах прогнозирования электропотребления в электроэнергетической системе // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 1. – С. 114-118.
19. Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M. Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, No. 3. – P. 619-626.
20. Anders G.J. Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – P. 3-11.
21. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Бурьков Д.В. Нейросетевая многоэтапная система прогнозирования ресурса силовой кабельной линии // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 11. – С. 20-26.
22. Poluyanovich N., Azarov N., Dubyago M. Neural network method for monitoring thermofluctuation processes in cable lines taking into account the interference influence // Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021. – 2021. – P. 455-459.
23. Поляков Д.А. Мониторинг остаточного ресурса изоляции кабельных линий 6(10) кВ из сшитого полиэтилена: дисс. ... канл. тех. наук. – Омск, 2017. – 148 с.

REFERENCE

1. Shcherba A.A., Shcherba M.A. Modelirovanie i analiz elektricheskogo polya v dielektricheskoy srede, vozmushchennogo provodyashchimi mikrovklyucheniyami raznykh razmerov i konfi-guratsiy [Modeling and analysis of an electric field in a dielectric medium perturbed by conducting microinclusions of different sizes and configurations], *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2010, No. 6, pp. 3-9.
2. Shcherba A.A., Peretyatko Yu.V., Zolotarev V.M. Modelirovanie elektricheskikh poley i raschet ob'emov s kriticheskoy napryazhennost'yu v polimernoy izolyatsii vysokovol'tnykh kabeley i SIP [Modeling of electric fields and calculation of volumes with critical tension in polymer insulation of high-voltage cables and SIP], *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2008, No. 2, pp. 113-119.
3. Shidlovskiy A.K., Shcherba A.A., Podol'tsev A.D., Kucheryavaya I.N., Zolotarev V.M. Matematicheskaya model' i metodika chislennogo rascheta neodnorodnogo elektricheskogo polya i nagreva polietilenovoy izolyatsii vysokovol'tnykh silovykh kabeley pri vozniknovenii dendritnykh mikrokanalov [Mathematical model and method of numerical calculation of inhomogeneous electric field and heating of polyethylene insulation of high-voltage power cables in the occurrence of dendritic microchannels], *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2006, No. 4, pp. 116-120.
4. Shcherba A.A., Peretyatko Yu.V. Modelirovanie neodnorodnykh elektricheskikh poley v vysokovol'tnoy tverдой polimernoy izolyatsii s geterogennymi mikrovklyucheniyami [Modeling of inhomogeneous electric fields in high-voltage solid polymer insulation with heterogeneous microinclusions], *Vestnik natsional'nogo universiteta "L'vovskaya politekhnika"* [Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"], 2007, No. 597, pp. 123-129.
5. Besprozvannykh A.V., Kessaev A.G. Vychislitel'nye eksperimenty dlya rascheta napryazhennosti osesimmetrichnogo elektrostاتического polya v kusochno-odnorodnoy izolyatsii so sfericheskimi vklyucheniyami [Computational experiments for calculating the strength of an axisymmetric electrostatic field in piecewise homogeneous insulation with spherical inclusions], *Elektrotekhnika i elektromekhanika* [Electrotechnics and Electromechanics], 2014, No. 5, pp. 67-72.
6. Tozoni O.V. Metod vtorychnykh istochnikov v elektrotekhnike [Method of secondary sources in electrical engineering]. Moscow: Energiya, 1975, 295 p.

