



№2-2023

ISSN 1999-9429

# ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Системы управления и моделирование
- Электроника, нанотехнологии и приборостроение
- Алгоритмы обработки информации

# 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

№ 2 (232). 2023 г.

---

**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); Бородянский 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.

**Ответственные за выпуск:** Клевцов С.И., Самойлов А.Н.

**Технический редактор** Ярошевич Н.В.

**Оригинал-макет выполнен** Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 29.05. 2023 г. Формат 70×108  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,2. Уч.-изд. л. – 19,7.

Заказ № 9047. 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](mailto: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. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<b>В.Г. Галалу, С.А. Киракосян, Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер, И.И. Турулин</b> СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ УСРЕДНЕНИЙ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ .....	6
<b>Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.А. Ганжур</b> ОПТИМИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ АДАПТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ РОЯ АГЕНТОВ .....	18
<b>Б.А. Ашабоков, В.Н. Лесев, Г.В. Куповых, В.А. Шаповалов, М.А. Шериева</b> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ.....	31
<b>Е.В. Павлов, А.Ю. Баранник, А.В. Лагутина, В.И. Ершов</b> ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МНОГОРЕЖИМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ В ЧС .....	42
<b>А.М. Грузликов</b> ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	53
<b>С.Е. Кондаков, К.С. Чудин, М.В. Болычев</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГРОЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ КАДРОВОГО ОРГАНА ПРЕДПРИЯТИЯ ОПК .....	67
<b>Ю.А. Брюхомицкий</b> ИММУНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛАВИАТУРНОГО МОНИТОРИНГА ОПЕРАТОРОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	80
<b>В.А. Деркачев, В.В. Бахчевников, А.Н. Бакуменко</b> КЛАССИФИКАТОР БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА.....	90
<b>Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, Г.В. Куповых, А.А. Ташилова, М.Б. Ашабокова</b> МЕТОД СНИЖЕНИЯ РИСКОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ВСЛЕДСТВИЕ ГРАДОБИТИЙ .....	100

### РАЗДЕЛ II. ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

<b>С.П. Малюков, В.Д. Мишнев</b> ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СПАЯ САПФИР – СТЕКЛОВИДНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК – КЕРАМИКА .....	111
<b>И.А. Алферова, Д.Д. Габриэльян, Б.Х. Кульбикаян, О.А. Сафарьян, Л.Н. Стажарова</b> ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОГО ШУМА В КАНАЛЕ СВЯЗИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БИТОВОЙ ОШИБКИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ КАМ СИГНАЛОВ .....	119
<b>П.Г. Грицаенко</b> ИНЖЕКЦИОННО-ПОЛЕВАЯ СТРУКТУРА, ВЫПОЛНЕННАЯ ДВОЙНОЙ ДИФФУЗИЕЙ ПРИМЕСЕЙ.....	128
<b>И.В. Пискулин</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РТК ВН В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО НАВЕДЕНИЯ .....	137

<b>Н.Н. Прокопенко, Д.В. Клейменкин, М.А. Сергеенко</b> СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ «ПЕРЕГНУТОГО» КАСКОДА .....	148
<b>В.В. Бахчевников, В.А. Деркачев, А.Н. Бакуменко</b> РЕАЛИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАННОГО ФИЛЬТРА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ НА ПЛИС.....	156
<b>И.В. Малышев, Н.В. Паршина, А.А. Охотникова</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЧАСТОТНО- ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ АВТОДИННОГО ТИПА .....	165
<b>РАЗДЕЛ III. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ</b>	
<b>Х.С. Аламир, Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян</b> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗАТОРОВ НА ДОРОГАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛИРУЕМОГО АЛГОРИТМА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА БАЗЕ АДАПТИВНОГО IOTN.....	175
<b>С.И. Родзин, А.В. Боженюк, Ю.А. Кравченко, О.Н. Родзина</b> МЕТОДЫ НЕЧЕТКОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ГРУППОВОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ.....	186
<b>Е.М. Герасименко, Д.Ю. Кравченко, Ю.А. Кравченко, Э.В. Кулиев</b> ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО МЕТОДА СТРУКТУРИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ.....	201
<b>Ф.С. Булыга, В.М. Курейчик</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЕКТОРИЗАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДААННЫХ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ .....	212
<b>Р.М. Ауси, Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян</b> ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ МЕТОДАМ ЗАЩИТЫ ОТ АТАК .....	227
<b>П.А. Воронин, А.М. Белевцев, С.С. Александрова</b> РАЗРАБОТКА ОБЩЕГО АЛГОРИТМА И СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРЕДПРИЯТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПРОФИЛЯ.....	240
<b>В.В. Альчаков, В.А. Крамарь</b> ОЦЕНКА МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЕЗОННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ .....	250
<b>А.Д. Ульев, Ю.А. Орлова, В.Л. Розалиев, А.Р. Донская</b> МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ СОТРУДНИКОВ И ПОКУПАТЕЛЕЙ ПО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЮ .....	263
<b>Х.Б. Штанчаев</b> НЕСТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ИЗ ТЕКСТА .....	273
<b>С.И. Родзин</b> СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БИОЭВРИСТИК: КЛАССИФИКАЦИЯ, БЕНЧМАРКИНГ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ .....	280



## CONTENT

### SECTION I. CONTROL SYSTEMS AND MODELING

<b>V.G. Galalu, S.A. Kirkosyan, Al-Karawi Hussein Sh. Mogheer, I.I. Turulin</b> COMPARATIVE EVALUATION OF AVERAGING METHODS FOR FILTERING MEASUREMENT SIGNALS.....	6
<b>B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, M.A. Ganzhur</b> OPTIMIZATION BASED ON COMBINING MODELS OF ADAPTIVE BEHAVIOR OF A SWARM OF AGENTS .....	18
<b>B.A. Ashabokov, V.N. Lesev, G.V. Kupovyh, V.A. Shapovalov, M.A. Sherieva</b> NUMERICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF THE AEROSOL COMPOSITION OF THE ATMOSPHERE ON THE FORMATION OF MACRO- AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF CONVECTIVE CLOUDS .....	31
<b>E.V. Pavlov, A.Yu. Barannik, A.V. Lagutina, V.I. Ershov</b> TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF APPLICATION OF ROBOTIC COMPLEX OF MULTI-MODE FIRE EXTINGUISHING IN EMERGENCIES.....	42
<b>A.M. Gruzlikov</b> CONTROL OF COMPUTING AND DIAGNOSTICS OF SOFTWARE FOR ON-BOARD COMPUTERS OF ROBOTIC COMPLEXES .....	54
<b>S.E. Kondakov, C.S. Chudin, M.V. Bolichev</b> MATHEMATICAL MODEL OF EMERGENCY SAFETY OPK.....	67
<b>Yu.A. Bryuhomitsky</b> IMMUNOLOGICAL MODEL OF KEYBOARD MONITORING OF INFORMATION SYSTEM OPERATORS .....	81
<b>V.A. Derkachev, V.V. Bakhchevnikov, A.N. Bakumenko</b> MULTI-ROTOR UAV CLASSIFIER .....	90
<b>B.A. Ashabokov, L.M. Fedchenko, G.V. Kupovykh, A.A. Tashilova, M.B. Ashabokova</b> METHOD FOR REDUCING RISKS IN AGRICULTURE DUE TO HAILSTORMINGS.....	100

### SECTION II. ELECTRONICS, NANOTECHNOLOGY AND INSTRUMENTATION

<b>S.P. Malyukov, V.D. Mishnev</b> MANUFACTURING TECHNOLOGY OF PRESSURE SENSOR'S SENSITIVE ELEMENTS BASED ON "SAPPHIRE – VITERIOUS DIELECTRIC – CERAMIC" JUNCTION .....	111
<b>I.A. Alferova, D.D. Gabrielyan, B.H. Kulbikayan, O.A. Safaryan, L.N. Stazharova</b> INFLUENCE OF FREQUENCY NOISE IN A COMMUNICATION CHANNEL ON THE PROBABILITY OF A BIT ERROR DURING TRANSMISSION OF SIGNALS.....	120
<b>P.G. Gritsaenko</b> INJECTION-FIELD STRUCTURE MADE BY DOUBLE DIFFUSION OF IMPURITIES .....	129
<b>I.V. Piskulin</b> INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF MODELS OF THE TRACKING SYSTEM OF THE RTK VN MOTION CONTROL IN THE AUTONOMOUS GUIDANCE MODE .....	138

<b>N.N. Prokopenko, D.V. Kleimenkin, M.A. Sergeenko</b> CIRCUITRY METHODS FOR INCREASING THE SPEED OF OPERATIONAL AMPLIFIERS BASED ON A "FOLDED" CASCODE.....	149
<b>V.V. Bakhchevnikov, V.A. Derkachev, A.N. Bakumenko</b> IMPLEMENTATION OF A MATCHED FILTER IN THE FREQUENCY DOMAIN ON FPGA.....	157
<b>I.V. Malyshev, N.V. Parshina, A.A. Okhotnikova</b> APPLICATION OF ORTHOGONAL ORIENTED STRONG ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS TO CREATE FREQUENCY-CONVERTING DEVICES OF AUTODYNE TYPE .....	166
<b>SECTION III. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS</b>	
<b>H.S. Alamir, E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan</b> INTELLIGENT TRAFFIC CONGESTION CONTROL SYSTEM USING A CONTROLLED MACHINE LEARNING ALGORITHM ON ADAPTIVE IOTN ....	175
<b>S.I. Rodzin, A.V. Bozhenyuk, Y.A Kravchenko, O.N. Rodzina</b> METHODS OF FUZZY MULTICRITERIA GROUP DECISION-MAKING FOR EVACUATION TASKS IN EMERGENCY SITUATIONS .....	187
<b>E.M. Gerasimenko, D.Yu. Kravchenko, Yu.A. Kravchenko, E.V. Kuliev</b> DECISION SUPPORT FOR PREVENTION AND ELIMINATION OF THE EMERGENCIES' CONSEQUENCES BASED ON THE INFORMATION STRUCTURING FUZZY METHOD .....	201
<b>F.S. Bulyga, V.M. Kureichik</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF VECTORIZATION OF HIGH DIMENSIONAL TEXT DATA .....	213
<b>R.M. Ausi, E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan</b> DEEP TRAINING IN METHODS OF PROTECTION AGAINST ATTACKS .....	227
<b>P.A. Voronin, A.M. Belevtsev, S.S. Aleksandrova</b> DEVELOPMENT OF A GENERAL ALGORITHM AND STRUCTURE OF AUTOMATED SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT FOR A RADAR PROFILE ENTERPRISE.....	240
<b>V.V. Alchakov, V.A. Kramar</b> THE MACHINE LEARNING TECHNIQUE FOR FORECASTING THE SEASONAL TIME SERIES .....	251
<b>A.D. Ulyev, Yu.A. Orlova, V.L. Rozaliev, A.R. Donskaia</b> METHODS AND MEANS OF TRACKING THE MOVEMENT AND INTERACTION OF EMPLOYEES AND CUSTOMERS BY VIDEO IMAGE ...	264
<b>Kh.B. Shtanchaev</b> NON-STATISTICAL METHODS OF AUTOMATIC EXTRACTION OF CAUSAL RELATIONSHIPS FROM THE TEXT .....	273
<b>S.I. Rodzin</b> CURRENT STATE OF BIO HEURISTICS: CLASSIFICATION, BENCHMARKING, APPLICATION AREAS.....	281

## Раздел I. Системы управления и моделирование

УДК 681.325:621.317.743

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-6-18

**В.Г. Галалу, С.А. Киракосян, Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер,  
И.И. Турулин**

### **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ УСРЕДНЕНИЙ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ**

*Для повышения качества производимой продукции приходится совершенствовать все технологические процессы, что требует повышения точности всего измерительного тракта в целом. Для этого приходится тщательно анализировать систематические, случайные и флуктуационные погрешности в измерительном канале и принимать все меры для их уменьшения. Радикальным средством повышения точности проведенных измерений является цифровая фильтрация или усреднение промежуточных измерений (наблюдений) по определённым правилам. Целью работы является сравнительная оценка качества подавления близкой к реальной шумовой помехи при использовании восьми наиболее известных методов усреднения. Предложены модель измерительного тракта и общая структурная схема моделирования процесса измерения на ЭВМ при воздействии случайной помехи для восьми алгоритмов усреднения. В качестве критерия оценки качества метода усреднения приняты отношения дисперсий абсолютных погрешностей и средних квадратических отклонений до вычислительного устройства и после применения заданного алгоритма усреднения. По результатам моделирования сделаны следующие выводы. 1. Все алгоритмы усреднения обеспечивают подавление случайных составляющих погрешности сложной помехи до уровня 40–60 дБ. Лучшими являются три алгоритма: среднее арифметическое AP, а-усечённое среднее AV5 и а-винзоризированное среднее AV5, которые предусматривают отбрасывание 5 % аномальных результатов. При увеличении числа наблюдений коэффициенты подавления пропорционально растут. 2. Время выборки должно быть кратно длительности периода сети переменного тока 50 Гц (20 мс). Оптимальное количество наблюдений (измерений) – 100–128, при 128 измерениях операция деления сводится к простому сдвигу, и результат усреднения может быть выдан через 1–2 мкс. 3. При экспериментальном применении метода усреднения AP для фильтрации сильно зашумленного измерительного сигнала в линии связи длиной 800 м наблюдалось снижение разброса выходных кодов АЦП с  $\pm 3,5\%$  до  $\pm 0,1\%$  после фильтрации (AP, 64 измерения за 40 мс).*

*Шумы; помехи; дисперсия; усреднение; моделирование; коэффициент подавления; а-усечённое среднее.*

**V.G. Galalu, S.A. Kirkosyan, Al-Karawi Hussein Sh. Mogheer, I.I. Turulin**

### **COMPARATIVE EVALUATION OF AVERAGING METHODS FOR FILTERING MEASUREMENT SIGNALS**

*To improve the quality of manufactured products, it is necessary to improve all technological processes, which requires increasing the accuracy of the entire measuring path as a whole. For this it is necessary to carefully analyze systematic, random and fluctuating errors in the measurement channel and take all measures to reduce them. Digital filtering or averaging of intermediate measurements (observations) according to certain rules is a radical means of improving the accuracy of measurements performed. The aim of this work is to compare the quality of suppression of near-real noise interference using the eight most well-known averaging methods. A model*

of the measurement path and a general block diagram for modeling the measurement process on a computer under the influence of random interference are proposed for eight averaging algorithms. As a criterion for evaluating the quality of averaging methods, the ratios of absolute error variances and mean square deviations before the computing device and after applying the specified averaging algorithm are taken. Based on the simulation results, the following conclusions are made. 1. All averaging algorithms provide suppression of random error components of complex interference to the level of 40–60 dB. Three algorithms are the best: arithmetic mean AR, a-truncated mean AU5 and a-tenderized mean AB5, which provide for the suppression of 5 % of anomalous results. With an increase in the number of observations, the suppression coefficients increase proportionally. 2. The sampling time must be a multiple of the duration of the 50 Hz AC mains period (20 ms). The optimal number of observations (measurements) is 100–128; with 128 measurements, the division operation is reduced to a simple shift, and the averaging result can be obtained in 1–2  $\mu$ s. 3. When experimentally applying the AR averaging method for filtering a highly noisy measurement signal in a communication line with a length of 800 m, a decrease in the spread of ADC output codes was observed from  $\pm 3.5$  % to  $\pm 0.1$  % after filtering (AR, 64 measurements in 40 ms).

Noise; interference; variance; averaging; modeling; suppression coefficient; a-truncated mean.

**Введение.** Для обеспечения высокого качества производимой продукции требуется существенное повышение точности измеряемых процессов. Для уменьшения погрешностей измерения приходится детально анализировать весь канал измерения и принимать меры к снижению уровня систематических и случайных погрешностей. Структурная схема одного канала измерения представлена на рис. 1. Измеряемая физическая величина ФВ поступает на датчик Д и преобразуется в электрический сигнал. Полученный измерительный сигнал усиливается унифицирующим преобразователем УП и поступает в линию связи ЛС длиной 10–50 м. Далее сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП и преобразуется в цифровое значение. Вычислительное устройство ВУ обеспечивает требуемые вычислительные операции (фильтрацию, масштабирование, усреднение и т.д.).

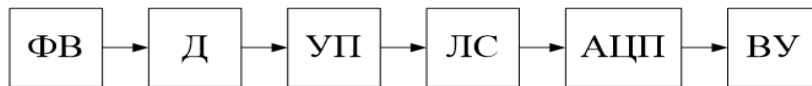


Рис. 1. Структурная схема одного измерительного тракта

Все измерительные блоки являются в той или иной степени и генераторами, и приёмниками аддитивных шумов и помех. Как правило, сама измеряемая физическая величина имеет вполне определённый уровень шумов и флуктуаций амплитудой 0,1–0,5% [1, 2]. Например, давление в магистральном газопроводе подвержено влиянию следующих факторов: изменение давления на входе и выходе газокomppressorной станции, изменение температуры и атмосферного давления окружающей среды, включение и выключение потребителей, сейсмические колебания почвы и т.д. Детальный анализ выходного давления показывает, что уровень шумов физического процесса в течение 100 с составляет 0,1–0,25% от номинального. Аналогичный пример можно представить для напряжения сети переменного тока, которое сильно зависит от количества подключённых потребителей, состояния атмосферы (дождь, снег, туман), атмосферных явлений, солнечной активности и т.д. Нестабильность напряжения в течение 100 с также составляет 0,1–0,25% от номинального [2, 3]. Датчик может обеспечить измерение физической величины с точностью, не превышающей пределов допустимой погрешности (например, 0,05–0,20%), что объясняется несовершенством механических элементов (нелинейность, гистерезис и старение элементов). Следует отметить, что все датчики

имеют вполне определённый уровень шумов, который составляет от 10% до 30% в классе точности датчика. Например, это явление характерно для термодпар, термометров сопротивления, тензорезисторов и т.д., где уровень собственных шумов измеряется десятками мкВ при выходном сигнале в 1–10 мВ [1, 3]. Основным приёмником электромагнитных помех является линия связи, амплитуда помех в которой может составлять 0,1–5% от диапазона измерения АЦП. Детальный анализ помех на входах АЦП показал, что в измеряемом сигнале преобладают периодические помехи с частотой питающей сети (50 Гц, 60 Гц, 400 Гц), нормальный шум и импульсные помехи с нормальным (или близким к нормальному) законом распределения амплитуд. При увеличении времени наблюдения закон распределения импульсных помех приближается к логарифмически-нормальному [2, 3]. Причём, в течение суток, в зависимости от типа применяемого оборудования, может наблюдаться от 100 до 1000 импульсных помех, амплитуда которых превышает 10 В. Это приводит, в лучшем случае к появлению аномальных результатов в полученных данных, а в худшем случае к выходу из строя входных каскадов АЦП [3].

Класс точности каждого датчика определяется предельным значением допускаемой приведённой погрешности (например,  $\pm 0,1\%$ ,  $\pm 0,2\%$ ,  $\pm 0,5\%$ ). Эти пределы определяются в основном систематическими погрешностями, но всегда имеется зона случайных погрешностей, которая может составлять 10–20% от класса точности. Таким образом, измеряемая величина может быть представлена в следующем виде:

$$a(t) = A(t) + \xi_1(t) + \xi_2(t),$$

где  $a(t)$  – измеренное значение физической величины,

$A(t)$  – действительное значение,

$\xi_1(t)$  – суммарное значение флуктуационных шумов,

$\xi_2(t)$  – суммарное значение помех, наводимых в линии связи в момент измерения.

Одним из методов повышения точности полученных оценок значений физической величины является усреднение результатов, позволяющее существенно снизить влияние случайных и систематических составляющих погрешности. Для этого необходимо производить достаточно большое количество измерений (от 20 до 200) и проводить усреднение по определённым правилам. В связи с тем, что аналитические методы анализа эффективности таких алгоритмов усреднения достаточно сложны, было решено провести моделирование процессов усреднения на ЭВМ. Из всего многообразия методов усреднений из теории вероятностей и математической статистики были выбраны 8 методов, которые представлены в табл. 1. Здесь  $A$  – действительное значение измеряемой величины,  $a$  – результат одного измерения,  $N$  – количество измерений за период накопления данных,  $\bar{a}$  – оценка меры центральной тенденции результатов измерений,  $k$  – параметр усечения для  $M$ -оценок (%) [4–6].

Три вида усреднений (арифметическое, геометрическое и гармоническое) известны ещё со времен Древней Греции. Остальные методы пришли к нам из мира теории вероятностей и математической статистики [7–9]. В табл. 1 представлены математические выражения, описывающие методы усреднения. Следует отметить, что 4 метода требуют выполнения операции предварительной сортировки полученных результатов для последующего отбрасывания аномальных результатов [10, 11]. Отбрасывание этих результатов относится к нелинейной фильтрации, сглаживание – к линейной [12–14]. Большой вклад в развитие математической статистики и соответствующих методов внесли Х. Крамер (H. Cramer) [14–16], Р. Фишер (R. Fisher) [17], Дж. Нейман (J. Neuman) [18], К. Пирсон (K. Pearson) [19].

Таблица 1

Методы усреднений

Метод	Описание
AP – Среднее арифметическое	$\bar{a}_{AP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i$
ГЕ – Среднее геометрическое	$\bar{a}_{ГЕ} = \left( \prod_{i=1}^N a_i \right)^{1/N}$
ГА – Среднее гармоническое	$\bar{a}_{ГА} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{a_i}}$
КВ – Среднеквадратическое	$\bar{a}_{КВ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N a_i^2}{N}}$
МЕ – Медиана	1) $\text{sort}(a_i) = a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N$ 2) $\bar{a}_{МЕ} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_{\frac{N}{2}} + a_{\frac{N}{2}+1}}{2} \end{array} \right\}$
МХЛ – Медиана Ходжеса-Лемана	1) $a_1^* = \frac{a_1 + a_2}{2}, a_2^* = \frac{a_3 + a_4}{2}, \dots, a_M^* = \frac{a_{N-1} + a_N}{2}$ 2) $\text{sort}(a_i^*)$ 3) $\bar{a}_{МХЛ} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_M^* + a_{M+1}^*}{2} \end{array} \right\}$
AY5 – $\alpha$ -усечённое среднее (5 %)	1) $\text{sort}(a_i) = a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N$ 2) $\bar{a}_{AYk} = \frac{1}{N - 2 \cdot k \cdot N} \cdot \sum_{i=k \cdot N+1}^{N-k \cdot N} a_i$
AY10 – $\alpha$ -усечённое среднее (10 %)	
AY15 – $\alpha$ -усечённое среднее (15 %)	
AB5 – $\alpha$ -винзорированное среднее (5 %)	1) $\text{sort}(a_i) = a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N$ 2) $\bar{a}_{ABk} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k \cdot N+1}^{N-k \cdot N} a_i + k \cdot N \cdot (a_{k \cdot N+1} + a_{N-k \cdot N-1})$
AB10 – $\alpha$ -винзорированное среднее (10 %)	
AB15 – $\alpha$ -винзорированное среднее (15 %)	

**Схема моделирования.** Для сравнения методов усреднений проведено моделирование на ЭВМ с использованием программ LabVIEW и Atmel Studio. На рис. 2 представлена структурная схема моделирования; цель моделирования – оценка подавления шумов, периодических и импульсных помех в измерительных линиях связи от датчиков до АЦП при использовании 8 методов усреднения. Основными элементами модели являются:

- ◆ генератор входных уровней (100–900 мВ); входные уровни выбраны таким образом, чтобы заданный входной уровень с наложенной помехой не выходил за диапазон измерения 0–1024 мВ, АЦП 16 двоичных разрядов, один квант 32 мкВ.
- ◆ генератор помех, в том числе генератор сетевой помехи 50 Гц (амплитуда первой гармоники  $U_{1Г}$ : 2 мВ, 5 мВ, 10 мВ), генератор нормального шума (СКО амплитуды шума,  $\sigma_{U_{ш}}$ : 0.5, 1, 2 мВ) и генератор импульсных помех (СКО амплитуды импульсной помехи,  $\sigma_{U_{имп.п}}$ : 5, 10, 20 мВ; вероятность попадания помехи в замер: 1, 10, 20%);
- ◆ сумматор входного уровня и помехи;
- ◆ блок выделения результатов измерений (АЦП);
- ◆ блок установки модели усреднений;
- ◆ блок накопления и усреднения (результатов измерений);
- ◆ блок выделения погрешностей;
- ◆ блок статистической обработки погрешностей.



Рис. 2. Схема моделирования подавления помех алгоритмическими методами

**Результаты моделирования.** После формирования входного сигнала с наложенными помехами, имитируя работу АЦП, накапливаются результаты  $N$  измерений (выборка из 20, 40, 60, 80 или 100 измерений). При этом было принято, что импульсные помехи не влияют на работу АЦП. Определяется среднее значение сигнала и его абсолютная погрешность преобразования для каждого выбранного метода усреднения. После многократного повторения процесса измерений, усреднений и вычитаний определяется среднее значение погрешности и её СКО ( $N_{повт} = 25000$ ). В качестве критерия эффективности принята величина коэффициента подавления  $K1$ , которая определяется как отношение дисперсии входного сигнала  $D1$  перед ВУ к дисперсии абсолютной погрешности  $D2$  после ВУ при заданном  $N_{повт}$ . Кроме того, для оценки подавления наложенных помех может использоваться и коэффициент  $K2$  – отношение суммы  $\Sigma1$  взятых по модулю помех, наложенных на основной сигнал, к сумме  $\Sigma2$  полученных после фильтрации абсолютных погрешностей, также взятых по модулю [9–11].

На рис. 3 представлена гистограмма накладываемой на сигнал суммарной помехи  $U_{1Г} = 5$  мВ,  $\sigma_{U_{ш}} = 1$  мВ,  $\sigma_{U_{имп.п}} = 10$  мВ перед АЦП. Седлообразная форма гистограммы на рис. 3 объясняется преобладанием гармонической помехи 50 Гц (амплитуда 5 мВ) над шумами и импульсной помехой. Кроме того, следует обратить внимание на частоту попадания в заданный интервал (более 25000 в интервал  $\pm 10$  мВ).

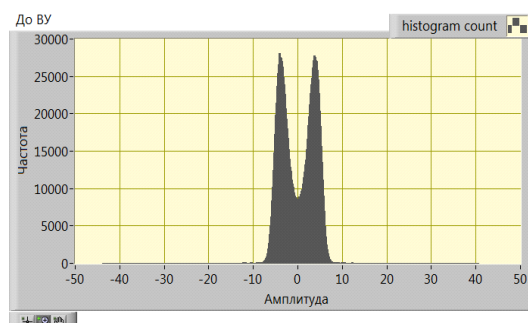


Рис. 3. Гистограмма наложенных помех

На рис. 4 представлена гистограмма абсолютной погрешности арифметического усреднения при  $N = 100$  после ( $N_{\text{повт}} = 25000$ ). Из представленной гистограммы видно, что СКО абсолютной погрешности после фильтрации (усреднения) не превышает 0,2 мВ, а частота попадания в интервал  $\pm 0,60$  мВ не превышает 150. Т.е. существенно уменьшилась и амплитуда помехи (в 20 раз), и частота сбоев (почти в 150 раз).

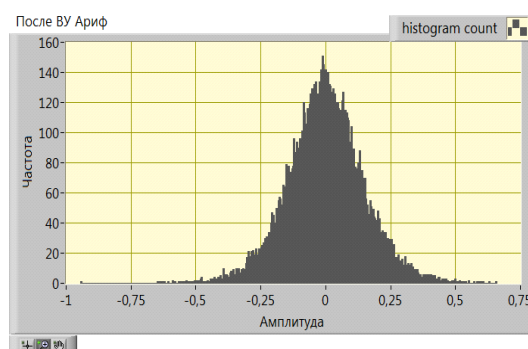


Рис. 4. Гистограмма абсолютной погрешности арифметического усреднения

В табл. 2 [20] представлены результаты моделирования в среде LabVIEW при разном заданном количестве измерений (от 20 до 100). Можно утверждать, что при увеличении количества наблюдений (измерений) коэффициенты подавления пропорционально растут для всех алгоритмов усреднения, и лучшими оказываются два алгоритма – АУ5 и АВ5, которые позволяют отбросить 5 % аномальных наблюдений и тем самым улучшить процесс усреднения при наличии импульсных помех. Коэффициенты подавления шумовой помехи достигают 60 дБ при количестве наблюдений  $N = 100$ . Медианные методы усреднений – МЕ и МХЛ оказались на порядок хуже по подавлению шумовой помехи. На рис. 5 и рис. 6 представлены полученные коэффициенты подавления для 8 методов усреднения графически, очевидны преимущества алгоритмов усреднения АУ5 и АВ5.

В табл. 3 [20] представлены средние абсолютные погрешности  $\Delta$  и средние квадратические отклонения  $\sigma$  абсолютных погрешностей при разном количестве наблюдений. Очевидно, что величина  $\Delta$  не очень информативна, так как представляет собой разность между суммами положительных и отрицательных погрешностей, то есть демонстрирует качество алгоритма усреднения. Тем не менее, можно утверждать, что все представленные алгоритмы при увеличении количества на-



блюдений показывают почти пропорциональное уменьшение средней абсолютной погрешности  $\Delta$ . Лучшими алгоритмами оказались AP, AY5, AB5, которые имеют абсолютную погрешность 1–2 мкВ.

Таблица 2

Коэффициенты подавления при разных  $N$ 

Метод	K1(D1/D2)					K2( $\Sigma 1/\Sigma 2$ )				
	$N$					$N$				
	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
AP	144	292	442	588	727	298	814	1481	2262	3096
ГА	143	290	439	583	721	292	784	1402	2099	2847
ГЕ	144	291	441	586	725	296	806	1461	2216	3029
КВ	144	292	441	587	726	296	806	1459	2221	3028
МЕ	32	50	69	90	106	127	319	558	847	1155
МХЛ	40	46	55	68	76	152	316	511	745	985
AY5	216	433	653	884	1075	336	944	1738	2697	3689
AY10	203	403	609	821	1001	326	911	1680	2596	3562
AY15	184	362	550	742	907	310	864	1598	2466	3393
AB5	218	442	666	904	1099	335	945	1734	2689	3678
AB10	217	435	652	880	1074	335	945	1734	2689	3678
AB15	205	413	621	839	1016	325	918	1687	2615	3584

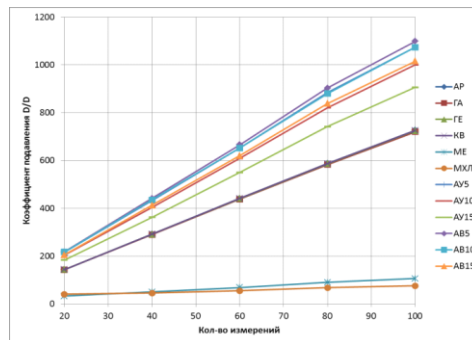
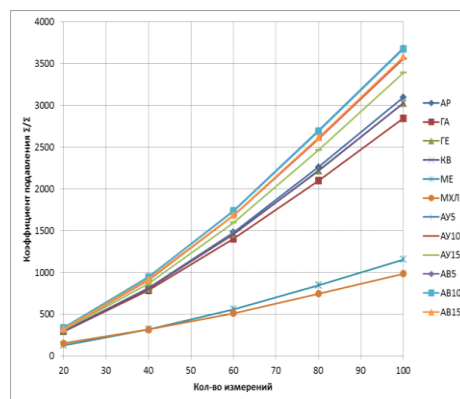
Рис. 5. Зависимости коэффициентов подавления  $K1$  от количества наблюденийРис. 6. Зависимости коэффициентов подавления  $K2$  от количества наблюдений

Таблица 3

Средние абсолютные погрешности и СКО абсолютных погрешностей при разных  $N$

Метод	$\Delta$				$\sigma$				
	Количество измерений ( $N$ )								
	20	60	80	100	20	40	60	80	100
AP	0,0016	0,0015	0,0010	0,0002	0,320	0,224	0,182	0,158	0,142
ГА	-0,0569	-0,0570	-0,0576	-0,0583	0,321	0,225	0,183	0,159	0,143
ГЕ	-0,0276	-0,0277	-0,0283	-0,0290	0,320	0,225	0,182	0,158	0,142
КВ	0,0308	0,0307	0,0302	0,0295	0,320	0,224	0,182	0,158	0,142
МЕ	0,0033	0,0060	-0,0011	0,0019	0,676	0,541	0,462	0,403	0,372
МХЛ	0,0058	0,0070	-0,0020	0,0011	0,604	0,568	0,515	0,466	0,440
AY5	0,0022	0,0008	0,0009	0,0002	0,261	0,184	0,150	0,129	0,117
AY10	0,0026	0,0009	0,0012	0,0002	0,269	0,191	0,155	0,134	0,121
AY15	0,0036	0,0010	0,0014	0,0004	0,283	0,201	0,163	0,141	0,127
AB5	0,0019	0,0009	0,0008	0,0002	0,260	0,182	0,148	0,127	0,115
AB10	0,0012	0,0004	0,0007	0,0000	0,260	0,184	0,150	0,129	0,117
AB15	0,0026	0,0009	0,0016	0,0001	0,267	0,189	0,154	0,132	0,120

Второй параметр – величина среднего квадратического отклонения  $\sigma$  – более информативна и также показывает нам преимущество алгоритмов AP, AY5 и AB5. Почти в три раза худшими по коэффициенту сглаживания  $\sigma$  оказались алгоритмы МЕ и МХЛ. На рис. 7 представлены зависимости значений СКО для восьми исследуемых алгоритмов от количества наблюдений  $N$ .

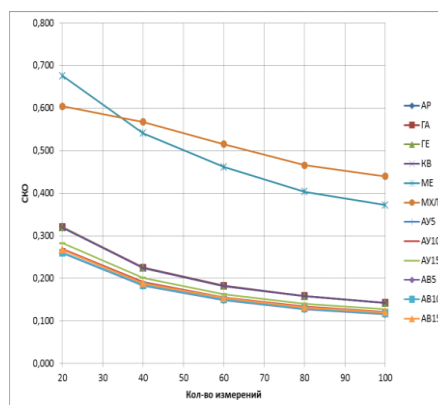


Рис. 7. Зависимости СКО от количества наблюдений

**Временные затраты на операцию усреднения.** Для оценки временных затрат на выполнение операции усреднения каждого из восьми исследуемых методов вычислялось количество элементарных тактов для каждого алгоритма. В табл. 4 [20] представлено время выполнения операции усреднения при тактовой частоте микропроцессора 16 МГц. Очевидно, что время выполнения операции усреднения не превышает 1500 мкс для  $N = 20$  и 7500 мкс для  $N = 100$  при выполнении операции усреднения после сбора всех данных. Однако это время может быть уменьшено в 5–10 раз при промежуточной обработке данных по сортировке через каждые 10–20 мс и таким образом не превысит 1000 мкс. Можно однозначно утверждать, что по времени вычислений лучшим оказался метод AP, который при  $N$ , кратном степени 2 (32, 64, 128...), с целью замены операции деления на операцию сдвига, выдаст результат через 1–2 мкс.

Таблица 4

**Сравнение алгоритмов обработки данных для 8 методов усреднений  
по 20 измерениям**

Метод	AP	ГА	ГЕ	КВ	МЕ	МХЛ	АУ5	АУ10	АУ15	АВ5	АВ10	АВ15
$N_T$	2986	12557	8431	6429	21490	13685	23556	23284	23014	23842	23834	23817

Представляет определённый интерес исследование влияния отдельных составляющих сложной комплексной помехи на коэффициенты подавления для восьми исследуемых методов усреднения. В табл. 5 [20] представлены результаты моделирования соответственно для  $N = 100$  – оценки коэффициентов подавления для гармонической помехи 50 Гц, шумовой помехи и импульсной помехи. В процессе моделирования менялся один из параметров, а два других поддерживались на постоянном уровне. Например, изменялась амплитуда гармонической помехи (2 мВ, 5 мВ, 10 мВ) при СКО шумовой помехи 1 мВ и СКО импульсной помехи 10 мВ. В последующих 6 этапах последовательно изменялись параметры шумовой помехи и импульсной помехи. Таким образом были получены 9 вариантов коэффициентов подавления, которые позволили оценить степень подавления каждой из составляющих сигнала помехи в отдельности.

Таблица 5

**Оценки коэффициентов подавления для гармонической помехи 50 Гц,  
шумовой помехи и импульсной помехи при  $N = 100$**

UГ, мВ		2	5	10	5			5		
СКО ш, мВ		1			0,5	1	2	1		
СКО имп п, мВ		10			10			5	10	20
Метод усреднения	AP	200	727	2625	1105	727	354	1102	727	350
	ГА	198	721	2592	1091	721	352	1100	721	334
	ГЕ	199	725	2614	1101	725	353	1101	725	345
	КВ	200	726	2625	1104	726	354	1101	726	348
	МЕ	124	106	179	170	106	101	106	106	124
	МХЛ	73	76	174	122	76	60	87	76	79
	АУ5	349	1075	3240	2646	1075	391	1148	1075	1216
	АУ10	334	1001	2892	2359	1001	370	1058	1001	1133
	АУ15	313	907	2493	2028	907	345	955	907	1023
	АВ5	350	1099	3428	2814	1099	395	1182	1099	1241
АВ10	344	1074	3313	2762	1074	384	1135	1074	1222	
АВ15	330	1016	3025	2585	1016	368	1063	1016	1166	

Анализ представленных результатов показывает, что все алгоритмы хорошо подавляют гармонические (сетевые) помехи 50 Гц и плохо сглаживают высокочастотные шумы и импульсные помехи большой амплитуды. Лучше всех показали себя алгоритмы а-усечённое среднее АУ5 и а-винзоризированное среднее АВ5, которые отбрасывают 5% аномальных результатов и не снижают коэффициенты подавления сложной импульсной помехи при увеличении СКО амплитуды помехи. На рис. 8 и 9 представлены полученные коэффициенты подавления для лучших алгоритмов усреднения АУ5, АУ10, АВ5, и АВ10. Очевидно, что с увеличением количества наблюдений (измерений) коэффициенты подавления линейно растут.

**Выводы.** Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. При увеличении числа наблюдений коэффициенты подавления растут прямо пропорционально количеству наблюдений, и это справедливо для всех исследованных методов усреднений. Методы медианы МЕ и медианы Ходжеса-Лемана МХЛ оказались худшими по всем коэффициентам подавления сложной шумовой помехи (на уровне 40 дБ).

2. Все алгоритмы усреднения прекрасно подавляют периодическую помеху 50 Гц. Но лучше всех с этой задачей справляются а-усеченное среднее АУ5 и а-винзоризированное среднее АВ5, которые хорошо подавляют и импульсные помехи большой амплитуды за счёт отбрасывания 5 % аномальных наблюдений.

3. Все алгоритмы усреднения плохо подавляют высокочастотные шумы и флуктуации, при увеличении амплитуды помехи коэффициенты подавления снижаются почти прямо пропорционально. В связи с этим в измерительном тракте необходимо предусмотреть аналоговую фильтрацию для снижения уровня шума.