7. Naboka B.G. Raschety elektrostatičeskikh poley v elektroizolyatsionnoy tekhnike: ucheb. posobie dlya studentov elektroenergetičeskikh spetsial'nostey [Calculations of electrostatic fields in electrical insulation technology: a textbook for students of electric power specialties]. K.: ISDO, 1995, 120 p.
8. Poluyanovich N.K., Tibeyko I.A. Ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Operation and repair of power supply systems of industrial enterprises]. Taganrog: YuFU, 2014.
9. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improvement of methods of diagnostics and forecasting of electrical insulation materials of power supply systems: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.
10. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Metod selektsii signala ChR s pomoshch'yu Veyvlet-preobrazovaniya [Method of selection of the CR signal using the Wavelet transform], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 99-104.
11. Poluyanovich N.K., Burkov D.V., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Kosenko E.Y. The influence of the electro-magnetic field on the neural network monitoring of insulation materials for electric cable networks, *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2021*, pp. 9590839.
12. León F., Anders G.J. Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, Vol. 23, No. 2, pp. 537-543.
13. Li H.J. Estimation of Soil Thermal Parameters from Surface Temperature of Underground Cables and Prediction of Cable Rating, *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 2005, Vol. 152, No. 6, pp. 849-854.
14. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Prognozirovanie resursa kabel'nykh liniy s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neyronnykh setey [Forecasting the resource of cable lines using the method of artificial neural networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (205), pp. 51-62.
15. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhov V.Kh. Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Evaluation and forecasting of insulating materials of power cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 230-237.
16. Poluyanovich N.K., Shurykin A.A., Dubyago M.N. Evaluation of the Cable Line Resource from the Aging Degree of Its Insulating Material, *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021*, 2021, pp. 1165-1169.
17. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Analiz i vybor metodiki v reshenii zadach intellektualizatsii sistem prognozirovaniya termofluktatsionnykh protsessov v kabel'nykh setyakh [Analysis and choice of methodology in solving the problems of intellectualization of forecasting systems of thermal fluctuation processes in cable networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 52-66.
18. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Azarov N.V., Ogrenichev A.V. Neyrosetevoy metod v zadachakh prognozirovaniya elektropotrebleniya v elektroenergeticheskoy sisteme [Neural network method in the tasks of forecasting electricity consumption in the electric power system], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2022, No. 1, pp. 114-118.
19. Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M. Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp. 619-626.
20. Anders G.J. Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11.
21. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Burkov D.V. Neyrosetevaya mnogoetapnaya sistema prognozirovaniya resursa silovoy kabel'noy linii [Neural network multi-stage system for predicting the power cable line resource], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2021, No. 11, pp. 20-26.

22. Poluyanovich N., Azarov N., Dubyago M. Neural network method for monitoring thermofluctuation processes in cable lines taking into account the interference influence, *Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021*, 2021, pp. 455-459.
23. Polyakov D.A. Monitoring ostatochnogo resursa izolyatsii kabel'nykh liniy 6(10) kV iz sshitogo polietilena: diss. ... kanl. tekhn. nauk [Monitoring of the residual insulation life of 6(10) kV cable lines made of cross-linked polyethylene: cand. of eng. sc. diss.]. Omsk, 2017, 148 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Бурьков Дмитрий Владимирович – e-mail: bdv-76@yandex.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; доцент.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; ст. преподаватель.

Качелаяев Олег Вадимович – e-mail: 22.olezhka@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; магистрант.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Burkov Dmitry Vladimirovich – e-mail: bdv-76@yandex.ru; phone: +79281758225; the department of electric technics and mechatronics; associate professor.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; senior lecturer.

Kachelaev Oleg Vadimovich – e-mail: 22.olezhka@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; undergraduate.

УДК 621.396.674

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-266-274

И.А. Алшмайсаве

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ВНУТРЕННЯЯ ВСЕНАПРАВЛЕННАЯ АНТЕННА 2 × 2 МИМО ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ 2G, 3G, 4G И 5G

Многочастотные и широкополосные системы связи превратились в популярную тему исследований в результате растущего спроса на высокоскоростную передачу данных и сосуществования нескольких типов сетей связи. Диаграмма направленности всенаправленных антенн обеспечивает эффективную передачу и прием от мобильного объекта, что делает их удобными для ряда устройств беспроводной связи, а также способными работать с дополнительными отдельными полосами частот. Внедрение широкополосной антенны может быть важно для систем мобильной связи, поддерживающих 2G, 3G, 4G и будущие приложения 5G. Были опубликованы многочисленные исследования широкополосных антенн 5G, поскольку сеть 5G обеспечивает большую пропускную способность данных, большую надежность и меньшее энергопотребление для своей обширной пользовательской базы. Технология МИМО превратилась в ключевую технологию для приложений 5G благодаря преимуществам, включающим увеличение пропускной способности канала, повышение производительности передачи и приема сигналов, установку больших антенн в небольшом пространстве и многое другое. Недавно было предложено несколько разновидностей антенн 5G МИМО для смартфонов. В этом исследовании предлагается широкополосная антенна 2 × 2 МИМО для внутренних систем связи GSM/3G/LTE/5G. Данная антенна создает всенаправленные диаграммы направленности за счет использования двух ан-

тенных элементов, равномерно разнесенных вокруг центра. Одновременно достигается большая полоса пропускания и хорошие характеристики всенаправленного излучения. По результатам моделирования усиление до 7,5 дБ может быть использовано для получения полосы импеданса (0,7-7) ГГц с обратными потерями до -22 дБ. Антенна смоделирована в ANSYS HFSS (high frequency structure simulator) 2020.

Антенна MIMO; всенаправленная; сверхширокополосная.