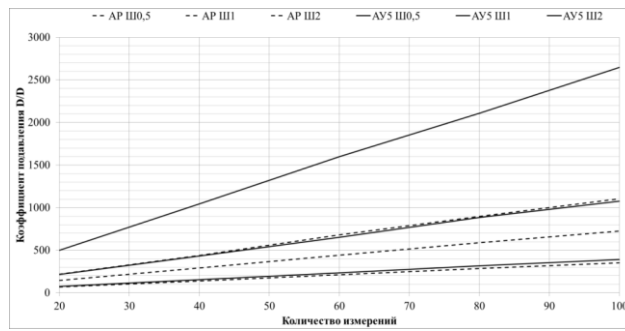


Рис. 8. Зависимости коэффициента подавления от количества измерений при разном уровне шума

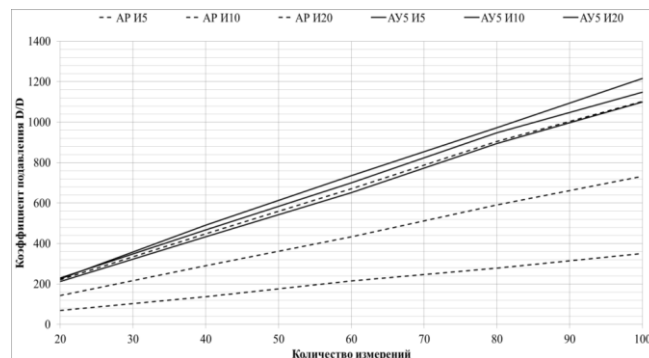


Рис. 9. Зависимости коэффициента подавления от количества измерений при разных уровнях импульсных помех

4. Можно выделить три метода усреднения: AP, АУ5 и АВ5, которые при выборке 100–128 наблюдений за один период сетевой помехи (20 мс) уверенно обеспечивают подавление любой сложной шумовой помехи до уровня 55–65 дБ. Алгоритмы АУ5 и АВ5 отлично подавляют импульсные помехи большой амплитуды.

5. Лучшими по времени выполнения операции усреднения оказался алгоритм AP, который обеспечивает выдачу результата усреднения через 1–2 мкс после окончания процесса измерения.

Авторам много раз приходилось применять методы усреднения для предварительного сглаживания сильно зашумленных сигналов. В частности, на одном предприятии измерительный кабель был расположен в одном канале рядом с силовыми кабелями 380 В, 50 Гц и 220 В, 400 Гц, что приводило к большим наводкам с частотой сети (более 3,5%). Проблему удалось решить на уровне ЭВМ за счёт усреднения 64 выборок АЦП за 40 мс, разброс результатов усреднения не превышал 0,1%. В другом случае для избавления от мощной импульсной помехи от радара был удачно применён метод а-усечённое среднее, который обеспечивал отброс 5% аномальных результатов [9].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фрайден Дж.* Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005.
2. *Галалу В.Г., Киракосян С.А.* Помехи по шинам заземления в системах промышленной автоматизации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 5. – С. 20-30.
3. *Галалу В.Г., Киракосян С.А.* Оценка уровня помех на входах аналого-цифровых преобразователей измерительных систем // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Матер. Междунар. науч.-техн. конф.: в 2-х т. Т. 2. – Саратов, 2016. – С. 208-215.
4. *Журавин Л.Г. и др.* Методы электрических измерений / под ред. Э.И. Цветкова. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
5. *Новицкий И.С., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
6. ГОСТ Р 8.736–2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013.
7. *Леман Э.* Теория точечного оценивания. – М.: Наука, 1991.
8. *Орлов А.И.* Прикладная статистика. – М.: Экзамен, 2004.
9. *Галалу В.Г., Киракосян С.А.* Применение а-усечённого среднего для подавления промышленных помех в системах промышленной автоматизации // Аспирант. – 2015. – № 5. – С. 43-47.
10. *Хьюбер П.* Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984.
11. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Наука, 2000.
12. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2006.
13. *Галалу В.Г., Киракосян С.А., Турулин И.И.* Аналоговые и цифровые методы подавления помех в информационно-измерительных системах. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015.
14. *Cramer H.* Random variables and probability distributions // Cambridge Tracts in Mathematics and Mathematical Physics. No. 36. – Cambridge University Press, 2003. – PBK reprint of 1970. – 3rd ed.
15. *Cramer H.* Mathematical Methods of Statistics. – Princeton University Press, Princeton, 1946.
16. *Scheffe H.* Review of Mathematical methods of statistics by H. Cramer // Bulletin of the American Mathematical Society. – 1947. – 53 (7). – P. 733-735.
17. *Fisher R.A.* Statistical Methods for Research Workers. Oliver and Boyd. Edinburg: Tweeddale Court. – London: Paternoster Row, E.C., 1928.
18. *Neyman J.* First course in probability and statistics. – N.Y.: Henry Holt & Co., 1957.
19. *Pearson K.* The Grammar of Science. Part I – Physical. London. Adam and Charles Black. 1911.
20. *Киракосян С.А.* Разработка и исследование методов повышения точности и помехоустойчивости быстродействующих устройств ввода аналоговой информации: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Новочеркасск, 2018.

## REFERENCES

1. *Frayden Dzh.* Sovremennye datchiki. Spravochnik [Modern sensors. Handbook]. Moscow: Tekhnosfera, 2005.
2. *Galalau V.G., Kirakosyan S.A.* Pomekhi po shinam zazemleniya v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii [Interference in ground busbars in industrial automation systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 5, pp. 20-30.

3. Galalu V.G., Kirakosyan S.A. Otsenka urovnya pomekh na vkhodakh analogo-tsifrovyykh preobrazovatelye izmeritel'nykh sistem [Evaluation of the noise level at the inputs of analog-to-digital converters of measuring systems], *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya: Mater. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Actual problems of electronic instrumentation: Materials of the International Scientific and Technical Conference]: in 2nd vol. Vol. 2. Saratov, 2016, pp. 208-215.
4. ZHuravin L.G. i dr. Metody elektricheskikh izmereniy / pod red. E.I. TSvetkova. – L.: Energoatomizdat, 1990.
5. Novitskiy I.S., Zograf I.A. Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy [Estimation of errors in measurement results]. Leningrad: Energoatomizdat, 1991.
6. GOST R 8.736–2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy (GSI). Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy. Osnovnye polozheniya [State System for Ensuring the Uniformity of Measurements (GSI). Multiple direct measurements. Methods for processing measurement results. Basic provisions]. Moscow: Standartinform, 2013.
7. Leman E. Teoriya tochechnogo otsenivaniya [Theory of point estimation]. Moscow: Nauka, 1991.
8. Orlov A.I. Prikladnaya statistika [Applied statistics]. Moscow: Ekzamen, 2004.
9. Galalu V.G., Kirakosyan S.A. Primenenie a-usechennogo srednego dlya podavleniya industrial'nykh pomekh v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii [Application of a-truncated mean for industrial interference suppression in industrial automation systems], *Aspirant* [Graduate student], 2015, No. 5, pp. 43-47.
10. Kh'yuber P. Robastnost' v statistike [Robustness in Statistics]. Moscow: Mir, 1984.
11. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow: Nauka, 2000.
12. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006.
13. Galalu V.G., Kirakosyan S.A., Turulin I.I. Analogovye i tsifrovye metody podavleniya pomekh v informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh [Analogue and digital methods of interference suppression in information-measuring systems]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015.
14. Cramer H. Random variables and probability distributions, *Cambridge Tracts in Mathematics and Mathematical Physics*, No. 36. Cambridge University Press, 2003. PBK reprint of 1970, 3rd ed.
15. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton University Press, Princeton, 1946.
16. Scheffe H. Review of Mathematical methods of statistics by H. Cramer, *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1947, 53 (7), pp. 733-735.
17. Fisher R.A. Statistical Methods for Research Workers. Oliver and Boyd. Edinburg: Tweedale Court. London: Paternoster Row, E.C., 1928.
18. Neyman J. First course in probability and statistics. N.Y.: Henry Holt & Co., 1957.
19. Pearson K. The Grammar of Science. Part I, Physical. London. Adam and Charles Black. 1911.
20. Kirakosyan S.A. Razrabotka i issledovanie metodov povysheniya tochnosti i pomekhoustoychivosti bystrodeystvuyushchikh ustroystv vvoda analogovoy informatsii: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of methods for improving the accuracy and noise immunity of high-speed devices for inputting analog information: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.05. Novocherkassk, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Чернов.

**Галалу Валентин Гаврилович** – Южный федеральный университет; e-mail: v.galalu@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371638; кафедра информационных измерительных технологий и систем; к.т.н.; доцент.

**Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер** – e-mail: alkaravi@sfnu.ru; тел.: +79612936340; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Турулин Игорь Ильич** – e-mail: iiturulin@sfnu.ru; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

**Киракосян Степан Айрапетович** – ООО "Радиоавтоматика"; e-mail: ksa\_say@mail.ru; г. Москва, Россия; к.т.н.; начальник отдела разработки технологической оснастки.

**Galaly Valentin Gavrilovich** – Southern Federal University; e-mail: v.galalu@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371638; the department of information technology and measuring systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Al-Karawi Hussein Sh. Mogheer** – Southern Federal University; e-mail: alkaravi@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79612936340; the department of fundamental of radioengineering; postgraduate student.

**Turulin Igor' P'ich** – e-mail: iiturulin@sfnedu.ru; phone: +78634371632; the department of fundamental of radioengineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Kirakosyan Stepan Ayrapetovich** – Radioavtomatika LLC; e-mail: ksa\_say@mail.ru; Moscow, Russia; cand. of eng. sc.; head of the department for the development of technological equipment.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-18-30

**Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.А. Ганжур****ОПТИМИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ  
АДАПТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ РОЯ АГЕНТОВ**

*Разработана архитектура бионического поиска для решения задачи размещения элементов СБИС на основе гибридизации алгоритмов пчелиной колонии и роя хромосом, что позволяет выходить из «локальных ям» и увеличивает сходимость алгоритма размещения. Начальные итерации реализует пчелиный алгоритм, чтобы обеспечить широкий обзор области поиска, а завершающие – алгоритм роя хромосом, обеспечивающий точную локализацию экстремума, найденного пчелиным алгоритмом. Агенты представляются в виде популяции хромосом, являющихся генотипами решения задачи размещения. В работе описывается модифицированная парадигма роя хромосом, обеспечивающая, в отличие от канонического метода, возможность поиска решений в аффинном пространстве позиций с целочисленными значениями параметров. В поисковом популяционном методе оптимизации роем хромосом агентами популяция являются хромосомы. Хромосома является генотипом объекта оптимизации. Суть поисковой процедуры заключается в последовательной смене оператором направленной мутации состояний объекта оптимизации (хромосомы) и поиске оптимального состояния. Предложена аффинно-релаксационная модель (АРМ) роя хромосом – это граф вершины которого соответствуют хромосомам, а дуги соответствуют аффинным связям между ними. Переход хромосомы в новое состояние осуществляется с помощью релаксационной процедуры. В качестве средства изменения решения выступает оператор направленной мутации (ОНМ), суть которого заключается в изменении целочисленных значений генов в хромосоме. Целью перехода является сокращение веса аффинной связи между хромосомами. Описаны механизмы ОНМ. Предложена модифицированная структура алгоритма пчел. Для каждой базовой хромосомы реализуется вероятностный выбор набора хромосом, расположенных в окрестности базовой хромосомы. Улучшить качество работы разработанного алгоритма можно при помощи настройки значений управляющих параметров. Временная сложность алгоритма при фиксированных значениях размера популяции и количества генераций составляет  $O(n)$ . В общем зависимость времени работы гибридного алгоритма составляет  $O(n^2) - O(n^3)$ .*

*СБИС; размещение; роевой интеллект; пчелиный алгоритм; рой хромосом; гибридизация; аффинное пространство поиска; оператор направленной мутации; бионический поиск.*

**В.К. Lebedev, O.B. Lebedev, M.A. Ganzhur****OPTIMIZATION BASED ON COMBINING MODELS OF ADAPTIVE  
BEHAVIOR OF A SWARM OF AGENTS**

*A bionic search architecture has been developed to solve the problem of placing VLSI elements based on the hybridization of the algorithms of a bee colony and a swarm of chromosomes, which allows you to get out of "local holes" and increases the convergence of the placement algo-*

*rithm. The initial iterations are implemented by the bee algorithm to provide a broad overview of the search area, and the final iterations are implemented by the chromosome swarm algorithm, which ensures the exact localization of the extremum found by the bee algorithm. Agents are represented as a population of chromosomes, which are genotypes for solving the placement problem. The paper describes a modified paradigm of a swarm of chromosomes, which, in contrast to the canonical method, provides the possibility of searching for solutions in the affine space of positions with integer values of the parameters. In the search population method of optimization by a swarm of chromosomes, the agents of the population are chromosomes. The chromosome is the genotype of the optimization object. The essence of the search procedure is the successive change of the states of the object of optimization (chromosome) by the directed mutation operator and the search for the optimal state. An affine-relaxation model (ARM) of a swarm of chromosomes is proposed - this is a graph whose vertices correspond to chromosomes, and arcs correspond to affine bonds between them. The transition of the chromosome to a new state is carried out using a relaxation procedure. In the work, the directed mutation operator acts as a means of changing the solution, the essence of which is to change the integer values of genes in the chromosome. The purpose of the transition is to reduce the weight of the affine bond between chromosomes. The mechanisms of the directed mutation operator are described. A modified structure of the bee algorithm is proposed. For each base chromosome, a probabilistic choice of a set of chromosomes located in the vicinity of the base chromosome is implemented. It is possible to improve the quality of the developed algorithm by adjusting the values of the control parameters. The time complexity of the algorithm for fixed values of the population size and the number of generations is  $O(n)$ . In general, the dependence of the running time of the hybrid algorithm is  $O(n^2) - O(n^3)$ .*

*VLSI; placement; swarm intelligence; bee algorithm; chromosome swarm; hybridization; affine search space; directed mutation operator; bionic search.*

**Введение.** С переходом на уровень нанотехнологий происходит смещение акцентов в проектировании СБИС [1, 2]. Так, с уменьшением линейных размеров элементов (транзисторов) и проводников, задержка в них масштабируется по-разному. Дефицит трассировочных ресурсов приводит к проблемам трассируемости схем, когда становится невозможно развести все необходимые соединения между элементами по коммутационным слоям [3, 4].

В момент размещения неизвестно расположение трасс и их характеристики, но от того, как будет выполнена трассировка межсоединений, зависят такие характеристики схемы, которые должны в итоге удовлетворить заданным ограничениям на быстродействие и трассируемость. Поэтому, на этапе размещения необходимо уметь более точно оценивать физические характеристики межсоединений так, чтобы эти оценки соответствовали результатам последующей трассировки.

Задача размещения относится к классу  $NP$  [5]. В течение последних лет были предложены различные подходы к решению этих проблем. Эти подходы могут быть классифицированы следующим образом: линейное и квадратичное программирование; имитация отжига; основанные на ограничениях; сила направленная парадигма; основанные на геометрической дуализации списков связей; иерархические методы сверху-вниз и снизу-вверх; метод кластеризации; генетические алгоритмы (ГА), и на основ поисковой адаптации биоинспирированные [1, 3–6] и др. Тем не менее, в последнее время для решения различных «сложных» задач, к которым относятся и задачи размещения всё чаще используются способы, основанные на применении методов искусственного интеллекта. Особенно наблюдается стремительный рост интереса к разработке алгоритмов, инспирированных природными системами [7]. В основе большинства этих алгоритмов лежат идеи, заимствованные в природе [8].

Новые требования к задаче размещения требуют новых подходов к ее решению. Проанализировав известные подходы, применяемые для решения «сложных» задач, можно сделать вывод, что использование какого-либо одного алгоритма не дает гарантии получения качественного решения. В связи с этим, в настоящее



время один из способов улучшения эффективности методов нахождения глобального оптимума решаемых задач, состоит в гибридизации алгоритмов [9]. Особенностью гибридного алгоритма является то, что достоинства одного алгоритма могут возместить недостатки другого. Объединение различных методик поисковых алгоритмов, дает возможность определения большей области допустимых решений и нахождение оптимального решения.

В работе описан разработанный алгоритм решения задачи размещения элементов СБИС, объединяющий процедуры поведения коллектива пчел и роя хромосом.

В данной работе предлагаются усовершенствованные методы размещения для решения упомянутых проблем, связанных с увеличением относительной задержки в проводниках и уменьшением трассировочных ресурсов.

**1. Постановка задачи размещения.** Основные проблемы, решаемые при разработке алгоритмов размещения, и сравнительные характеристики существующих алгоритмов размещения могут быть даны с учетом следующих показателей [3–5]:

1) модель представления конструктивных элементов, как геометрических объектов;

2) модель монтажного пространства (пространство позиций);

3) модель представления электрической принципиальной схемы;

4) метод поиска решений, включающий:

- ◆ способ выбора позиции для установки элементов;
- ◆ характер целевой функции выбора позиции;
- ◆ характер целевой функции выбора элемента-претендента из множества неразмещенных;
- ◆ характер целевой функции для оценки размещения [5].

Необходимо разместить элементы на коммутационном поле с оптимизацией некоторых критериев качества.

Простой и в то же время эффективной оценкой длины проводника является полупериметр охватывающего цепь прямоугольника. Известно, что для двух- и трех- контактных цепей полупериметр охватывающего прямоугольника совпадает с длиной минимального дерева Штейнера, которое используется во многих алгоритмах трассировки. Поэтому сумма полупериметров охватывающих прямоугольников по всем цепям является наиболее распространенной целевой функцией в алгоритмах размещения.

В настоящий момент обычно используют один из двух вариантов оценки длины соединений:

а) метод полупериметра – для каждой цепи подсчитывается полупериметр минимального охватывающего прямоугольника;

б) метод полного графа – вычисляется нормированная сумма расстояний между всеми парами узлов цепи.

Пусть дано множество элементов  $A = \{a_j | j = 1, 2, \dots, n\}$  и множество позиций  $P = \{p_i | i = 1, 2, \dots, c\}$  на КП.

Для размещения всех элементов необходимо выполнение условия  $c \geq n$ .

Произвольное размещение элементов в позициях представляет собой функциональное (однозначное) соответствие между множествами  $P$  и  $A$ , обозначается как  $f: P \rightarrow A$ . Каждому элементу  $p_i$  из области определения функция  $f$  ставит в соответствие единственный элемент  $a_j$  из области значений. Это обозначается  $f(p_i) = a_j$ . Элемент  $p_i$  – аргумент функции, элемент  $a_j$  – значение функции на  $p_i$ . В зависимости от выбранного критерия для оценки результатов размещения вводится целевая функция  $F(f)$ .

Задача размещения состоит в отыскании оптимального значения функции  $F(f)$ .

В качестве модели схемы используется граф  $G=(X, Y)$  или гиперграф  $H=(X, E)$ , где  $X = \{x_i | i=1, 2, \dots, n\}$  – множество вершин, моделирующих элементы, а  $U = \{u_j | j=1, 2, \dots, l\}$  – множество ребер. Вершина  $x_i$  связана с  $x_j$  ребром, если соответствующие элементы связаны соединением.

$E = \{e_j | e_j \subset X, j=1, 2, \dots, m\}$  – множество гиперребер, моделирующих цепи, связывающие элементы. Граф адекватно моделирует двутерминальные соединения, а гиперграф – многотерминальные.

Расстояние между двумя вершинами с координатами  $(x_i, y_i)$  и  $(x_j, y_j)$  определяется по формуле:

$$d_{ij} = |x_i - y_i| + |x_j - y_j|.$$

В настоящий момент основными известными критериями при размещении [1, 3, 5] являются: минимальная суммарная длина связи, минимальная длина самой длинной связи, минимум числа возможных пересечений, минимум числа изгибов соединений, минимальная площадь кристалла.

В качестве оценки  $l_j$  длины цепи  $t_j$ , моделируемой гиперребром  $e_j$ , используются: длина минимального связывающего дерева, построенного на множестве вершин  $e_j \subset X$ ; длина звездного графа, ребра которого инцидентны вершинам  $e_j \subset X$ , а корневая вершина помещена в центре “тяжести” множества вершин  $e_j$ ; длина полупериметра прямоугольника, описывающего множество вершин  $e_j$ ; суммарная длина ребер полного графа, построенного на множестве  $e_j$ . С учетом этого, критерий оптимизации имеет вид:

$$F = \sum_{j=1}^m l_j.$$

Для более полного учета связей между задачами размещения и трассировки более эффективны алгоритмы, основанные на оценках числа цепей, пересекающих заданные линии КП. Эти линии могут быть либо прямыми, пересекающими все КП, либо замкнутыми и ограничивающими некоторую область [5].

Пусть на КП наложена опорная сеть  $G(X, U)$ , разбивающая КП на области  $O = \{o_k | k=1, 2, \dots, n_k\}$ , где  $X = \{x_i | i=1, 2, \dots, n\}$  – множество опорных узлов сети,  $U = \{u_j | j=1, 2, \dots, m\}$  множество ребер, связывающих узлы. Позиции располагаются внутри областей. В качестве исходных данных для КП задается число позиций  $p_k$  внутри каждой области  $o_k$  и для каждого ребра  $u_i$   $D = \{d_j | j=1, 2, \dots, m\}$ , где – задается пропускная способность  $d_j$ , т.е. число цепей (трасс), которые могут ее пересечь. Значения  $\sum d_j$  определяются размерами ребра и ограничениями на прокладку соединений.

Назовем цикл  $L_k$ , составленный из ребер сетки и ограничивающий некоторую область, границей области. Под пропускной способностью  $PS_k$  границы  $L_k$  будем понимать суммарную пропускную способность ребер сетки, входящих в состав  $L_k$ , т.е.  $PS_k = \sum_j d_j$  ( $\forall j | u_j \in L_k$ ),

Пусть  $H_k$  – число цепей, связывающих элементы, расположенные внутри области, ограниченной  $L_k$ , с элементами, расположенными вне этой области. Введем характеристику границы:

$$\gamma_k = \frac{PS_k - H_k}{PS_k}.$$

Чем большее значение имеет  $\gamma_k$ , тем легче осуществить прокладку связей через границу  $L_k$ .

Пусть задано некоторое множество областей  $O = \{o_k | k=1, 2, \dots, n_k\}$ , для которых определено множество границ  $L = \{L_k | k=1, 2, \dots, k_L\}$ .

Пусть задано некоторое размещение элементов. Найдем среди характеристик границ наименьшую  $\gamma_{min}$ , т.е.  $\forall k [(PS_k - H_k) / PS_k \geq \gamma_{min}]$ .

Величина  $F = \gamma_{min}$  используется в качестве критерия оптимизации. Задача оптимизации – максимизация  $\gamma_{min}$ .

**2. Подход к представлению решений в алгоритме на основе роевого интеллекта.** В работе представлена архитектура многоагентной системы на основе природных вычислений, выполняющая размещение компонентов сверхбольших интегральных схем, используя объединенные модели роевого интеллекта: роя хромосом (chromosomeswarmoptimization – CSO) и пчелиного роя [10, 11].

Решение задачи размещения представляется в виде вектора  $A = \{a_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ , где  $a_i$  – номер элемента, размещаемого в  $i$ -й позиции. Если число размещаемых элементов на  $m$  меньше числа позиций, то  $m$  элементов  $p_i$  в векторе  $A$  имеет нулевое значение [5].

Хромосома  $H_i = \{g_{il} | l = 1, 2, \dots, n_i\}$  представляет собой совокупность  $n$  генов  $g_{il}$ . Значение гена  $g_{il}$  равно значению соответствующего элемента, размещаемого в  $i$ -й позиции.

В поисковом популяционном методе оптимизации роем хромосом агентами популяция являются хромосомы. Хромосома является генотипом объекта оптимизации. Миграция агентов реализуется с помощью операторов направленного поиска. Каждая хромосома  $H_i$  связана со всем роем  $H = \{H_{ij} | i = 1, 2, \dots, n_o\}$ , может взаимодействовать со всем роем и она тяготеет к лучшему решению  $H^*$  роя. В каждый момент времени  $t$  (на каждой итерации) хромосомы находятся в некотором состоянии, определяемом значениями генов. Для каждого состояния хромосомы  $H_i(t)$  вычисляется соответствующее значение целевой функции  $f_i(t)$  [5, 12].

Суть поисковой процедуры заключается в последовательной смене оператором направленного поиска состояний объекта оптимизации (хромосомы) и поиске оптимального состояния [13].

При определении следующего состояния хромосомы учитывается информация о «наилучших» хромосомах  $H^*(t)$  из числа «соседей» данной хромосомы, а также информация о данной хромосоме на той итерации, когда этой хромосоме  $H_i^*(t)$  соответствовало наилучшее значение целевой функции  $f_i^*(t)$ , и на этой основе по определенным правилам хромосома меняет свое состояние. [14].

Аффинно-релаксационная модель (АРМ) роя хромосом  $H = \{H_i | i = 1, 2, \dots, n_o\}$  – это граф вершины которого соответствуют хромосомам, а дуги соответствуют аффинным связям между хромосомами. Аффинность – мера близости двух хромосом агентов. На каждой итерации каждая хромосома  $H_i \in H$  переходит в аффинном графе в новое состояние  $H_i(t+1)$ , при котором вес аффинной связи между хромосомой  $H_i$  и базовой (лучшей)  $H_i^*$  уменьшается. Переход хромосомы  $H_i(t)$  в новое состояние  $H_i(t+1)$  осуществляется с помощью релаксационной процедуры, зависящей от вида структуры данных (хромосомы): вектор, матрица, дерево и их совокупности, являющейся интерпретацией решений.

В работе в качестве средства изменения решения выступает оператор направленной мутации (ОНМ), суть которого заключается в изменения целочисленных значений генов  $h_{il}$  в хромосоме  $H_i(t) = \{h_{il}(t) | l = 1, 2, \dots, n\}$ . Переход хромосомы в новое состояние означает переход от хромосомы  $H_i(t)$  к новой  $H_i(t+1)$  – с новыми целочисленными значениями генов, полученными после применения ОНМ.

В качестве веса аффинной связи между хромосомами  $H_i(t)$  и  $H_j(t)$  используются оценки степени близости  $S_{ij}$  между двумя хромосомами.

Целью перехода  $H_i(t)$  в  $H_i(t+1)$  является сокращения веса аффинной связи между хромосомой  $H_i(t)$  и лучшей хромосомой  $H^*(t)$  популяции.

Аналитическое выражение для расчета оценки степени близости  $S_{ij}$ , зависящей от вида структуры хромосомы: вектор, матрица, дерево и их совокупности, являющейся интерпретацией решений [14].

Пример. В качестве степени близости между гомологичными хромосомами  $H_i(t)$  и  $H_j(t)$  будем использовать величину  $S_i$ :

$$S_{ij} = \sum_l |h_{il} - h_{jl}|,$$

где  $h_{il} \in H_i(t)$ ,  $h_{jl} \in H_j(t)$ ,  $S_{ij}$  – степень близости (вес аффинной связи) между двумя хромосомами  $H_i(t)$  и  $H_j(t)$ .

Суть процедуры перехода, реализуемой ОНМ, заключается в изменениях разности между значениями каждой пары генов  $(h_{il}, h_{jl})$  двух хромосом,  $l=1, 2, \dots, n$ . Если вес аффинной связи между хромосомами рассматривать как длину, то в процессе поисковой процедуры происходит релаксационное сжатие аффинного графа.

Рассмотрим *процедуру перехода*, которая была разработана авторами и заключается в изменениях взаимного расположения элементов в хромосоме. Хромосома  $H_i(t)$  переходит в новое состояние  $H_i(t+1)$  с новым взаимным расположением элементов в списке.

**Пример** работы процедуры перехода (ОНМ).

Пусть  $H_i(t)$  и  $H_j(t)$  имеют вид:  $H_i(t) = \{1, 3, 2, 10, 8\}$ ,  $H_j(t) = \{1, 10, 2, 3, 8\}$ .

На первом такте в  $H_i(t)$  формируется множество пар  $D_1 = (1, 3), (2, 10)$ . Взаимное расположение элементов пары  $(1, 3)$  в  $H_i(t)$  и  $H_j(t)$  совпадают, пары  $(2, 10)$  – нет. В  $H_i(t)$  переставляются местами элементы пары  $(2, 10)$ .  $H_i(t+1) = \{1, 3, 10, 2, 8\}$ .

На втором такте в  $H_i(t+1)$  формируется множество пар  $D_2 = (3, 10), (2, 8)$ . Взаимное расположение элементов пары  $(2, 8)$  в  $H_i(t+1)$  и  $H_j(t)$  совпадают, пары  $(3, 10)$  – нет. В  $H_i(t+1)$  переставляются местами элементы пары  $(3, 10)$ .  $H_i(t+2) = \{1, 10, 3, 2, 8\}$ .

**Алгоритм оптимизации – рой хромосом имеет вид:**

1. Формирование исходного роя хромосом  $H = \{H_i | i=1, 2, \dots, n_o\}$ .  $t=1$ .
2. Расчет целевой функции  $f_i(t)$  для всех  $H_i$ .
3. Выбор лучших хромосом  $H^*_i(t)$  и  $H^*(t)$ .
4. Если  $t < T$ , то  $t = t+1$  и переход к пункту 5, иначе переход к пункту 7.
5. Переход всех хромосом роя под действием ОНМ в новые состояния.
6. Переход к пункту 2.
7. Конец работы алгоритма.

3. Адаптивное поведение пчелиной колонии. Пусть имеется популяция пчел  $P = \{p_i | i=1, 2, \dots, n_i\}$ . На первой итерации ( $t=1$ ) пчелы-разведчики случайным образом размещаются в области поиска решений. Каждая пчела разведчик  $p_i$  на шаге  $t$  выбирает позицию  $X_i(t)$ . Каждая позиция является моделью решения задачи размещения. Объем нектара является значением критерия в этой точке [15].

Позиция  $X_i(t)$ , выбранная пчелой, представляется в виде хромосомы  $H_i(t) = \{h_{ij} | j=1, 2, \dots, n_o\}$ .

Таким образом первая операция ( $t=1$ ) выполняемая пчелами заключается в генерации случайным образом исходного роя отличающихся друг от друга хромосом  $H = \{H_i | i=1, 2, \dots, n_o\}$ . Для каждой хромосомы  $H_i(t)$  вычисляется соответствующее значение целевой функции  $f_i(t)$ .

Среди роя хромосом популяции  $H$  выбираются  $n_\theta$  лучших решений, которые включаются в базовое множество  $H^\theta(t)$  хромосом,  $H^\theta(t) \subset H$ . Обычно реализуется вероятностный способ формирования  $H^\theta(t)$ . Вероятность  $p(H^\theta(t))$  выбора агентом фуражиром базовой  $H^\theta_i \in H(t)$  для включения в  $H^\theta(t)$  пропорциональна значению целевой функции  $f_i(t)$  этой хромосомы и определяется как:

$$p(H^\theta(t)) = f_i(t)^\theta / \sum_i f_i(t)^\theta.$$

Далее в окрестности каждой базовой хромосомы  $H^\theta_i(t)$  формируется соответствующий ей набор хромосом  $O^\theta_i(t+1) = \{o_{ij}(t+1) | j=1, 2, \dots, n_o\}$ ,  $F: H^\theta_i(t) \rightarrow O^\theta_i(t+1)$ .

Формирование новой хромосомы  $o_{ij}(t+1)$ , лежащей в  $\theta$ -окрестности базовой позиции  $H^\theta_i(t)$  производится путём  $\delta$  выборочных (случайных) парных перестановок соседних элементов в векторе  $H^\theta_i(t)$ . Будем считать, что решение  $o_{ij}(t+1)$  лежит в  $\theta$ -окрестности решения  $H^\theta_i(t)$ , если  $o_{ij}(t+1)$  получено путем  $\theta$  случайных парных перестановок соседних элементов в списке  $H^\theta_i(t)$  [16].

Обозначим множество хромосом, вошедших в  $\theta$ -окрестность хромосомы  $H_i^\theta(t)$ , как  $O_k^\theta(t+1)$ . Рассчитывается оценка каждой хромосомы множества  $O_k^\theta(t+1)$ . В каждой  $\theta$ -окрестности  $O_k^\theta(t+1)$  выбирается лучшая хромосома  $o_{ij}^*(t+1)$ . Лучшие хромосомы  $\theta$ -окрестностей образуют новое множество базовых хромосом  $H^*(t)$ .

Лучшее решение (хромосома) среди множества  $H^*(t+1)$  сохраняется, а затем происходит переход к следующей итерации. В начале второй и на последующих итерациях, прежде всего, формируется множество базовых хромосом  $H^\theta(t)$  ( $t=2,3,\dots,L$ ), составленное из двух частей  $H^{\theta 1}(t)$  и  $H^{\theta 2}(t)$ ,  $H^{\theta 1}(t) \cup H^{\theta 2}(t) = H^\theta(t)$ . В первую часть  $H^{\theta 1}(t)$  включаются  $n_{\theta 1}$  лучших хромосом, среди  $H^*(t+1)$ , найденных агентами в каждой из областей, сформированных на предыдущей итерации. Вторая часть  $H^{\theta 2}(t)$  формируется агентами разведчиками также, как и на первой итерации. Далее выполняются действия, аналогичные действиям, рассмотренным на первой итерации.

#### Алгоритм оптимизации пчелиным роем имеет вид:

1. Формирование исходного роя хромосом  $H = \{H_i | i=1, 2, \dots, n_o\}$ .  $t=1$ .
2. Расчет целевой функции  $f_i(t)$  для всех  $H_i$ .
3. Среди хромосом роя  $H$  выбираются  $n_\theta$  лучших, которые включаются в базовое множество  $H^\theta(t)$  хромосом,  $H^\theta(t) \subset H$ .
4. В окрестности каждой базовой хромосомы  $H_i^\theta(t) \in H^\theta(t)$  формируется соответствующий ей набор хромосом  $O_i^\theta(t+1) = \{o_{ij}(t+1) | j=1, 2, \dots, n_o\}$ ,  $(\forall i)F: H_i^\theta(t) \rightarrow O_i^\theta(t+1)$ .  $|H_i^\theta(t)|=1$ ,  $|O_i^\theta(t+1)|=n_o$ .
5. В каждой окрестности  $O_i^\theta(t+1)$  отыскивается лучшая хромосома  $o_{ij}^*(t+1)$ .  $(\forall i)F: O_i^\theta(t+1) \rightarrow o_{ij}^*(t+1)$ .  $|O_i^\theta(t+1)|=n_o$ ,  $|o_{ij}^*(t+1)|=1$ .
6. Лучшие хромосомы  $\theta$ -окрестностей образуют новое базовое множество хромосом  $H^\theta(t)$ .
7. Переход к следующей итерации.

4. Гибридизация структуры роевого интеллекта. Разработанный алгоритм решения задачи размещения элементов СБИС, использует архитектуру бионического поиска, и состоит из объединенных процедур алгоритмов пчелиной колонии и роя хромосом, что позволяет выходить из «локальных ям» и увеличивает сходимость алгоритма размещения. Данные представляются в матричном или векторном виде.

При движении в области допустимых значений популяция агентов по очередности представляется как рой пчел или рой хромосом, с определенными свойствами адаптивного поведения. Агенты представляются в виде популяции хромосом  $H_i(t) = \{g_{il} | l=1, 2, \dots, n_l\}$ , являющихся генотипами решения задачи размещения.

В работе применяется гибридизация типа препроцессор/поспроцессор. Начальные итерации реализует пчелиный алгоритм [16], чтобы обеспечить широкий обзор области поиска, а завершающие итерации при помощи алгоритма роя хромосом, обеспечивающего точную локализацию экстремума, найденного пчелиным алгоритмом.

Первая операция ( $t=1$ ) выполняемая пчелами заключается в генерации случайным образом исходного роя отличающихся друг от друг хромосом  $H = \{H_i | i=1, 2, \dots, n_o\}$ .

Далее, в соответствии с механизмами пчелиной колонии пчелами фуражирами формируются  $\theta$ -окрестности каждой из базовых хромосом множества  $H_i^\theta(t)$ .

Процедурой ОКРЕСТНОСТЬ в окрестности (на базе) каждой хромосомы  $H_i^\theta$  генерируется легитимный рой хромосом  $O_i^\theta = \{o_{ij} | j=1, 2, \dots, n_o\}$ , в состав которого входит  $H_i^\theta$ .

Далее путем многократного применения алгоритма роя хромосом к каждому  $O_i^\theta$  хромосомы каждого рома переходят в новые состояния.

Ключевой операцией пчелиного алгоритма является исследование перспективных хромосом и их  $\theta$ окрестностей в пространстве решений. В каждом обновленном рое  $O_i^\delta(t+1)$  выбирается лучшая хромосома  $o_{ij}^*$ . Лучшие хромосомы  $o_{ij}^*$  включаются в базовое множество хромосом  $H^\delta(t+1)$ . На последующей  $(t+1)$ -ой итерации гибридного алгоритма множество хромосом  $H^\delta(t+1)$  рассматривается как базовый рой хромосом.

**Гибридный алгоритм размещения имеет вид:**

1. Формирование исходного базового роя хромосом  $H = \{H_i | i=1, 2, \dots, n_o\}$  с заданной исходной мощностью  $n_o$ .

2. Формирование начальных значений генов у хромосом  $H_i \in H$ .

Если хромосомы гомологичные, то допускается совпадение значений генов в составе хромосомы. В этом случае генам задаются значения в пределах заданных диапазонов.

Если хромосомы негомологичные, то не допускается совпадение значений генов в составе хромосомы. Хромосомы различаются порядком расположения значений генов в хромосоме.

3. Для каждой хромосомы  $H_i$  рассчитывается оценка  $f_i$  целевой функции.

4. РХ  $H$  сужается до  $H^\delta$  заданного размера  $n < n_o$  путем отбрасывания хромосом с худшими оценками.  $|H^\delta| = n$ .  $i = 0$ .

5.  $i = i + 1$ .

6. Процедурой ОКРЕСТНОСТЬ в окрестности (на базе) каждой хромосомы  $H_i^\delta$  генерируется легитимный рой хромосом  $O_i^\delta = \{o_{ij} | j=1, 2, \dots, n_o\}$ , в состав которого входит  $H_i^\delta$ .

В случае гомологичных хромосом допускается совпадение значений генов. У заданного числа генов в составе хромосомы  $H_i^\delta$  значения изменяются в пределах заданных диапазонов.

В случае негомологичных хромосом задается число пар генов, порядок расположения которых в новых хромосомах друг относительно друга подвергается инверсии.

8. У каждого роя  $O_i^\delta$  для каждой хромосомы  $o_{ij} \in O_i^\delta$  рассчитывается оценка  $f_{ij}$  целевой функции.

9. Каждый РХ  $O_i^\delta$  сужается до заданного размера  $n < n_o$  путем отбрасывания хромосом с худшими оценками.  $|O_i^\delta| = n$ .

10. На каждой из заданного числа итераций, хромосомы каждого роя  $O_i^\delta$ , работанным алгоритмом роя хромосом последовательно  $k$  раз переходят в новые состояния:

$$O_i^\delta(t) \rightarrow O_i^\delta(t+1) \rightarrow O_i^\delta(t+2) \dots O_i^\delta(t+3) \rightarrow$$

11. В каждом рое  $O_i^\delta$  выбирается хромосома  $o_{ij}^* \in O_i^\delta$  с максимальным значением оценки  $f_{ij}^*$ .  $o_{ij}^*$  включается в множество  $O_i^*$ .

12. Формирование исходного базового роя хромосом  $H^\delta = \{H_i^\delta | i=1, 2, \dots, n\}$ . Так как  $|O_i^*| = |H^\delta| = n$ , множество  $O_i^*$  переименуется в множество  $H^\delta$ , т.е.  $(\forall i) [H_i^\delta = o_{ij}^*]$ .

Результатом работы алгоритма является рой  $O_i^*$ , включающий хромосому с лучшим значением целевой функции.

Для получения более качественного решения предусмотрен расширенный вариант гибридного алгоритма, отличающийся дополнительным использованием алгоритма роя хромосом.

Ниже приведены основные этапы расширенного варианта гибридного алгоритма.

1. Формирование базового роя хромосом  $H^\delta(t) = \{H_i^\delta(t) | i=1, 2, \dots, n_o\}$ .  $t = 1$ .