I.A. Alshimaysawe

ULTRA WIDEBAND INDOOR OMNI-DIRECTIONAL 2×2 MIMO ANTENNA FOR 2G, 3G, 4G, AND 5G APPLICATIONS

Multi-frequency and wideband communication systems have developed into a popular research topic as a result of the rising demand for high-speed data transfer and the coexistence of several types of communication networks. The radiation pattern of Omni-directional antennas allows for effective transmission and reception from a mobile unit, making them handy for a number of wireless communication devices as well as capable of handling additional distinct frequency bands. Implementing a wide bandwidth antenna, however, might be important for mobile communication systems supporting 2G, 3G, 4G, and upcoming 5G applications. Numerous studies on 5G wideband antennas were published because the 5G network allows for larger data throughput, greater robustness, and lower power consumption for its vast user base. The MIMO technology has developed into a key technology for 5G applications because of the benefits include increasing channel capacity, boosting the performances of transmitting and receiving signals, fitting large antennas into a small space, and more. Recently, several varieties of 5G MIMO antennas for smartphones were proposed. This research proposes a wideband 2×2 MIMO antenna for indoor GSM/3G/LTE/5G communication systems. The antenna in use produces Omni-directional radiation patterns by employing two antenna elements that are evenly spaced out around the center. Concurrently, a large bandwidth and good omnidirectional radiation performance are attained. According to simulation results, a gain of up to 7.5 dB can be used to obtain an impedance bandwidth of (0.7-7) GHz with return losses as high as -22. The antenna is simulated by ANSYS HFSS (high frequency structure simulator) 2020.

MIMO antenna; omni-directional; ultra wideband.

I. Introduction. As telecommunication vendors look to provide 5G mobile communication systems in the world, base station and mobile antennas must to evolve to fulfil the new sub-6 GHz 5G frequency bands as well to the existing 2G, 3G and 4G bands (0.7-0.96 GHz and 1.7-2.7 GHz) [1]. THE fifth-generation (5G) communication technology can offer various benefits over the present 4G system, including a greater transmission rate and reduced latency [2–4]. It has been shown that a multiple-input, multiple-output (MIMO) antenna system should be used for 5G operations below 6GHz in order to achieve a greater transmission rate [5–13]. Several 5G MIMO antennas for smartphones have recently been proposed [14–17]. The European Commission (EC) unveiled its spectrum strategy for 5G testing in 2016, including the bands between 3.4 and 3.8 GHz. China's Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) formally declared in 2017 that the 3.3-3.4 (indoor only), 3.4-3.6, and 4.8-5 GHz bands are set aside for 5G services [18]. A single antenna element covering the desired frequency bands is preferable than several antennas for multiple bands for indoor base stations where there is a limited amount of room for installing antennas [1]. Numerous efforts have been made to meet the 2G, 3G, 4G, and 5G applications using a single antenna that covers the frequency bands from 0.7 to 0.96 GHz and from 1.7 to 2.7 GHz [1]. In [19], dipole and patch antennas were utilized to compare performance with the proposed 2×2 MIMO antenna, a wide-band multiple-input multiple-output (MIMO) antenna with dual-band (2.4 and 5 GHz) operation was proposed for premium indoor access points (IAPs). In [20], the description of a technique for integrating dual-band frequencies into a single

layer board with wide bandwidth. In this study, a dual-band printed dipole antenna is created by combining rectangular and two "L"-shaped radiating elements, which are embedded on a single layer structure that is relatively small. The printed dipole antenna, which covers the frequencies of 2400–2500 MHz and 4900–5875 MHz, can fully support two IEEE WLAN standards. In [21], achieved a novel omni-directional antenna with wideband and low cross-polarization for GSM1800/3G/LTE/5G indoor communication systems. The proposed antenna achieves the omni-directional radiation patterns by using printed log-periodical antenna elements that are evenly distributed around the center. Additionally, a wide bandwidth and strong omnidirectional radiation performance are accomplished concurrently between 1.7 and 3.8 GHz with a gain of roughly 1.5 dBi across the entire operating frequency thanks to the cooperation of the log-periodical antenna and annular parasitic patches. In [22], the proposed antenna consists of three radiators above a ground plane, a monopole made up of three patches fed by a coaxial line, a coupling patch above the monopole with three shorting legs to increase the lowest operating frequencies, and a top-loading disk on top of the coupling patch to further reduce the lowest operating frequencies. From 650 MHz to 6 GHz, an improved impedance bandwidth of 9.23:1 was attained with $S_{11} < -13.9$ dB (for SWR 1.5). In [23], a technique for creating a small, horizontally polarized, dual-band omnidirectional antenna was presented; it combines an electrically compact upper-band Alford loop antenna with a lower-band omnidirectional loop antenna on a single substrate. To reduce the gain variation in the azimuthal plane, a method for effectively extending the Alford loop's bandwidth was developed, the electrically small loop is fed by four symmetrical radial strips extended from a circular patch, for demonstration, the electrically small loop and Alford loop were created for the 2.4- and 5-GHz Wi-Fi bands. It covers the Wi-Fi bands of 2.4-2.5 GHz and 5.1-5.9 GHz. In [1], two orthogonal dipole antennas make up the antenna used to achieve dual polarization. Three different radiator types—elliptical dipoles, bowtie dipoles, and cat-ear-shaped arms for various bands—make up each dipole. The suggested antenna provides three broad bands with individually controllable fractional bandwidths of 31.3% (0.7-0.96 GHz), 55.3% (1.7-3 GHz), and 14% (3.3-3.8 GHz). In [24], this submission demonstrated a brand-new 3-D circular conformal MIMO antenna system made up of three MED antennas. In order to achieve the dual band radiation, the single MED element was carefully designed to include one main (lower-band) dipole and two auxiliary (upper-band) dipoles. The MED element displays an impedance bandwidth of 54.2% (1.68 GHz-2.93 GHz) with a stable gain of 6.05 ± 1.15 dBi in the lower band and 9.2% (3.32 GHz-3.64 GHz) with 5.71 ± 0.7 dBi in the upper band, respectively.