2. Расчет целевой функции  $f_i(t)$  для всех  $H_i^\delta(t)$ .

3. В окрестности каждой базовой хромосомы  $H_i^\delta(t) \in H^\delta(t)$  формируется соответствующий ей набор хромосом  $O_i^\delta(t+1) = \{o_{ij}(t+1) | j=1, 2, \dots, n_o\}$ ,  $(\forall i) F: H_i^\delta(t) \rightarrow O_i^\delta(t+1)$ .  $|H_i^\delta(t)| = 1$ ,  $|O_i^\delta(t+1)| = n_o$ .

4. К хромосомам каждого роя  $O_i^{\delta}$ ,  $i=[1;n_{\delta}]$  последовательно  $k$  раз применяется алгоритм роя хромосом. После каждого применения алгоритма РХ хромосомы роя переходят в новые состояния:

$$O_i^{\delta}(1) \rightarrow O_i^{\delta}(2) \dots \rightarrow O_i^{\delta}(k).$$

5. В каждом рое  $O_i^{\delta}$  выбирается хромосома  $o_{ij}^* \in O_i^{\delta}$  с максимальным значением оценки  $f_{ij}^* \cdot o_{ij}^*$  включается в множество  $O_i^*$ .

6. К рою  $O_i^*$ , применяется алгоритм роя хромосом. Хромосомы роя переходят в новые состояния:  $O_i^*(vx) \rightarrow O_i^*(vix)$ .

7. Формирование исходного базового роя хромосом  $H^{\delta}=\{H_{ij}^{\delta}, i=1,2,\dots,n\}$ . Так как  $|O_i^*|=|H^{\delta}|=n$ , множество  $O_i^*$  переименуется в множество  $H^{\delta}$ , т.е.  $(\forall i)[H_{ij}^{\delta}=o_{ij}^*]$

8. Если  $t < T$ , то  $t = t + 1$  и переход к пункту 1, иначе конец алгоритма.

**5. Экспериментальные исследования.** Исследования гибридного роевого алгоритма размещения (ГРАР) состоит в формировании тестовых заданий для задачи размещения с имеющимся оптимальным результатом (РЕКО) [17]. Оптимальные результаты РЕКО имеются в обоих форматах GSRC BookShelf и LEF/DEF, и они доступны в сети [18].

Все цепи в РЕКО являются локальными, т.е. длина проводников каждой цепи имеет минимально возможное значение. Схемы набора РЕКУ состоят из локальных цепей в стиле РЕКО. Для экспериментальных исследований разработанной программы размещения были применены схемы набора РЕКУ с известным оптимумом  $F_{opt}$ : Ex.1 на 30 блоков, Ex.2 – 60, Ex.3 – 90, Ex.4 – 120, Ex.5 – 150. Для сравнения были выбраны современные алгоритмы размещения: Dragon v2.20 [19], Caro v.8. [20], mPL v.2.0 [21], mPG v1.0 [22] и QPlace v.5.1. [23].

Для определения оптимальности достигнутых значений, рассчитывался параметр: наилучшая длина соединений  $F_{opt}$  к полученной длин соединения  $F$  (для РЕКО) или (для G-РЕКУ и РЕКУ). Это отношение называется «степенью качества».

В табл. 1. приведены полученные значения показателя степень качества  $F_{opt}/F$  ряда известных алгоритмов и алгоритма ГРАР.

Таблица 1

Значения показателя «степень качества»

Тест	Dragon	Caro	mPL	mPG	Qplace	ГРАР
Ex.1	0.71	0.73	0.81	0.71	0.73	0.92
Ex.2	0.72	0.72	0.84	0.72	0.78	0.9
Ex.3	0.81	0.8	0.83	0.81	0.82	0.9
Ex.4	0.83	0.84	0.85	0.83	0.81	0.92
Ex.5	0.82	0.81	0.86	0.82	0.84	0.92

Степень качества у разработанной программы РАР на 10% больше, чем у программ Dragon, Caro, mPL, mPG и Qplace. ВСА  $O(n^2)$ .

На основе анализа проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Ни один из алгоритмов размещения при исследовании не достиг коэффициента качества близкого к 1

2. Показатель качества для одного и того же алгоритма размещения может значительно варьироваться для схем схожего размера, но с различными характеристиками. Ни один из алгоритмов не получает неизменно лучшие результаты, чем другой.

3. Различные алгоритмы размещения демонстрируют различную масштабируемость в показателях времени выполнения и качества решения. Ни один из них не может успешно решить все схемы набора РЕКО, из-за ограниченного времени решения (например Dragon), или расхода памяти (например Caro, mPL v.2.0.).

Анализ сходимости алгоритма PАР осуществлялся следующим образом. Каждое тестовое задание запускалось на выполнение 10 раз. Для каждого теста определялся номер итерации, после которой далее не происходило улучшения критерия.

В результате экспериментов установлено, что при объеме популяции  $M=100$  алгоритм сходится в среднем на 115 итерации. При этом отклонения в сторону увеличения этой оценки составлял до 10%, а в сторону уменьшения до 35%. Оценкой качества служит величина  $F_{\text{опт}}/F$ , где  $F$  – оценка полученного решения.

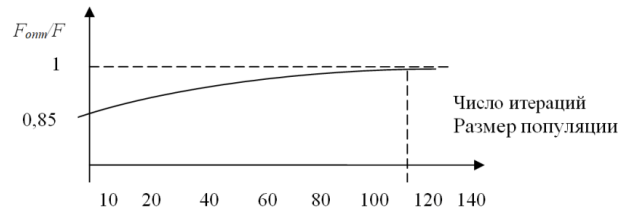


Рис. 1. Зависимость качества решений от числа итераций

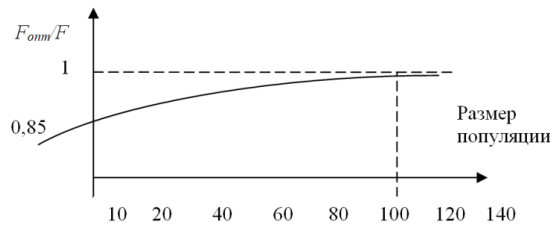


Рис. 2. Зависимость качества решений от размера популяции

Сравнение значений критерия, полученных муравьиным алгоритмом на тестовых примерах с известным оптимумом показало, что у 70% примеров полученное решение было оптимальным, у 5% примеров решения были на 5% хуже, а у 25% примеров решения были хуже не более, чем на 2%. Сравнение с известными алгоритмами показало, что при меньшем времени работы у полученных с помощью разработанного алгоритма решений отклонение целевой функции от оптимального значения меньше в среднем на 6%.

В настоящее время Большое количество примеров содержится в электронных библиотеках OR-Library (<http://mscmga.ms.ic.ac.uk/mfo.html>) и DIMACS Challenge II (<ftp://dimacs.rutgers.edu/pub/challenge/graph/>).

Временная сложность алгоритма при фиксированных значениях размера популяции и количества генераций составляет  $O(n)$ . Общая временная сложность гибридного алгоритма составляет  $O(n^2) - O(n^3)$ .

**Заключение.** С переходом на уровень нанотехнологий происходит смещение акцентов в проектировании СБИС. Дефицит трассировочных ресурсов приводит к проблемам трассируемости схем, когда становится невозможно развести все необходимые соединения между элементами по коммутационным слоям. В работе решение задачи размещения направлено на повышение трассируемости посредством минимизации ресурсов, требуемых для реализации соединений. Для более полного учета связей между задачами размещения и трассировки более эффективны алгоритмы, основанные на оценках числа цепей, пересекающих заданные линии КП [2, 3].

Разработана архитектура бионического поиска для решения задачи размещения элементов СБИС на основе гибридизации алгоритмов пчелиной колонии и роя хромосом, что позволяет выходить из «локальных ям» и увеличивает сходимость



алгоритма размещения. Начальные итерации реализует пчелиный алгоритм, чтобы обеспечить широкий обзор области поиска, а завершающие – алгоритм роя хромосом, обеспечивающий точную локализацию экстремума, найденного пчелиным алгоритмом. Агенты представляются в виде популяции хромосом, являющихся генотипами решения задачи размещения

В работе описывается модифицированная парадигма роя хромосом, обеспечивающая, в отличие от канонического метода, возможность поиска решений в аффинном пространстве позиций с целочисленными значениями параметров.

Суть поисковой процедуры заключается в последовательной смене оператором направленной мутации состояний объекта оптимизации (хромосомы) и поиске оптимального состояния. В поисковом популяционном методе оптимизации роем хромосом агентами популяция являются хромосомы. Хромосома является генотипом объекта оптимизации.

Предложена аффинно-релаксационная модель (АРМ) роя хромосом – это граф вершины которого соответствуют хромосомам, а дуги соответствуют аффинным связям между ними. Переход хромосомы в новое состояние осуществляется с помощью релаксационной процедуры.

В работе в качестве средства изменения решения выступает оператор направленной мутации (ОНМ), суть которого заключается в изменении целочисленных значений генов в хромосоме. Целью перехода является сокращении веса аффинной связи между хромосомами. Описаны механизмы

оператора направленной мутации.

Предложена модифицированная структура алгоритма пчел. Для каждой базовой позиции реализуется вероятностный выбор набора позиций, расположенных в окрестности базовой позиции.

Улучшить качество работы разработанного алгоритма можно при помощи настройки значений управляющих параметров. Временная сложность алгоритма при фиксированных значениях размера популяции и количества генераций составляет  $O(n)$ . В общем зависимость времени работы гибридного алгоритма составляет  $O(n^2) - O(n^3)$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казеннов Г. Основы проектирования интегральных схем и систем. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 20105.
2. Тучин А.В., Бормонтов Е.Н., Пономарев К.Г. Введение в системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2017.
3. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
4. Alpert C.J., Mehta D.P., and Sapatnekar S.S. Handbook of Algorithms for Physical Design Automation. – Boston, MA: Auerbach, 2009.
5. Лебедев Б.К., Лебедев В.Б., Лебедев О.Б. Методы, модели и алгоритмы размещения. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015.
6. Jason Cong, Joseph R., Shinnerl u Min Xie (UCLA Computer Science), Tim Kong (Magma Design Automation) u Xin Yuan (IBM Corporation, Microelectronics Division). Large-Scale Circuit Placement // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems. – April 2005. – Vol. 10, No. 2.
7. Poli R. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimization // Journal of Artificial Evolution and Applications, Article ID 685175, 2008.
8. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
9. Wang X. Hybrid nature-inspired computation method for optimization: Doctoral Dissertation. – Helsinki University of Technology, TKK Dissertations, Espoo 2009. – 161 p.
10. Clerc M. Particle Swarm Optimization. – ISTE, London, UK, 2006.

11. *Kennedy J., Eberhart R.C.* Particle swarm optimization // In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995. – P. 1942-1948.
12. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедев В.Б.* Гибридный метод стохастической оптимизации на основе интеграции моделей эволюции и роевого (стадного) поведения животных в аффинных пространствах поиска // Сб. трудов Шестнадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2018. В 2 т. Т. 2. – М.: ФГП ИТАР-ТАСС филиал РКП, 2018. – С. 148-156.
13. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.О., Нагабедян А.А.* Гибридный роевой алгоритм глобальной оптимизации в аффинном пространстве поиска // Электронный журнал «Программные продукты, системы и алгоритмы». – 2019. – № 1.
14. *Lučić P., Teodorović D.* Computing with Bees: Attacking Complex Transportation Engineering Problems // International Journal on Artificial Intelligence Tools. – 2003. – No. 12. – P. 375-394.
15. *Quijano N., Passino K.M.* Honey Bee Social Foraging Algorithms for Resource Allocation: Theory and Application. – Columbus: Publishing house of the Ohio State University, 2007. – 39 p.
16. *Лебедев Б.К., Лебедев В.Б.* Размещение на основе метода пчелиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12. – С. 12-18.
17. *Cong J., Romesis M., and Xie M.* Optimality, Scalability and Stability Study of Partitioning and Placement Algorithms // Proc. of the International Symposium on Physical Design, Monterey, CA, April 2004. – P. 88-94.
18. MCNC. Electronic and Information Technologies (Online). Available: [www.mcnc.org](http://www.mcnc.org).
19. *Wang M., Yang X. and Sarrafzadeh M.* Dragon2000: Standard-cell Placement Tool for Large Industry Circuits // ICCAD 2000. – P. 260-263.
20. *Caldwell A.E., Kahng A.B. and Markov I.L.* Can Recursive Bisection Alone Produce Routable Placements? // DAC 2000. – P. 477-482.
21. *Chan T., Cong J., Kong T., Shinnerl J. u Sze K.* An enhanced multilevel algorithm for circuit placement // In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Aided Design (San Jose, Calif.). – IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, Calif. 2003.
22. *Yang X., Choi B.-K. and Sarrafzadeh M.* Routability-driven white space allocation for fixed-die standard-cell placement // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2003. – 22 (4). – P. 410-419.
23. CADENCE DESIGN SYSTEMS, INC. QPlace version 5.1.55, compiled on 10/25/1999. Envisia ultra-placer reference.

#### REFERENCES

1. *Kazennov G.* Osnovy proektirovaniya integral'nykh skhem i system [Fundamentals of designing integrated circuits and systems]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 20105.
2. *Tuchin A.V., Bormontov E.N., Ponomarev K.G.* Vvedenie v sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya integral'nykh mikroskhem [Introduction to computer-aided design of integrated circuits]. Voronezh: Izdatel'skiy dom VGU, 2017.
3. *Norenkov I.P.* Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya [Fundamentals of computer-aided design]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006.
4. *Alpert C.J., Mehta D.P., and Sapatnekar S.S.* Handbook of Algorithms for Physical Design Automation. Boston, MA: Auerbach, 2009.
5. *Lebedev B.K., Lebedev V.B., Lebedev O.B.* Metody, modeli i algoritmy razmeshcheniya [Methods, models and placement algorithms]. Rostov-on-Donu: Izd-vo YuFU, 2015.
6. *Jason Cong, Joseph R., Shinnerl u Min Xie (UCLA Computer Science), Tim Kong (Magma Design Automation) u Xin Yuan (IBM Corporation, Microelectronics Division).* Large-Scale Circuit Placement, *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*. April 2005, Vol. 10, No. 2.
7. *Poli R.* Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimization, *Journal of Artificial Evolution and Applications*, Article ID 685175, 2008.
8. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014.
9. *Wang X.* Hybrid nature-inspired computation method for optimization: Doctoral Dissertation. Helsinki University of Technology, TKK Dissertations, Espoo 2009, 161 p.
10. *Clerc M.* Particle Swarm Optimization. ISTE, London, UK, 2006.

11. Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization, *In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995, pp. 1942-1948.
12. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedev V.B. Gibrinnyy metod stokhasticheskoy optimizatsii na osnove integratsii modeley evolyutsii i roevogo (staynogo) povedeniya zhyvotnykh v affinnykh prostranstvakh poiska [A hybrid method of stochastic optimization based on the integration of models of evolution and swarm (packing) behavior of animals in affine search spaces], *Sb. trudov Shestnadsatoy natsional'noy konferentsii po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2018* [Proceedings of the Sixteenth National Conference on Artificial Intelligence with International Participation KII-2018]. In 2 vol. Vol. 2. Moscow: FGP ITAR-TASS filial RKP, 2018, pp. 148-156.
13. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.O., Nagabedian A.A. Gibrinnyy roevoy algoritm global'noy optimizatsii v affinnom prostranstve poiska [Hybrid swarm algorithm of global optimization in affine search space], *Elektronnyy zhurnal "Programmnye produkty, sistemy i algoritmy"* [Electronic journal "Software products, systems and algorithms"], 2019, No. 1.
14. Lučić P., Teodorović D. Computing with Bees: Attacking Complex Transportation Engineering Problems, *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 2003, No. 12, pp. 375-394.
15. Quijano N., Passino K.M. Honey Bee Social Foraging Algorithms for Resource Allocation: Theory and Application. Columbus: Publishing house of the Ohio State University, 2007, 39 p.
16. Lebedev B.K., Lebedev V.B. Razmeshchenie na osnove metoda pchelinoy kolonii [Placement based on the bee colony method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12, pp. 12-18.
17. Cong J., Romesis M., and Xie M. Optimality, Scalability and Stability Study of Partitioning and Placement Algorithms, *Proc. of the International Symposium on Physical Design, Monterey, CA, April 2004*, pp. 88-94.
18. MCNC. Electronic and Information Technologies (Online). Available: [www.mcnc.org](http://www.mcnc.org).
19. Wang M., Yang X. and Sarrafzadeh M. Dragon2000: Standard-cell Placement Tool for Large Industry Circuits, *ICCAD 2000*, pp. 260-263.
20. Caldwell A.E., Kahng A.B. and Markov I.L. Can Recursive Bisection Alone Produce Routable Placements?, *DAC 2000*, pp. 477-482.
21. Chan T., Cong J., Kong T., Shinnerl J. u Sze K. An enhanced multilevel algorithm for circuit placement, *In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Aided Design (San Jose, Calif.)*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, Calif. 2003.
22. Yang X., Choi B.-K. and Sarrafzadeh M. Routability-driven white space allocation for fixed-die standard-cell placement, *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2003, 22 (4), pp. 410-419.
23. CADENCE DESIGN SYSTEMS, INC. QPlace version 5.1.55, compiled on 10/25/1999. Envisia ultra-placer reference.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Г. Коробейников.

**Лебедев Борис Константинович** – Южный федеральный университет; e-mail: [lebedev.ob@mail.ru](mailto:lebedev.ob@mail.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: 89085135512; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; профессор.

**Лебедев Олег Борисович** – e-mail: [lebedev.ob@mail.ru](mailto:lebedev.ob@mail.ru); тел.: 89085135512; д.т.н.; доцент.

**Ганжур Марина Александровна** – Донской государственный технический университет; e-mail: [mganzhur@yandex.ru](mailto:mganzhur@yandex.ru); г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79081819111; кафедра вычислительных систем и информационной безопасности.

**Lebedev Boris Konstantinovich** – Southern Federal University; e-mail: [lebedev.ob@mail.ru](mailto:lebedev.ob@mail.ru); Taganrog, Russia; phone: +79085135512; the department of computer aided design; dr. of eng. sc.; professor.

**Lebedev Oleg Borisovich** – e-mail: [lebedev.ob@mail.ru](mailto:lebedev.ob@mail.ru); phone: +79085135512; dr. of eng. sc.; associate professor.

**Ganzhur Marina Aleksandrovna** – Don State Technical University; e-mail: [mganzhur@yandex.ru](mailto:mganzhur@yandex.ru); Rostov-on-Don, Russia; phone: +79081819111; the department of computer systems and information security.