In this paper, an antenna designed in [25] is developed, operating at frequencies (698-960) MHz and (1710-2700) MHz with a gain of 3 and 4, respectively, and having a VSWR value of ≤ 2.0 for the lower frequency band and ≤ 1.8 for the upper frequency band. Typical 2×2 MIMO antennas that are omnidirectional radiation pattern were developed by changing the material type for rods No.1 and 2 in Figure No.1 from aluminum metal to plastic, the results showed that a third band (2.8-3.8) GHz, and can be used for fifth generation applications, and the antenna has become more efficient. The antenna consisted of a range (0.7-7 GHz) and gain up to 7.5 dB. The frequency covers the entire WLAN frequency band (IEEE 802.11b/g and 802.11a/j) and the antenna has sufficient gain and beam coverage to apply to a premium access point, requiring the antenna to operate in the entire WLAN frequency band. a broadband antenna may make sense for mobile communication systems serving 2G, 3G, 4G and new 5G applications. It differs from the aforementioned antennas by its wide bandwidth and low return loss in addition to high gain, which makes it suitable for use in many areas and for all generations of communication systems (2-5G).

II. The proposed antenna design. The structure of the circular shape 2×2 MIMO antenna is intended for 0.8 GHz to 5.2 GHz and 0.7 GHz to 7 GHz, as illustrated in figures 1 & 2 respectively. The antenna's ground is aluminum has diameter = 213mm and thickness 1.5mm, also it consist of two active wings and two passive wings made of copper and four rods made of plastic and six rod made of aluminum. The size of the antenna as simulated in ANSYS HFSS 2020 as shown in fig. 1 and 2.

In figure 1 we have replaced the two metal rods in [25] with two plastic rods and this is the modification we have made to the shape of the antenna we proposed to develop, in fig. 2 we have added a dielectric (box) made of materials with a relative permittivity ranging from 1 to 9, and analyzed the effect on the parameters of the antennas. The best results were obtained with the values $\epsilon = 2$ and $\epsilon = 4$.