**Б.А. Ашабоков, В.Н. Лесев, Г.В. Куповых, В.А. Шаповалов, М.А. Шериева**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО  
СОСТАВА АТМОСФЕРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ МАКРО- И  
МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ**

*В настоящее время физика облаков и активных воздействий на них постепенно переходит от этапа изучения "элементарных" облачных процессов к этапу изучения облаков в целом с учетом их системных свойств. Одним из направлений исследований на этом этапе становится изучение роли системных свойств облаков в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Именно эти свойства являются основными факторами, влияющими на формирование структуры облаков. В статье представлены некоторые результаты исследований роли одного из таких свойств облаков, а именно взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой (свойство иерархичности систем). В качестве способа их взаимодействия рассмотрен механизм, обусловленный аэрозольным составом атмосферы. Методика исследований основана на предположении, что на интенсивность образования кристаллов в облаках влияет содержание в атмосфере аэрозольных частиц достаточной концентрации, обладающих льдообразующими свойствами (ядер сублимации). Для расчетов использовалась трехмерная нестационарная модель конвективных облаков. Интенсивность образования кристаллов в облаке менялась путем варьирования значения параметра в выражении для источника кристаллов в модельных уравнениях для облачной среды. В работе также обсуждается современное состояние проблемы активных воздействий на конвективные облака с целью управления процессами осадкообразования. Для осуществления успешного активного воздействия необходимо определение локальной области в облаке, в которой условия благоприятны для воздействия и концентрации частиц реагента, которую следует обеспечить в данной области в каждый момент времени. Модельные расчеты показали, что незначительное увеличение содержания аэрозольных частиц в атмосфере привело к увеличению значений максимальной ледности и суммарной водности, а также ледности при одновременном уменьшении максимальной водности в облаке. При этом его макроструктурные характеристики практически не изменились. Дальнейшее решение задач требует разработки эффективных методологий моделирования активного воздействия на конвективные облака.*

*Конвективные облака; системные свойства; свойство иерархичности; механизм взаимодействия; аэрозольный состав атмосферы; моделирование; водность; ледность.*

**B.A. Ashabokov, V.N. Lesev, G.V. Kupovyh, V.A. Shapovalov, M.A. Sherieva**

**NUMERICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF THE AEROSOL  
COMPOSITION OF THE ATMOSPHERE ON THE FORMATION  
OF MACRO- AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS  
OF CONVECTIVE CLOUDS**

*Currently, the physics of clouds and active impacts on them is gradually moving from the stage of studying "elementary" cloud processes to the stage of studying clouds as a whole, taking into account their systemic properties. One of the directions of research at this stage is the study of the role of the system properties of clouds in the formation of their macro- and microstructural characteristics. These properties are the main factors influencing the formation of the cloud structure. The article presents some results of research on the role of one of these properties of clouds, namely the interaction of clouds with their surrounding atmosphere (the property of the hierarchy of systems). The mechanism caused by the aerosol composition of the atmosphere is considered as a method of their interaction. The research methodology is based on the assumption that the intensity of crystal formation in clouds is influenced by the content of aerosol particles of sufficient concentration in the atmosphere with ice-forming properties (sublimation nuclei). A three-*

*dimensional unsteady model of convective clouds was used for calculations. The intensity of crystal formation in the cloud was changed by varying the value of the parameter in the expression for the crystal source in the model equations for the cloud environment. The paper also discusses the current state of the problem of active impacts on convective clouds in order to control precipitation processes. In order to carry out successful active exposure, it is necessary to determine the local area in the cloud in which conditions are favorable for exposure and the concentration of reagent particles that should be provided in this area at any given time. Model calculations showed that a slight increase in the content of aerosol particles in the atmosphere led to an increase in the values of maximum ice content and total water content, as well as ice content, while simultaneously reducing the maximum water content in the cloud. At the same time, its macro-structural characteristics have practically not changed. Further solving the problems requires the development of effective methodologies for modeling active exposure to convective clouds.*

*Convective clouds; system properties; hierarchy property; interaction mechanism; aerosol composition of the atmosphere; modeling; water content; ice content.*

**Состояние вопроса.** В работе [1] было отмечено, что развитие физики облаков заметно замедлилось с начала 90-х годов прошлого столетия. Причина, по нашему мнению, заключается в том, что настоящий период времени является переходным для данного научного направления: происходит переход физики облаков от этапа исследования "элементарных" процессов в облаках к этапу изучения формирования их макро- и микроструктурных характеристик с учетом их системных свойств [1, 2].

В связи с этим одним из направлений исследований на наступающем этапе развития данного научного направления становится изучение роли взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой, являющейся для них вышестоящей системой (свойство иерархичности систем), а также роли взаимодействия процессов в облаках (эмерджентные свойства систем) в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Именно эти свойства являются основными структурообразующими факторами для облаков [3].

Механизмов взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой достаточно много. Поэтому возникает необходимость выделения основных из этих механизмов, а также необходимость разработки экономичных методологий, методов и моделей для их изучения. Отметим еще, что эти исследования связаны с анализом чрезвычайно большого объема информации, получающейся в результате численных экспериментов.

Сложнее обстоит дело с проведением исследований роли эмерджентных свойств облаков. Это можно объяснить тем, что выделение конкретных механизмов взаимодействия процессов в облаках встречает достаточно сложные трудности. Более перспективным в данном случае, по нашему мнению, является использование для этой цели проявлений взаимодействия процессов.

Говоря об исследовании роли системных свойств облаков нельзя еще не отметить, что агрегирование "элементарных" процессов в облаках возможно только в рамках численных моделей, что в значительной степени повышает роль математического моделирования в физике облаков – на следующих этапах оно становится основным методом исследования в физике облаков. Заметно повышаются требования и к моделям облаков. Отметим, что разработке многомерных численных моделей конвективных облаков в последние годы уделяется большое внимание. В качестве примера отметим, что в [1] приводится трехмерная нестационарная модель облаков с детальным учетом процессов, в [4] модель этих же облаков, но с параметризованной микрофизикой.

Количество публикаций по исследованию роли системных свойств облаков пока еще ограничено. Можно отметить работы [1, 2], в которых изложены некоторые результаты исследований роли структуры поля ветра в атмосфере на процессы

образования и развития грозоградовых облаков. Отметим еще, что в работе [1] приведены некоторые результаты исследований роли взаимодействия процессов в градовых облаках на формирование их макро- и микроструктурных характеристик.

Но тот факт, что от состояния атмосферы в существенной степени могут зависеть процессы облакообразования, был замечен относительно давно. В качестве примера можно отметить работы [5–11], в которых приводятся некоторые результаты исследований в этом направлении. При этом авторы этих работ не считали, что эти исследования относятся к новому этапу развития физики облаков. Исследования в работах [5,6,10] проводились путем натуральных наблюдений за процессами облакообразования при различных структурах поля ветра в атмосфере. Но важно заметить, что детальное исследование данного вопроса возможно только на основе численного моделирования. В работах [7–9, 11, 12] исследования были проведены на основе численного моделирования.

Как известно, переход научного направления от одного этапа развития к другому не может быть скачкообразным, иногда он может занимать достаточно много времени. Это относится и к физике облаков. До настоящего времени не все "элементарные" процессы в облаках изучены на достаточном уровне. Это касается, например, процессов образования первичных капель и кристаллов, процессов роста кристаллов, электризации облачных частиц и других. Недостаточно изучены и плохо формализуются процессы взаимодействия частиц реагентов с облачной средой. Такое состояние исследований этих и других процессов становится источником неопределенностей при моделировании облаков. Поэтому важнейшим направлением исследований в физике облаков и далее остается изучение тех процессов, которые остались недостаточно изученными.

Сложным и неоднозначным является состояние активных воздействий на конвективные облака с целью управления процессами осадкообразования. Используемые для этой цели технологии до настоящего времени, можно сказать, опираются не на методы, полученные в результате строгих исследований, а на концепции, предложенные в прошлом столетии. Но важно иметь в виду, что недостаточная изученность облачных процессов и связанная с ней ограниченность наших знаний о закономерностях формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков исключают возможности предложения научно обоснованной и эффективной концепции активного воздействия на такие сложные и нелинейные системы, как конвективные облака.

Поэтому с учетом повышения потребности в эффективных методах управления процессами осадкообразования в облаках переход к технологиям, основанным на научно обоснованных методах активного воздействия, становится чрезвычайно актуальной проблемой. Задачи, возникающие на пути разработки таких методов, условно можно сформулировать следующим образом:

- ◆ нахождение локальной области в облаке, в которой условия благоприятны для воздействия с целью достижения поставленной цели;
- ◆ определение концентрации частиц реагента, которую следует обеспечить в данной области в каждый момент времени.

Решение этих задач путем перебора различных вариантов внесения реагента в облако на основе математического моделирования будет встречать серьезные трудности. Особенно это касается второй задачи. Тем не менее, использование моделей облаков для решения данной проблемы пока еще сводится именно к такому способу. При этом для этой цели используются самые различные модели облаков [1, 12–14]. Поэтому серьезное внимание должно быть уделено развитию методологий для проведения исследований в этом направлении. Они должны быть основаны на широком использовании математического моделирования.

Исследования процессов системы «аэрозоль-облако», являющихся важнейшими из механизмов взаимодействия облаков с атмосферой и влияющих в том числе на формирование глобального климата, отражены в работах [15–20]. В настоящей работе приводятся некоторые результаты моделирования влияния на процессы облакообразования аэрозольного состава атмосферы.

**Метод и результаты исследований.** Исследование влияния аэрозольного состава атмосферы на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков, как и в работах [1, 2], проводилось на основе трехмерной нестационарной модели с детальным учетом процессов термогидродинамики и микрофизики. Размеры пространственной области при расчетах задавались от 40 до 80 км по горизонтали и 16 км – по вертикали. Шаг сетки по координатам  $X$ ,  $Y$  составлял 500-1000 м, по  $Z$  – 250-500 м. Ось  $X$  была направлена на восток,  $Y$  – на север,  $Z$  – по вертикали. Облако инициировалось заданием теплового импульса у поверхности земли с перегревом  $\Delta T = 1-4^\circ\text{C}$ . В качестве входных данных модели облака использовались результаты аэрологического зондирования атмосферы (аэропорт Минеральные Воды (08.15.2021)). Исследования проводились путем сравнения параметров исходного облака с параметрами модельных облаков, соответствующих различным вариантам содержания аэрозольных частиц в атмосфере, обладающих льдообразующими свойствами. Расчеты проводились для различных интенсивностей образования ледяных частиц в облаке, полученных путем варьирования скорости образования кристаллов в модели облака [1]:

$$I_2(\vec{r}, m, t) = \frac{\alpha(q_e(\vec{r}) - q_n(\vec{r})) \cdot \psi_1(\vec{r}, m)}{q_w(\psi_1)},$$

где  $q_e(\vec{r})$  – влажность воздуха и  $q_n(\vec{r})$  – влажность насыщенного водяного пара в точке  $(\vec{r})$ ;  $\alpha$  – параметр;  $\psi_1(\vec{r}, m)$  – распределение по массам кристаллов в той же точке;  $q_w(\psi_1)$  – суммарная лёдность заданного распределения ледяных частиц,  $\vec{r}$  соответствует координатам  $(x, y, z)$ .

Таким образом, методика проведения исследований основана на допущении, что интенсивность образования первичных кристаллов в облаках определяется содержанием аэрозольных частиц в атмосфере, которые могут сработать как ядра сублимации. В дальнейшем они могут сыграть роль ядер замерзания при взаимодействии с каплями. Интенсивность образования кристаллов менялась путем варьирования параметра  $\alpha$  в предыдущем выражении.

Остановимся на результатах расчетов развития облака, соответствующего данным зондирования атмосферы (исходного облака). Максимальные значения параметров облака и высоты над поверхностью земли, на которых они расположены, получились равными: водность  $3,10 \text{ г/м}^3$ ,  $H=7,35 \text{ км}$ ; лёдность  $3,48 \text{ г/м}^3$ ,  $H=9,63 \text{ км}$ ; суммарная водность и лёдность  $3,48 \text{ г/м}^3$ ,  $H=9,63 \text{ км}$ ; вертикальная скорость  $16,9$  ( $-14,3$ )  $\text{м/с}$ ,  $H=5,78$  ( $10,5$ )  $\text{км}$ ; коэффициент турбулентности  $1262,5 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $H=0,350 \text{ км}$ ; отражаемость ( $3,2 \text{ см}$ )  $20,7 \text{ дБZ}$ ,  $H=9,63 \text{ км}$ .

На рис. 1 приведена изоповерхность вертикальной составляющей скорости восходящих воздушных потоков в облаке ( $10,0 \text{ м/с}$ ) на фоне изолиний различных ее значений на 20-й минуте развития облака.

Значения таких параметров облака, как максимальные скорости восходящих и нисходящих потоков воздуха, а также высоты, на которых они расположены, были приведены выше. На рисунке можно заметить, что структура поля воздушных потоков в облаке носит достаточно сложный характер. Что касается положения максимальной скорости восходящих потоков воздуха над поверхностью земли, то наблюдалось незначительное уменьшение высоты, на которой она располо-

жена, в случае нисходящих потоков наблюдалась обратная тенденция: увеличение высоты над поверхностью земли, на которой расположена максимальное значение скорости нисходящих воздушных потоков.

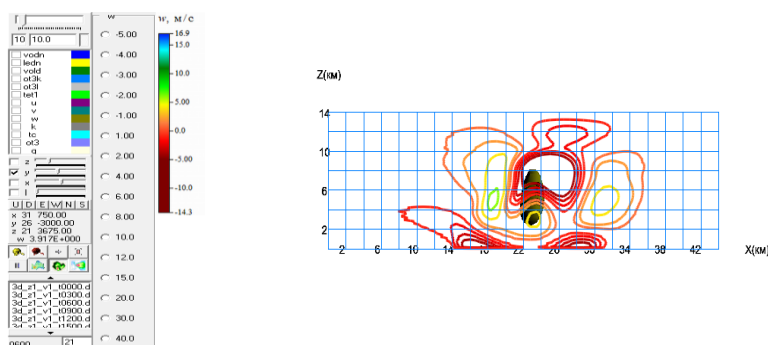
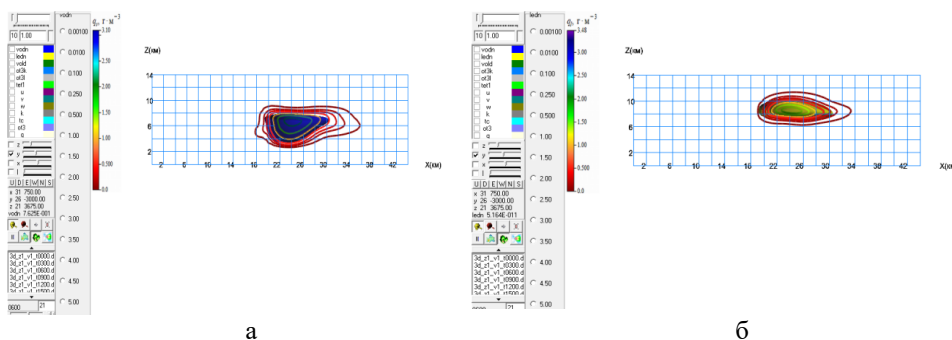


Рис. 1. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости 10,0 м/с на фоне изолиний различных ее значений в вертикальной плоскости на 20-й минуте

На рис. 2,а,б приводятся изоповерхности водности ( $1,0 \text{ г/м}^3$ ) и лёдности ( $1,0 \text{ г/м}^3$ ) в вертикальной плоскости, проходящей через середину облака, на 20-й минуте развития облака соответственно на фоне изолиний водности и лёдности.

Сравнение рис. 2,а,б показывает, что объём области, ограниченной изоповерхностью водности, в рассматриваемый момент времени больше объема области, ограниченной изоповерхностью лёдности. Отметим еще, что эти области пересекаются: нижняя граница первой области и верхняя граница второй не находятся на одном уровне. Это указывает на то, что, находясь в зоне восходящих воздушных потоков, капли и кристаллы интенсивно взаимодействуют между собой: с нижних слоев облака переохлажденные капли поступают в зону локализации кристаллов, то есть рост кристаллов происходит за счет захвата капель.



а

б

Рис. 2. Изоповерхности водности  $1,0 \text{ г/м}^3$  и лёдности  $1,0 \text{ г/м}^3$  соответственно на фоне изолиний водности и лёдности в вертикальной плоскости на 20-й минуте

Результаты расчетов максимальных значений параметров облака и их положения над поверхностью земли на 30-й минуте его развития приведены ниже: водность  $0,943 \text{ г/м}^3$ ,  $H=3,67 \text{ км}$ ; лёдность  $6,18 \text{ г/м}^3$ ,  $H=2,80 \text{ км}$ ; суммарная водность и лёдность  $6,52 \text{ г/м}^3$ ,  $H=2,63 \text{ км}$ ; вертикальная скорость  $7,27(-9,06) \text{ м/с}$ ,  $H=3,67(0,175) \text{ км}$ ; коэффициент турбулентности  $1465,2 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $H=0,350 \text{ км}$ ; отражаемость (3,2 см):  $61,7 \text{ д БЗ}$ ,  $H=2,10 \text{ км}$ .



Сравнение результатов расчетов этих параметров в различные моменты времени показало, что с течением времени, примерно до 20-й минуты развития облака, имело место увеличение их значений, а также расширение областей, охваченных вертикальными движениями воздуха.

Сравнение результатов расчетов максимальных значений параметров облака на 20-й и 30-й минутах его развития показывает, что на 30-й минуте развития облака наблюдается заметное уменьшение максимального значения влажности и некоторых других параметров облака, максимальное значение влажности, например, равно  $0,943 \text{ г/м}^3$ . Это свидетельствует о том, что развитие облака прекратилось.

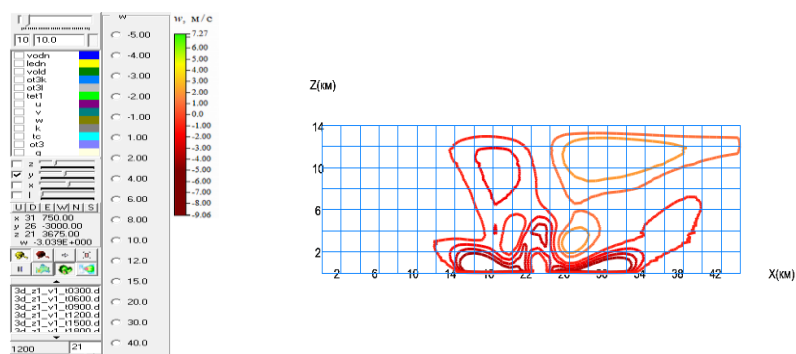


Рис. 3. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости  $10,0 \text{ м/с}$  на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости в вертикальной плоскости на 30-й минуте

На рис. 3 приводятся изолинии вертикальной составляющей скорости воздуха в облаке. Сравнение данного рисунка с рис. 1 показывает, что изоповерхность данного параметра, соответствующая значению скорости  $10,0 \text{ м/с}$  на рисунке 3 отсутствует, что связано с тем, что максимальное значение данного параметра в рассматриваемый момент времени равно  $7,27 (-9,06) \text{ м/с}$ , то есть оно меньше значения  $10,0 \text{ м/с}$ , для которого строилась изоповерхность.

Значения таких параметров облака, как максимальная скорость восходящих потоков воздуха и высота над поверхностью земли, на которой находится данный параметр, изменились в сторону уменьшения: с  $16,9 \text{ м/с}$  до  $7,27 \text{ м/с}$  в случае восходящих потоков воздуха и с  $-14,3 \text{ м/с}$  до  $-9,06 \text{ м/с}$  в случае нисходящих потоков.

Что касается максимального значения ледности в облаке, то в рассматриваемый момент времени она стала равна  $6,18 \text{ г/м}^3$ , то есть имеет место заметное увеличение данного параметра (с  $3,48 \text{ г/м}^3$  до  $6,18 \text{ г/м}^3$ ), а высота над поверхностью земли, на которой она расположена, наоборот, уменьшилась с  $H=9,63 \text{ км}$  до  $2,80 \text{ км}$ . Также имеет место заметное увеличение объема зоны локализации ледяных частиц в облаке. Отметим еще, что изолинии влажности и ледности в рассматриваемый момент времени достигают поверхности земли, что говорит о том, что из облака выпадают жидкие и твердые осадки.

Такие же расчеты были проведены и для момента времени, равного  $t=40 \text{ мин}$ . Не останавливаясь подробно на результатах расчетов, отметим, что и в этот момент времени продолжалось уменьшение параметров облака. Это указывает на то, что облако постепенно прекращает свое существование.

Остановимся на результатах расчетов параметров модельного облака, которое отличается от исходного облака большей интенсивностью процессов образования первичных кристаллов.

По результатам расчетов, максимальные значения параметров облака и их положения над поверхностью земли на 20-й минуте его развития оказались равными: водность  $3,07 \text{ г/м}^3$ ,  $H=7,18 \text{ км}$ ; ледность  $3,80 \text{ г/м}^3$ ,  $H=9,80 \text{ км}$ ; суммарная водность и ледность  $3,80 \text{ г/м}^3$ ,  $H=9,80 \text{ км}$ ; вертикальная скорость воздуха в облаке  $17,0 (-14,3) \text{ м/с}$ ,  $H=5,78 (10,5) \text{ км}$ ; коэффициент турбулентности  $1262,6 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $H=0,350 \text{ км}$ ; отражаемость (3,2 см)  $15,5 \text{ дБЗ}$ ,  $H=9,63 \text{ км}$ .