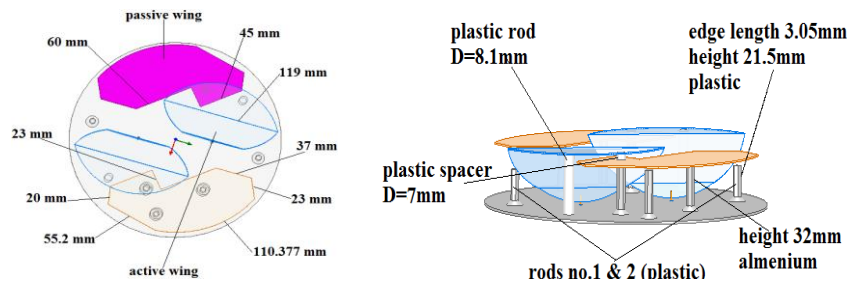


Fig. 1. MIMO 2×2 antenna Circular shape

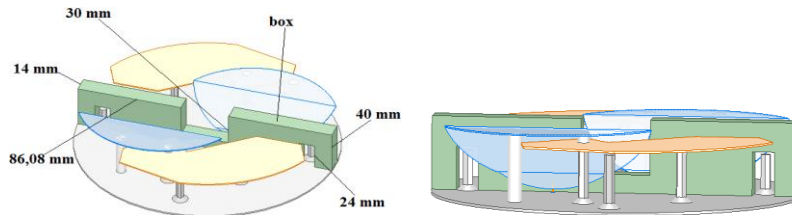


Fig. 2. MIMO 2×2 antenna Circular shape with box in the center

III. Results and discussions. The ANSYS HFSS Version 2020 software was used to design the proposed antenna. In this design of the proposed antenna in fig. 1, the results of each were obtained S11, VSWR, Radiation Intensity, Gain, Realized Gain for an ultra-wide band (0.8-5.2) GHz, whereas minimum value for S11 is -22 in 1.92 GHz, the best value for VSWR 1.16 in 1.92 and maximum value for the Gain is 6.4 dB in 4 GHz, as shown in figures (3-7). Blue dashed curves show the characteristics of the original antenna [25], and solid red curves show the characteristics of the antenna after modification of the type of rods 1 and 2 for plastic, as in fig. 1, where the proposed antenna differed in obtaining the third range (2.8–3.8) GHz, which allows it to be used for 5G applications and with greater efficiency than its predecessor.

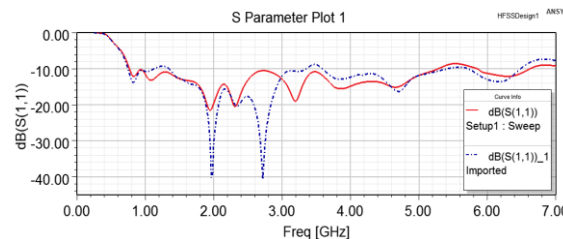


Fig. 3. Return Loss (S11)

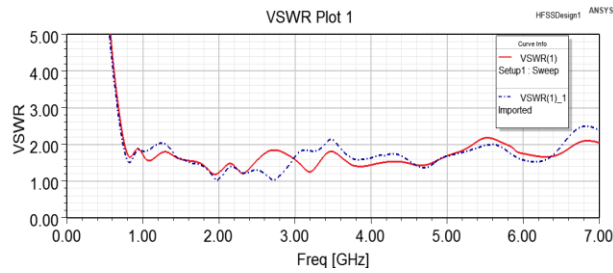


Fig. 4. The VSWR Simulated Results

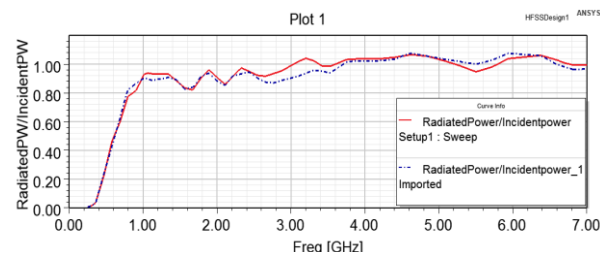


Fig. 5. The Radiated Power / Incident Power vs. Frequency

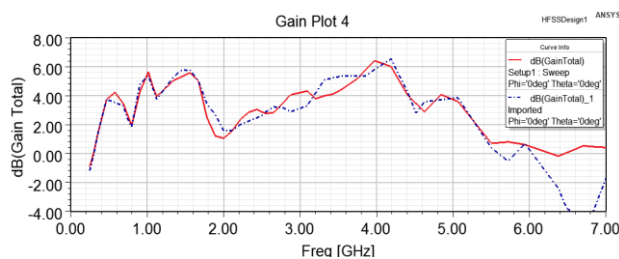


Fig. 6. The Gain vs. Frequency

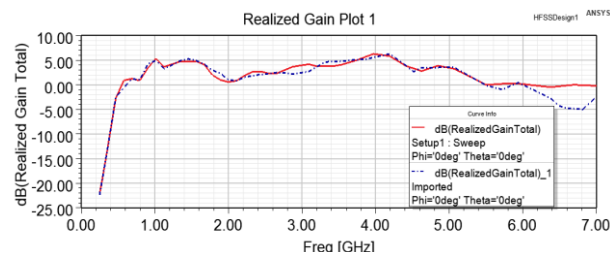


Fig. 7. The Realized Gain vs. Frequency

When laying dielectric part (box) with material have relative permittivity equal to 2 as in fig. 2 will get the results as shown in fig. (8-12), where obtained S11, VSWR, Radiation Intensity, Gain, Realized Gain for an ultra-wide band (0.77-5 & 5.9-7) GHz, whereas minimum value for s11 is -21 in 2.24 GHz, the best value for VSWR 1.2 in 2.24 and maximum value for the Gain is 5.9 dB in 0.95 GHz. red dashed curves show the characteristics of the antenna in fig. 1, and solid green curves show the characteristics of the antenna after adding dielectric part, as in fig. 2.