Сравнение максимальных значений параметров исходного и модельного облаков показывает, что увеличение интенсивности образования кристаллов в модельном облаке привело к некоторому снижению максимального значения водности при одновременном увеличении ледности. Таким же образом в модельном облаке наблюдается увеличение более быстрыми темпами максимальной суммарной водности и ледности. Причина такого поведения этих параметров, по нашему мнению, заключается в том, что появление дополнительных кристаллов в модельном облаке ухудшило условия роста капель из-за ограниченности водяного пара.

По результатам расчетов, структура поля вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в облаке носит достаточно сложный характер, кроме этого, структуры полей данного параметра в исходном и модельном облаках практически одинаковы. Это указывает на то, что увеличение интенсивности образования ледяных кристаллов и связанные с ним изменения в микроструктуре модельного облака заметно не повлияли на формирование поля вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в рассматриваемый момент времени.

На рис. 4 приведены изоповерхности водности  $1,0 \text{ г/м}^3$  и ледности  $1,0 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний данного же параметра на 20-й минуте развития модельного облака.

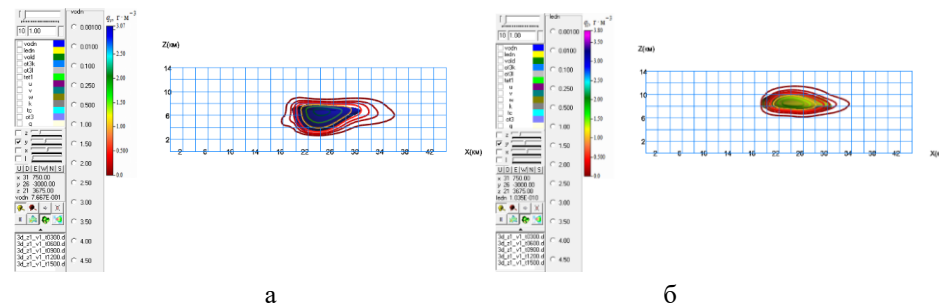


Рис. 4. Изоповерхности водности  $1,0 \text{ г/м}^3$  (а) и ледности  $1,0 \text{ г/м}^3$  (б) на фоне изолиний водности и ледности соответственно в вертикальной плоскости на 20-й минуте развития модельного облака

Таким же образом сравнение рис. 2 и 4 показывает, что, несмотря на некоторое уменьшение водности в модельном облаке, объем области, ограниченной изоповерхностью водности  $1,0 \text{ г/м}^3$ , практически не изменился. В случае ледности в модельном облаке наблюдается увеличение как максимального ее значения, так и объема области, ограниченной изоповерхностью данного параметра.

Максимальные значения параметров модельного облака и значения высот над поверхностью земли, на которых они расположены, на 30-й минуте его развития получились равными: водность  $0,935 \text{ г/м}^3$ ,  $H=3,67 \text{ км}$ ; ледность  $6,43 \text{ г/м}^3$ ,  $H=2,97 \text{ км}$ ; суммарная водность и ледность  $6,77 \text{ г/м}^3$ ,  $H=2,80 \text{ км}$ ; вертикальная скорость воздуха в облаке и ее положение:  $7,27 (-9,06) \text{ м/с}$ ,  $H=3,67 (0,175) \text{ км}$ ; коэффициент турбулентности  $1465,1 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $H=0,350 \text{ км}$ ; отражаемость (3,2см)  $62,1 \text{ дБЗ}$ ,  $H=1,92 \text{ км}$ .

По сравнению с предыдущим моментом времени максимальные значения некоторых параметров облака заметно изменились. Максимальное значение водности, например, уменьшилось более чем в три раза. В то же время максимальное

значение лёдности увеличилась примерно в 1,7 раз, максимальное значение вертикальной скорости воздуха уменьшилась с 17,0 м/с до 7,27 м/с. Изменения претерпели и другие параметры облака.

Сравнение полученных значений параметров с значениями параметров исходного облака на 30-й минуте развития показывает, что значение максимальной водности в модельном облаке, хотя и незначительно, но меньше, чем в исходном облаке:  $0,935 \text{ г/м}^3$  и  $0,943 \text{ г/м}^3$  соответственно. Что касается максимальных значений таких параметров, как лёдность и суммарная водность - лёдность, то они выше в модельном облаке, чем в исходном: соответственно  $6,43 \text{ г/м}^3$  и  $6,18 \text{ г/м}^3$  для лёдности и  $6,77 \text{ г/м}^3$  и  $6,52 \text{ г/м}^3$  для суммарной водности - лёдности. Максимальные значения остальных параметров получились одинаковыми или близкими.

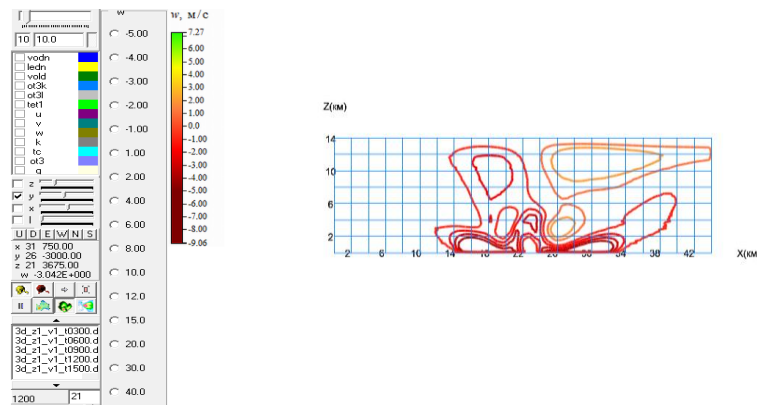


Рис. 5. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости 10,0 м/с на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости в вертикальной плоскости на 30-й минуте

На рис. 5 приводятся изолинии вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в модельном облаке на 30-й минуте развития облака. Максимальные значения скорости воздуха в восходящих и нисходящих потоках в облаке, а также положения этих параметров в облаке равны:  $7,27(-9,06) \text{ м/с}$ ,  $H=3,67(0,175) \text{ км}$ . В данный момент времени, как и в исходном облаке, изоповерхность вертикальной составляющей скорости 10,0 м/с в облаке отсутствует.

Сравнение рис. 3 и 5 показывает, что изменение интенсивности образования кристаллов в облаке не оказало заметного влияния как на структуру поля вертикальных воздушных потоков, так и на максимальные значения скоростей вертикальных движений воздуха.

Такие же расчеты проводились и для  $t=40$  мин развития облака. Не останавливаясь подробно на результатах расчетов, отметим, что, как и в случае исходного облака, примерно с этого момента наблюдается уменьшение параметров модельного облака.

**Заключение.** В работе в краткой форме затронуто современное состояние физики облаков и активных воздействий на них. Отмечено, что современный этап ее развития является переходным: происходит переход от этапа исследования "элементарных" процессов в облаках к этапу исследования облаков в целом с учетом их системных свойств. Изложены основные направления развития данного научного направления на следующем этапе его развития, к которым относится исследование роли системных свойств облаков в формировании их макро- и микроструктурных характеристик.

Результаты моделирования образования и развития конвективных облаков для различных вариантов содержания в атмосфере аэрозольных частиц, обладающих льдообразующими свойствами, показали, что данная характеристика атмосферы является одним из механизмов, посредством которого осуществляется взаимодействие облаков с окружающей их атмосферой, а также одним факторов, влияющих на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков.

По результатам расчетов, незначительное увеличение содержания отмеченных аэрозольных частиц в атмосфере привело к увеличению таких параметров облака, как максимальная лёдность, максимальная суммарная водность и лёдность при одновременном уменьшении максимальной водности в облаке. В то же время оно практически не повлияло на его макроструктурные характеристики.

В дальнейшем с целью получения более детальных данных о роли аэрозольного состава атмосферы в формировании макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков и активного воздействия на них планируется продолжение разработки эффективных методологий моделирования облачных процессов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Физика облаков и активных воздействий на них. – Нальчик: Печатный двор, 2017. – 240 с.
2. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Kalov K.M., Kalov R.K., Tashilova A.A. and Shapovalov V.A. Mathematical Modeling of the Influence of the Wind Field Structure in the Atmosphere on the Cloud Formation Processes // Atmospheric and Climate Sciences. – 2018. – 8. – P. 84-96.
3. Месарович М., Такахага Я. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 381 с.
4. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Вып. 282. – СПб.: Гидрометеоздат, 2016. – С. 45-91.
5. Ковальчук А.Н. О влиянии ветрового сдвига на выпадение града // Тр. Высокотурбидного геофизического института. – Вып. 14. – М.: Гидрометеоздат, 1969. – С. 39-48.
6. Мальбахова Н.М. Взаимосвязь структуры градовых облаков с вертикальной структурой ветра в атмосфере // Тр. Высокотурбидного геофизического института. – Вып. 80. – М.: Гидрометеоздат, 1990. – С. 99-106.
7. Ньютон Ч.У. Гидродинамическое взаимодействие с окружающим полем ветра как один из факторов развития кучевых облаков // Динамика кучевых облаков. – М.: Мир, 1964. – С 187-201.
8. Пастушков Р.С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой // Тр. Центральной аэрологической обсерватории. – Вып. 108. – М.: Гидрометеоздат, 1972. – С. 93-97.
9. Пастушков Р.С. О развитии кучевых облаков в атмосфере с вертикальным сдвигом ветра // Метеорология и гидрология. – 1969. – № 4. – С. 26-41.
10. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеоздат, 1991. – 425 с.
11. Tompkins A.M. Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: The Role of Cold Pools // Journal of the atmospheric sciences. – 2001. – Vol. 58, No. 13. – P. 1650-1672.
12. Tompkins A.M., and Semie A.G. Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: Role of Updraft Entrainment // Journal Adv. Model. Earth Syst. – 2017. – 9. – P. 1046-1068.
13. Владимиров С.А., Пастушков Р.С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трехмерное численное моделирование // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Вып. 582. – СПб.: Гидрометеоздат, 2016. – С. 116-127.
14. Пастушков Р.С. Модель активных воздействий на конвективные облака льдообразующими аэрозолями // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Вып. 582. – СПб.: Гидрометеоздат, 2016. – С.128-157.

15. Zhang S., Wang M., Ghan S. J., Ding A., Wang H., Zhang K., Neubauer D., Lohmann U., Ferrachat S., Takeamura T., Gettelman A., Morrison H., Lee Y., Shindell D.T., Partridge D. G., Stier P., Kipling Z., Fu C. On the characteristics of aerosol indirect effect based on dynamic regimes in global climate models // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2016. – Vol. 16. – P. 2765-2783.
16. Miltenberger A.K. et al. Aerosol-cloud interactions in mixed-phase convective clouds–Part 2: Meteorological ensemble // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2018. – Vol. 18, No. 14. – P. 0593-10613.
17. Altaratz O., Koren I., Remer L.A., Hirsch E. Review: Cloud invigoration by aerosols – coupling between microphysics and dynamics // *Atmospheric Research*. – 2014. – 140-141. – P. 38-60.
18. Fan J., Wang Y., Rosenfeld D., Liu X. Review of Aerosol-Cloud Interactions: Mechanisms, Significance, and Challenges // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2016. – 73. – P. 4221-4252.
19. Lee S.S. Effect of Aerosol on Circulations and Precipitation in Deep Convective Clouds // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – 69. – P. 1957-1974.
20. Tao W.K., Chen J.-P., Li Z., Wang C., Zhang C. Impact of aerosols on convective clouds and precipitation // *Reviews of Geophysics*. – 2012. – Vol. 50, RG2001. – 62 p.

## REFERENCES

1. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Shapovalov V.A. Fizika oblakov i aktivnykh vozdeystviy na nikh [Physics of clouds and active influences on them]. Nal'chik; Pechatnyy dvor, 2017, 240 p.
2. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Kalov K.M., Kalov R.K., Tashilova A.A. and Shapovalov V.A. Mathematical Modeling of the Influence of the Wind Field Structure in the Atmosphere on the Cloud Formation Processes, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2018, 8, pp. 84-96.
3. Mesarovich M., Takakhara Ya. Obschchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy [General theory of systems: mathematical foundations]. Moscow: Mir, 1978, 381 p.
4. Veremey N.E., Dovgalyuk Yu.A., Zatevakhin M.A., Ignat'ev A.A., Morozov V.N., Pastushkov R.S. Opisanie bazovoy chislennoy nestatsionarnoy trekhmernoy modeli konvektivnogo oblaka [Description of the basic numerical non-stationary three-dimensional model of a convective cloud], *Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeikova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory. A.I. Voeikova]. Vol. 282. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2016, pp. 45-91.
5. Koval'chuk A.N. O vliyaniy vetrovogo sdviga na vypadenie grada [On the effect of wind shear on hail], *Tr. Vysokogornogo geofizicheskogo instituta* [Proceedings of the High Mountain Geophysical Institute], Vol. 14. Moscow: Gidrometeoizdat, 1969, pp. 39-48.
6. Mal'bakhova N.M. Vzaimosvyaz' struktury gradovykh oblakov s vertikal'noy strukturoy vetra v atmosfere [Relationship between the structure of hail clouds and the vertical structure of the wind in the atmosphere], *Tr. Vysokogornogo geofizicheskogo instituta* [Proceedings of the High Mountain Geophysical Institute], Vol. 80. Moscow: Gidrometeoizdat, 1990, pp. 99-106.
7. N'yuton Ch.U. Gidrodinamicheskoe vzaimodeystvie s okruzhayushchim polem vetra kak odin iz faktorov razvitiya kuchevykh oblakov [Hydrodynamic interaction with the surrounding wind field as one of the factors in the development of cumulus clouds], *Dinamika kuchevykh oblakov* [Dynamics of cumulus clouds]. Moscow: Mir, 1964, pp 187-201.
8. Pastushkov R.S. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya konvektivnykh oblakov s okruzhayushchey ikh atmosferoy [Numerical modeling of the interaction of convective clouds with their surrounding atmosphere], *Tr. Tsentral'noy aerologicheskoy observatorii* [Proceedings of the Central Aerological Observatory], Vol. 108. Moscow: Gidrometeoizdat, 1972, pp. 93-97.
9. Pastushkov R.S. O razvitiy kuchevykh oblakov v atmosfere s vertikal'nym sdvigom vetra [On the development of cumulus clouds in an atmosphere with vertical wind shear], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 1969, No. 4, pp. 26-41.
10. Fedchenko L.M., Goral' G.G., Belentsova V.A., Mal'bakhova N.M. Opasnye konvektivnye yavleniya i ikh prognoz v usloviyakh slozhnogo rel'efa [Dangerous convective phenomena and their forecast in conditions of complex relief]. Moscow: Gidrometeoizdat. 1991, 425 p.
11. Tompkins A.M. Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: The Role of Cold Pools, *Journal of the atmospheric sciences*, 2001, Vol. 58, No. 13, pp. 1650-1672.
12. Tompkins A.M., and Semie A.G. Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: Role of Updraft Entrainment, *Journal Adv. Model. Earth Syst.*, 2017, 9, pp. 1046-1068.

13. *Vladimirov S.A., Pastushkov R.S.* Kompleksnyy metod aktivnykh vozdeystviy na konvektivnye oblaka s tsel'yu regulirovaniya osadkov. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie [A complex method of active influences on convective clouds in order to regulate precipitation. Three-dimensional numerical modeling], *Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory. A.I. Voeykova], Vol. 582. St. Petersburg Gidrometeoizdat, 2016, pp. 116-127.
14. *Pastushkov R.S.* Model' aktivnykh vozdeystviy na konvektivnye oblaka l'dobrazuyushchimi aerolyami [Model of active influences on convective clouds by ice-forming aerosols], *Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory. A.I. Voeykova], Vol. 582. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2016, pp. 128-157.
15. *Zhang S., Wang M., Ghan S. J., Ding A., Wang H., Zhang K., Neubauer D., Lohmann U., Ferrachat S., Takeamura T., Gettelman A., Morrison H., Lee Y., Shindell D.T., Partridge D. G., Stier P., Kipling Z., Fu C.* On the characteristics of aerosol indirect effect based on dynamic regimes in global climate models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, Vol. 16, pp. 2765-2783.
16. *Miltenberger A.K. et al.* Aerosol-cloud interactions in mixed-phase convective clouds—Part 2: Meteorological ensemble, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, Vol. 18, No. 14, pp. 0593-10613.
17. *Altaratz O., Koren I., Remer L.A., Hirsch E.* Review: Cloud invigoration by aerosols – coupling between microphysics and dynamics, *Atmospheric Research*, 2014, 140-141, pp. 38-60.
18. *Fan J., Wang Y., Rosenfeld D., Liu X.* Review of Aerosol-Cloud Interactions: Mechanisms, Significance, and Challenges, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73, pp. 4221-4252.
19. *Lee S.S.* Effect of Aerosol on Circulations and Precipitation in Deep Convective Clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69, pp. 1957-1974.
20. *Tao W.K., Chen J.-P., Li Z., Wang C., Zhang C.* Impact of aerosols on convective clouds and precipitation, *Reviews of Geophysics*, 2012, Vol. 50, RG2001, 62 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Петров.

**Ашабоков Борис Азреталиевич** – Высокогорный геофизический институт; e-mail: ashabokov.boris@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 88662404841; д.ф.-м.н.; профессор; зав. отделом физики облаков; зав. отделом в «ИИПРУ КБНЦ РАН».

**Шаповалов Виталий Александрович** – e-mail: vet555\_83@mail.ru; тел.: 89187855350; д.ф.-м.н.; зав. лабораторией математического моделирования.

**Шериева Марианна Азреталиевна** – e-mail: ryer16@yandex.ru; м.н.с.

**Лесев Вадим Николаевич** – Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова; e-mail: pr\_ur@kbsu.ru; г. Нальчик, Россия; к.ф.-м.н.; доцент; и.о. первого проректора.

**Куповых Геннадий Владимирович** – Южный федеральный университет; e-mail: kupovых@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89289543642; д.ф.-м.н.; профессор; зав. кафедрой высшей математики.

**Ashabokov Boris Azretalievich** – High Mountain Geophysical Institute; e-mail: ashabokov.boris@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: 88662404841; dr. of phys. and math. sc.; professor; head of the department of cloud physics.

**Shapovalov Vitaly Alexandrovich** – e-mail: vet555\_83@mail.ru; phone: +79187855350; dr. of phys. and math. sc.; head of the laboratory of mathematical modeling.

**Sherieva Marianna Azretalievna** – e-mail: ryer16@yandex.ru; junior researcher.

**Lesev Vadim Nikolaevich** – Kh.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University; e-mail: pr\_ur@kbsu.ru; Nalchik, Russia; cand. of phys. and math. sc.; associate professor; acting first vice-rector.

**Kupovyh Gennady Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: kupovych@sfdu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79289543642; dr. of phys. and math. sc.; professor; head of the department of higher mathematics.