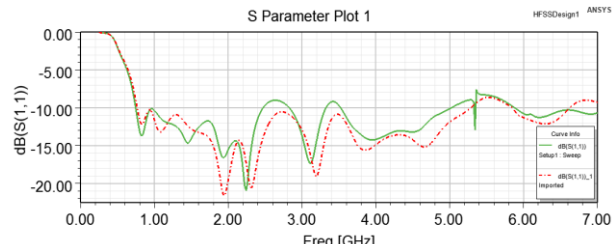


Fig. 8. Return Loss (S11)

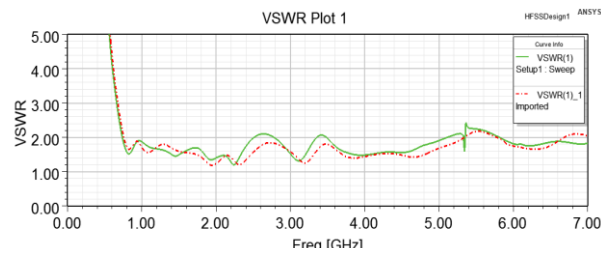


Fig. 9. The VSWR Simulated Results

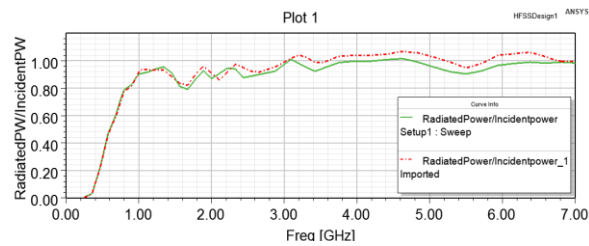


Fig. 10. The Radiated Power / Incident Power vs. Frequency

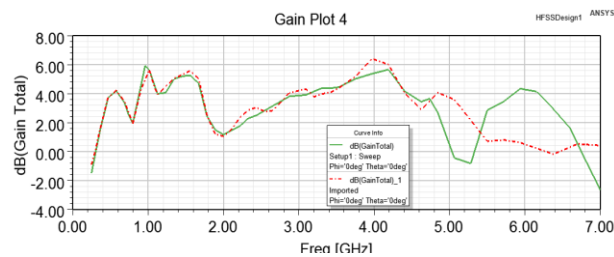


Fig. 11. The Gain vs. Frequency



Fig. 12. The Realized Gain vs. Frequency

When laying dielectric part with material have relative permittivity equal to 4 as in fig. 2 will get the results as shown as shown in fig. (13-17), where obtained S11, VSWR, Radiation Intensity, Gain, Realized Gain for an ultra-wide band (0.7-0.91 & 1.1-1.5 & 1.8-2.3 & 2.75-6.3) GHz, whereas minimum value for s11 is -15.5 in (0.8 & 1.3) GHz, the best value for VSWR 1.4 in 0.8 & 1.3 and maximum value for the Gain is 7.5 dB in 4.4 GHz. red dashed curves show the characteristics of the antenna in fig. 1, and solid green curves show the characteristics of the antenna after adding dielectric part, as in fig. 2.

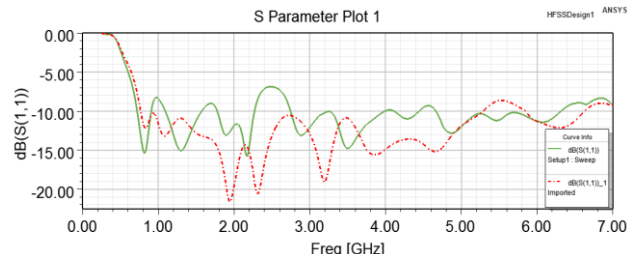


Fig. 13. Return Loss (S11)

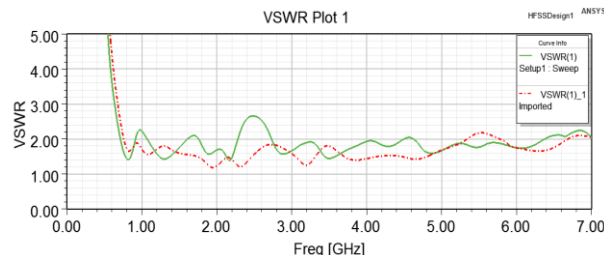


Fig. 14. The VSWR Simulated Results

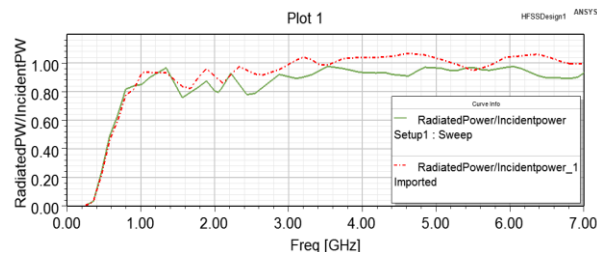


Fig. 15. The Radiated Power / Incident Power vs. Frequency



Fig. 16. The Gain vs. Frequency

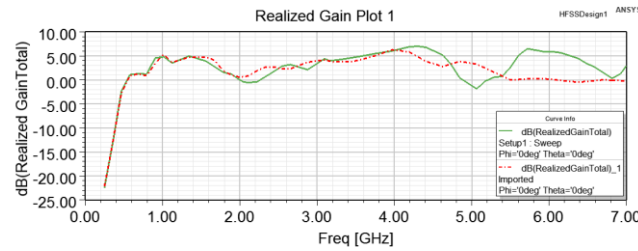


Fig. 17. The Realized Gain vs. Frequency

In comparison between results for the antenna without dielectric part (box) and the antennas with box in the two cases of material of the box, observe that the best values of S11 & VSWR for frequencies (0.7-0.91) GHz, (1.1-1.5) GHz & (4.7-6) GHz in case of material with relative permittivity(ϵ) equal to 4, while for frequency (6-7) GHz is best in case of material with relative permittivity(ϵ) equal to 2 & all other frequencies in band (0.8-5.2) GHz get the best in case of the antenna without box. The higher value of Gain in frequencies (5.7, 4.4, 1.1) GHz in $\epsilon = 4$, 0.95GHz in $\epsilon = 2$ and (1.6, 5.1, 2.2) GHz in the antenna without box.

According to the results obtained, we can choose the appropriate shape for the antenna and use the required permittivity of the added box in the manufacture of the antenna according to the important part of the frequency that we want to use for the fifth generation applications, where the antenna in Figure No. (1) is suitable for specific applications, while it is in figure No. (2) with permittivity ($\epsilon = 2$) and ($\epsilon = 4$), it is suitable for other applications, according to the results above.

Conclusions. The demand for antennas that can function across a broad spectrum of frequencies has increased as a result of the quick development of wireless technology and personal communications, making them more desirable for a number of applications and compatible with both current and future communication generations. In this paper, designed a wide-band MIMO antenna with an omnidirectional radiation pattern. The 2×2 MIMO antenna with Circular shape produced ultra-wide band frequencies (0.7-7GHz) with gain up to 7.5 dB and return losses getting close to -22, can be used in multiple applications and for all generations of mobile communication (2G, 3G, 4G and 5G applications), all classes WLAN and next new applications.

REFERENCES

1. Ahmed Alieldin, et al. A Triple-Band Dual-Polarized Indoor Base Station Antenna for 2G, 3G, 4G and Sub-6 GHz 5G Applications, *IEEE Access*, September 2018, Vol. 6, No. 2.
2. Andrews J.G., et al. What will 5G be?, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Jun. 2014, Vol. 32, No. 6, pp. 1065-1082.
3. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., and Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. Wiley, New York, 2010.
4. Anping Zhao, and Zhouyou Ren. Size Reduction of Self-Isolated MIMO Antenna System for 5G Mobile Phone Applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. November 2018.
5. Ai-Hadi A.A., Iivonen J., Valkonen R., and Viikari V. Eight-element antenna array for diversity and MIMO mobile terminal in LTE 3500 band, *Microwave and Optical Technol. Lett.*, June 2014, Vol. 56, pp. 1323-1327.
6. Wong K.-L., Lu J.Y., Chen L.Y., Li W.-Y., and Ban Y.L. "8-antenna and 16-antenna arrays using the quad-antenna linear array as a building block for the 3.5GHz LTE MIMO operation in the smartphone, *Microwave and Optical Technol. Lett.*, Jan. 2016, Vol. 58, pp. 174-181.
7. Qin Z., Geyi W., Zhang M., and Wang J. Printed eight-element MIMO system for compact and thin 5G mobile handset, *Electron. Lett.*, March 2016, Vol. 52, pp. 416-418.

8. Ban Y.L., Li C., Sim C.Y.D., Wu G., and Wong K.-L. 4G/5G multiple antennas for future multi-mode smartphone applications, *IEEE Access*, July 2016, Vol. 4, pp. 2981-2988.
9. Li M.Y., Ban Y.L., Xu Z.Q., Wu G., Sim C., Kang K., and Yu Z.F. Eight-port orthogonally dual-polarized antenna array for 5G smartphone applications, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Jun. 2016, Vol. 64, pp. 3820-3830.
10. Wong K.-L., Tsai C.-Y., and Lu J.-Y. Two asymmetrically mirrored gap-coupled loop antennas as a compact building block for eight antenna MIMO array in the future smartphone, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Apr. 2017, Vol. 65, pp. 1765-1778.
11. Xu H., Zhou H., Gao S., Wang H., and Cheng Y. Multimode decoupling technique with independent tuning characteristic for mobile terminals, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 65, pp. 6739-6751, Dec. 2017.
12. Li Y., Sim C.-Y.-D., Luo Y. and Yang G. 12-port 5G massive MIMO antenna array in sub-6GHz mobile handset for LTE bands 42/43/46 applications, *IEEE Access*, Feb. 2018, Vol. 6, pp. 344-354.
13. Li Y., Sim C.-Y.-D., Luo Y. and Yang G. Multiband 10-antenna array for sub-6 GHz MIMO applications in 5-G smartphones, *IEEE Access*, June 2018, Vol. 6, pp. 28041-28253.
14. Ban Y.L., Chen Z.X., Chen Z., Kang K., and Li J.L.W. Decoupled closely spaced heptaband antenna array for wwan/lte smartphone applications, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2014, Vol. 13, pp. 31-34.
15. Li M.Y., Ban Y.L., Xu Z.Q., Wu G., Sim C.Y.D., Kang K., and Yu Z.F. Eight-port orthogonally dual-polarized antenna array for 5g smartphone applications, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Sept 2016, Vol. 64, No. 9, pp. 3820-3830.
16. Ban Y.L., Li C., Sim C.Y.D., Wu G., and Wong K.L. 4g/5g multiple antennas for future multi-mode smartphone applications, *IEEE Access*. 2016, Vol. 4, pp. 2981-2988.
17. Li Y., Sim C.-Y.D., Luo Y., and Yang G. 12-port 5G massive MIMO antenna array in sub-6GHz mobile handset for LTE bands 42/43/46 applications, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 344-354.
18. Wu Q., Liang P., and Chen X. 'A broadband $\pm 45^\circ$ dual-polarized multiple-input multiple-output antenna for 5G base stations with extra decoupling elements, *J. Commun. Inf. Netw.*, Mar. 2018, Vol. 3, No. 1, pp. 31-37.
19. Insu Yeom, Young Bae Jung and Chang Won Jung. Wide and Dual-Band MIMO Antenna with Omnidirectional and Directional Radiation Patterns for Indoor Access Points, *Journal of electromagnetic engineering and science*, Jan. 2019, Vol. 19, No. 1, pp. 20-30.
20. Tze-Meng O. and Geok T.K. Dual-band omni-directional microstrip antenna, *Progress In Electromagnetics Research*, July. 2010, Vol. 106, pp. 363-376.
21. Li Liangying, Yan Wei, Feng Botao and Deng Li. A Wideband Omni-directional Antenna Based on Printed Log-Periodic Element, *IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology*, November 2020, pp. 13-15.
22. Zhou Lei, Jiao Yongchang, Qi Yihong, Weng Zibin, and Lu Liang. Wideband Ceiling-Mount Omnidirectional Antenna for Indoor Distributed Antenna Systems, *IEEE antennas and wireless propagation letters*, April 2014, Vol. 13, pp. 836-839.
23. Hu Peng Fei, Leung Kwok Wa, Pan Yong Mei, and Zheng Shao Yong. Electrically Small, Planar, Horizontally Polarized Dual-band Omnidirectional Antenna and its Application in a MIMO System, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, June 2021.
24. Botao Feng, Kwok L. Chung, Jiexin Lai, and Qingsheng Zeng. A Conformal Magneto-Electric Dipole Antenna with Wide H-Plane and Band-Notch Radiation Characteristics for MIMO Base-Station, *IEEE Access*, 2019.
25. Available at: <https://www.tongyucom.com/upload/goods/20220505/2022050512326497.pdf>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Алшимайсаве Ихсан Абдлкарем – Инженерно-технический колледж; e-mail: ihsan.abdulkarem@gmail.com; г. Наджаф, Ирак; тел.: +79957566781; аспирант ЮФУ.

Alshimaysawe Ihsan Abdlkarem – Engineering Technical College; e-mail: ihsan.abdulkarem@gmail.com; Najaf, Iraq; phone: +79957566781; postgraduate student of SFedU

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылки на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.