**Е.В. Павлов, А.Ю. Баранник, А.В. Лагутина, В.И. Ершов**

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МНОГОРЕЖИМНОГО  
ПОЖАРОТУШЕНИЯ В ЧС**

*Целью исследования является оценка технико-экономической эффективности робототехнического комплекса, предназначенного для ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного характера, связанных с необходимостью ликвидации возгораний. Данные ЧС могут возникать, прежде всего при радиационных и химических авариях, а также при авариях на взрывопожароопасных объектах. Ликвидация таких ЧС, как правило связана с повышенным риском для пожарных и спасателей и требует применения тяжелой техники. Предлагается разработать и использовать робототехнический комплекс многорежимного пожаротушения (РТК-ПМ) в следующем составе; шесть специализированных робототехнических средств с возможностью экипажного и дистанционного управления, в том числе: разграждения (РТС-РЗ), пожарное (РТС-П), высотное (РТС-ВС), рукавное (РТС-РК), насосное (РТС-НС) и заправки (РТС-ЗВ); подвижный пункт управления; машины обеспечения. При этом актуальной проблемой является разработка подходов к оценке технико-экономической эффективности робототехнических средств и комплексов применяемых для ликвидации чрезвычайных ситуаций. Предлагается методика проведения таких исследований на основе двухуровневой количественно-качественной сравнительной оценки по показателям технической и экономической эффективности выполнения задачи. Для оценки технической эффективности в качестве основных показателей предлагается рассматривать время развертывания, время тушения пожара, время на выполнение задачи, количество огнетушащих веществ. В качестве критериев технической эффективности предлагается оценивать коэффициент оперативности выполнения задачи, коэффициент мобильности развертывания; коэффициент оперативности тушения пожара; степень эффективности роботизации РТК. Качественное сравнение заключается в выявлении видов работ, доступных одному из сравниваемых комплексов и недоступных другому. Оценка экономической эффективности РТК осуществляется по величине годового экономического эффекта от производства и использования единицы комплекса. Как и оценка технической эффективности рассматриваемая оценка также является сравнительной – показывает преимущество (или недостаток) над заменяемым (базовым) комплексом. Также представлены результаты применения данной методики при расчете эффективности перспективного робототехнического комплекса многорежимного пожаротушения, которые показывают, что применение одного робототехнического комплекса многорежимного пожаротушения позволит получать экономический эффект в размере 1,39 млн руб. в год.*

*Робототехнический комплекс; техническая эффективность; тушение пожара; экономическая эффективность; методика; дистанционный режим.*

**E.V. Pavlov, A.Yu. Barannik, A.V. Lagutina, V.I. Ershov**

**TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF APPLICATION  
OF ROBOTIC COMPLEX OF MULTI-MODE FIRE EXTINGUISHING  
IN EMERGENCIES**

*The aim of the study is to evaluate the technical and economic efficiency of a robotic complex designed to eliminate man-made emergencies associated with the need to eliminate fires. These emergencies can occur, first of all, in radiation and chemical accidents, as well as in accidents at fire and explosion hazardous facilities. The elimination of such emergencies, as a rule, is associated with an increased risk for firefighters and rescuers and requires the use of heavy equipment. It is proposed to develop and use a robotic complex for multi-mode fire extinguishing (RTK-PM) in the following composition; six specialized robotic means with the possibility of crew and remote control, including: barriers (RTS-RZ), fire (RTS-P), high-rise (RTS-VS), sleeve (RTS-RK), pumping (RTS-NS) and gas stations (RTS-ZV); mobile control point; supply machines. At the same time, the actual problem is the development of approaches to as-*

*sessing the technical and economic efficiency of robotic tools and complexes used to eliminate emergency situations. A technique for conducting such studies is proposed on the basis of a two-level quantitative-qualitative comparative assessment in terms of technical and economic efficiency of the task. To assess the technical efficiency, it is proposed to consider the deployment time, the time to extinguish the fire, the time to complete the task, the amount of fire extinguishing agents as the main indicators. As criteria for technical efficiency, it is proposed to evaluate the coefficient of efficiency of the task, the coefficient of deployment mobility; coefficient of fire extinguishing efficiency; the degree of efficiency of RTC robotization. Qualitative comparison consists in identifying the types of work available to one of the compared complexes and inaccessible to another. The evaluation of the economic efficiency of the RTK is carried out by the value of the annual economic effect from the production and use of a unit of the complex. Like the assessment of technical efficiency, the assessment under consideration is also comparative - it shows an advantage (or disadvantage) over the replaced (basic) complex. Also presented are the results of applying this technique when calculating the effectiveness of a promising robotic complex for multi-mode fire extinguishing, which show that the use of one robotic complex for multi-mode fire extinguishing will provide an economic effect in the amount of 1.39 million rubles. in year.*

*Robotic complex; technical efficiency; fire extinguishing; economic efficiency; methodology; remote mode.*

**Введение.** Угроза возникновения техногенных крупномасштабных чрезвычайных ситуаций (ЧС), ликвидация последствий которых, как правило, связана с наличием условий особого риска, при которых существует реальная угроза для жизни человека, продолжает оставаться весьма актуальным фактором [1–5]. К таким ЧС относятся радиационные аварии, химические аварии, аварии на взрывопожароопасных объектах, при тушении пожаров, на которых потребуются применение робототехнических средств (РТС) и особых технологий, в основе которых лежит использование защищенной передвижной пожарной техники.

Специализированное РТС должно иметь следующее конструктивное построение: базовое шасси танка Т-72; рабочее оборудование модульного или встроенного типа; специальные системы защиты и жизнеобеспечения; систему управления, включающую бортовую аппаратуру управления и индивидуальный пульт управления [6–10].

Режимы тушения пожаров, которые предусматривается реализовать в РТК-ПМ, условно объединяются в две группы: режимы разового цикла пожаротушения возимым запасом воды и режимы длительного пожаротушения с использованием водоемов.

Эффективность применения РТК-ПМ предлагается оценивать его возможностями по площадному темпу пожаротушения объекта при обеспечении нормируемой интенсивности подачи воды на цели пожаротушения [11, 12]. С помощью этой величины, в свою очередь, определяются и возможности по продолжительности тушения пожара. Кроме того, важной величиной, определяющей возможности комплекса при реализации режимов разового цикла, является площадь пожаротушения.

**Формальная постановка задачи.** В общем случае основными параметрами, используемыми для оценки эффективности средств пожаротушения, являются время развертывания  $T$  и количество подаваемых огнетушащих веществ  $Q$ . Таким образом оценка технико-экономической эффективности производится на основе сравнения данных показателей и стоимости образцов.

Однако для оценки технико-экономической эффективности средств ЧС техногенного характера, сопровождаемых пожарами, в том числе радиационных, химических, аварии на взрывопожароопасных объектах, требуются специальные технологии, а, следовательно, и другие подходы к оценке применяемых средств.

В основу технико-экономической оценки эффективности применения робототехнического комплекса многорежимного пожаротушения (РТК-ПМ) положена двухуровневая количественно-качественная сравнительная оценка предлагаемой к разработке и традиционной, принятой в качестве лучшей, техники по основным по-



казателям эффективности выполнения задач пожаротушения. В настоящей работе предлагаемый к разработке РТК-ПМ сравнивается с робототехническим комплексом «Кедр» (РТК «Кедр»). Используемая модель оценки, структура которой представлена на рис. 1, разработана на основе систематизации определяющих положений, обоснованных в научных работах [13–15] под руководством д.т.н. Северова Н.В.

Двухуровневая оценка включает сравнение комплексов отдельно по показателям технической и экономической эффективности выполнения задачи тушения пожара.

**Подзадача оценка технической эффективности.** Оценка технической эффективности применения РТК-ПМ осуществляется по количественным критериям и качественным сравнением.

При количественной оценке учитываются времена разворачивания  $t_p$ ,  $t_r$  (соответственно для РТК-ПМ и РТК «Кедр») и тушения пожара  $t_T$ ,  $t_r$ , а также затрачиваемое на выполнение задачи количество огнетушащих веществ  $Q_v$ . В качестве критериев технической эффективности РТК-ПМ выступают:

$$K_{вз} = \frac{\tau_{вз}}{t_{вз}} - \text{коэффициент оперативности выполнения задачи, где } \tau_{вз} = \tau_p + t_T,$$

$t_{вз} = t_p + t$  – времена выполнения задачи;

$$K_m = \frac{\tau_p}{t_p} - \text{коэффициент мобильности разворачивания;}$$

$$K_T = \frac{\tau_T}{t_T} - \text{коэффициент оперативности тушения пожара;}$$

$S_{п РТК}$  – степень эффективности роботизации РТК по показателю П, где П –  $\tau_{вз}$ ,  $t_{вз}$ ,  $\tau_p$ ,  $t_p$ ,  $\tau_{вз}$ ,  $t_{вз}$ .

Степень эффективности роботизации РТС или РТК  $S_{п}$  по сравниваемому показателю П определяется в соответствии с математическим выражением [16, 17]:

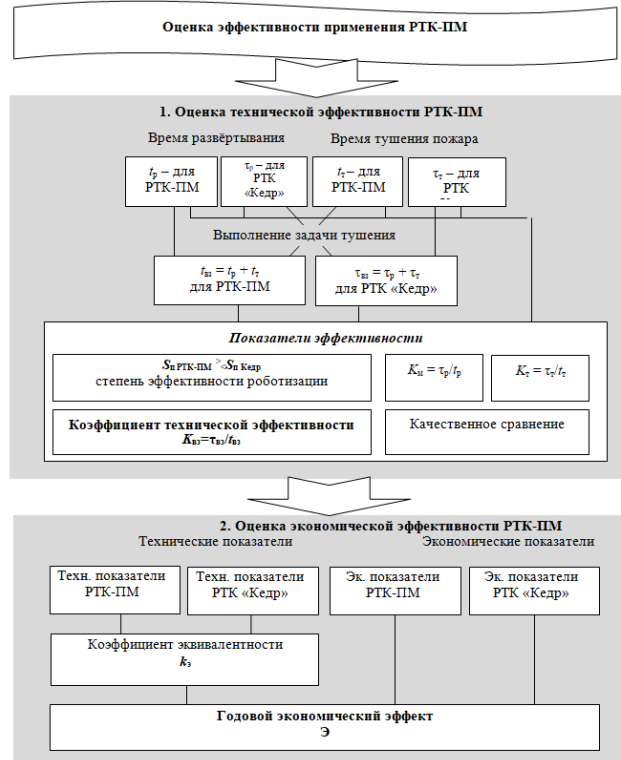


Рис. 1. Структура модели оценки эффективности применения пожарного РТК-ПМ в ЧС

$$S_{\text{п РТК}} = \frac{\Pi_{\text{ДУ}}^{\text{ЧС}} - \Pi_{\text{ЭК}}^{\text{ЧС}}}{\Pi_{\text{ЭК}}^{\text{НУ}}}, \quad (1)$$

где  $\Pi_{\text{ДУ}}^{\text{ЧС}}$  – значение, принимаемое показателем П в условиях ЧС при дистанционном управлении РТК;

$\Pi_{\text{ЭК}}^{\text{ЧС}}$  – значение, принимаемое показателем П в условиях ЧС при экипажном режиме управления РТС;

$\Pi_{\text{ЭК}}^{\text{НУ}}$  – значение, принимаемое показателем П в нормальных условиях при отсутствии поражающего действия при экипажном режиме управления РТК.

В качестве показателей П, по которым оценивается степень эффективности роботизации, принимаются: время развёртывания, тушения пожара, выполнения задачи РТС (или РТК). Сравнение эффективности роботизации можно также производить по объёму  $Q_{\text{вз РТК-ПМ}}$  ( $Q_{\text{вз Кедр}}$ ), производительности  $V_{\text{вз РТК-ПМ}} = \frac{Q_{\text{вз}}}{t_{\text{вз}}}$  ( $V_{\text{вз Кедр}} = \frac{Q_{\text{вз}}}{\tau_{\text{вз}}}$ ) и вероятности  $P_{\text{вз РТК-ПМ}}$  ( $P_{\text{вз Кедр}}$ ) выполнения задачи.

Качественное сравнение заключается в выявлении видов работ, доступных одному из сравниваемых комплексов и недоступных другому.

**Подзадача оценка экономической эффективности.** Оценка экономической эффективности РТК-ПМ осуществляется по величине годового экономического эффекта от производства и использования единицы комплекса, установленного инструкцией [6, 7]. При оценке экономической эффективности РТК-ПМ по годовому экономическому эффекту наряду с экономическими показателями (себестоимостью, капиталовложениями и текущими эксплуатационными затратами) посредством использования коэффициента эквивалентности  $k_3$  могут учитываться:

- ◆ технические преимущества (энерговооруженность, габаритные размеры, динамические характеристики и т.д.);
- ◆ результаты эксплуатации (долговечность, надежность, точность действий и т.д.);
- ◆ уровень механизации и автоматизации, простота и безопасность эксплуатации, удобство ремонта и технического обслуживания.

Как и оценка технической эффективности рассматриваемая оценка также является сравнительной – показывает преимущество (или недостаток) над заменяемым (базовым) комплексом.

Годовой экономической эффект от производства и использования РТК-ПМ определяем по формуле:

$$\mathcal{E} = \left[ 3_1 k_3 \cdot \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} + \frac{(I_1 \cdot k_3 - I_2) - E_n \cdot (K_2^1 - K_1^1)}{P_2 + E_n} - 3_2 \right] k_n, \quad (2)$$

где  $3_1$  и  $3_2$  – приведенные затраты единицы, соответственно, базовой и новой модели техники, руб.;

$k_3$  – коэффициент эквивалентности;

$\frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}$  – коэффициент учета изменения срока службы новой техники по сравнению с базовой;

$P_1$  и  $P_2$  – доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление базовой и новой техники. Устанавливаются с учетом срока службы  $t_c$ . Для  $t_c = 5$  лет  $P = 0,1638$ ;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, установлен  $E_n = 0,15$ ;

$\frac{(I_1 \cdot k_3 - I_2) - E_n \cdot (K_2^1 - K_1^1)}{P_2 + E_n}$  – экономия потребителя на текущих издержках эксплуатации и отчислениях от сопутствующих капитальных вложений за весь срок службы нового технического решения по сравнению с базовым, руб.;

$K_2^1$  и  $K_1^1$  – сопутствующие капитальные вложения потребителя по сравниваемым вариантам, руб.;

$I_1$  и  $I_2$  – годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании сравниваемых вариантов, руб.;

$k_n$  – коэффициент годового использования внедряемой техники. Для РТК-ПМ  $k_n = 0,02$ .

Коэффициент эквивалентности  $k_э$ , определяется по формуле:

$$k_э = \alpha_1 q_1 + \alpha_2 q_2 + \dots + \alpha_N q_N, \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент значимости  $i$ -того относительного показателя,  $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N = 1$ ;

$q_i = \Pi_{i2} / \Pi_{i1}$  –  $i$ -ый относительный показатель;

$\Pi_{i1}$  и  $\Pi_{i2}$  –  $i$ -ый показатель базового и внедряемого комплекса (энерговооруженность, емкость цистерны, производительность насоса и т.д.);

$N$  – количество учитываемых показателей.

**Результаты расчетов.** В соответствии с представленной выше методикой исходным материалом для оценки технической эффективности РТК-ПМ являются величины времени развертывания и тушения пожаров данного комплекса и взятого для сравнения РТК «Кедр».

В ходе настоящей оценки указанные величины определялись посредством статистической обработки данных, полученных:

- ♦ в ходе натурных экспериментов, проводимых при отсутствии поражающего действия при экипажном режиме управления РТК ( $t_{рЭК}^{НУ}$ ,  $t_{тЭК}^{НУ}$ ,  $t_{рЭК}^{НУ}$ ,  $t_{тЭК}^{НУ}$ );

- ♦ путем пересчета с использованием коэффициентов, обоснованных и представленных в отчетах о проведенных научных исследованиях [18, 19].

Параметры, полученные в ходе проведения натурных экспериментов, представлены в табл. 1. Время тушения пожара определялось для условий, при которых для тушения пожара потребуется 300000 л воды. При этом учитывалось, что производительность системы пожаротушения РТК «Кедр» составляет 40 л/с, а РТК-ПМ – 100 л/с.

Таблица 1

**Значения времени развертывания РТК и тушения пожара при отсутствии поражающего действия при экипажном режиме управления**

Последовательно выполняемые операции	РТК	
	РТК «Кедр»	РТК-ПМ
<b>Общее время развертывания, мин.</b>	$t_{рЭК}^{НУ} = 56$	$t_{рЭК}^{НУ} = 37$
Подготовка РТС-НР к спуску на воду, с	720	–
Подготовка РТС-П к движению, с	300	–
Сцеп РТС-НР с РТС-Р, с	–	60
Спуск РТС-НР на воду, с	95	100
Движение РТС-П к объекту пож., с	2160	–
Раскладка рукавов при движении РТС-Р от водоёма к объекту пожара, с	–	1800
Сцеп РТС-Р с РТС-П, с	–	60
Подача воды от РТС-НР к РТС-П, с	40	200
<b>Общее время тушения пожара, мин</b>	$t_{тЭК}^{НУ} = 125$	$t_{тЭК}^{НУ} = 50$

С учетом изложенного время тушения пожара составляет:  
для РТК «Кедр»:

$$\tau_{тЭК}^{ну} = \frac{300000}{40} = 7500 \text{ с} = 125 \text{ мин.};$$

для РТК-ПМ:

$$t_{тЭК}^{ну} = \frac{300000}{100} = 3000 \text{ с} = 50 \text{ мин.}$$

В соответствии с исследованиями [18, 19] в условиях ЧС время операций разворачивания РТК увеличивается:

а) в 1,15 раза, если эти операции выполняются при дистанционном режиме управления;

б) в 1,3 раза, если операции выполняются экипажами в средствах химической защиты.

Время тушения пожара в условиях ЧС по сравнению с условиями отсутствия поражающих воздействий не изменяется, так как потребное количество огнетушащих веществ и производительность системы остается прежней. В табл. 2 представлены значения времени разворачивания РТК и тушения пожара в условиях ЧС, определенные с учетом принятых допущений.

Таблица 2

**Значения времени разворачивания РТК и тушения пожара в условиях ЧС**

Режим управления	РТК	
	РТК «Кедр»	РТК-ПМ
Экипажный	$\tau_{рЭК}^{ЧС} = 1,3 * 56 = 72,8 \text{ мин.}$ $\tau_{тЭК}^{ЧС} = 125 \text{ мин.}$	$t_{рЭК}^{ЧС} = 1,3 * 37 = 48,1 \text{ мин.}$ $t_{тЭК}^{ЧС} = 50 \text{ мин.}$
Дистанционный	$\tau_{рДу}^{ЧС} = 1,15 * 2295 + 1,3 * 1020 = 3965,25 \text{ с} = 66,1 \text{ мин.}$ $\tau_{тДу}^{ЧС} = 125 \text{ мин.}$	$t_{рДу}^{ЧС} = 1,15 * 37 = 42,55 \text{ мин.}$ $t_{тДу}^{ЧС} = 50 \text{ мин.}$

Эффективность применения РТК-ПМ по суммарному коэффициенту

$$K_{вз} = \frac{\tau_{вз}}{t_{вз}} = \frac{66,1 + 125}{42,55 + 50} = 2,065.$$

Эффективность применения РТК-ПМ по частным показателям:

а) по коэффициенту мобильности разворачивания:

$$K_{м} = \frac{\tau_{р}}{t_{р}} = \frac{66,1}{42,55} = 1,553;$$

б) по коэффициенту оперативности тушения пожара

$$K_{т} = \frac{\tau_{т}}{t_{т}} = \frac{125}{50} = 2,5;$$

в) по степени эффективности роботизации (табл. 3).

Таблица 3

**Степень эффективности роботизации  $S_{п}$  РТК-ПМ и РТК «Кедр»**

Параметр сравнения	РТК		$S_{РТК-ПМ}/S_{Кедр}$
	РТК «Кедр»	РТК-ПМ	
Время разворачивания	-0,12	-0,15	1,25
Время выполнения задачи	-0,037	-0,064	1,73

г) качественной характеристике эффективности РТК-ПМ следует отнести возможность выполнять при использовании этого комплекса работ, не доступные для РТК «Кедр»:

- ◆ разграждение загрязненных территорий при ликвидации последствий ЧС;
- ◆ подвоз к месту пожара огнетушащих веществ при помощи специальных машин-водовозов, в случае отсутствия или невозможности использования водоемов;
- ◆ проведение высотного пожаротушения с использованием высотного пожарного РТК.

Для оценки годового экономического эффекта от производства и использования единицы робототехнического комплекса РТК-ПМ для тушения пожара в ЧС определялись коэффициенты значимости относительных показателей и коэффициент эквивалентности.

В табл. 4 приведены технические и экономические показатели базового РТК «Кедр» и внедряемого РТК-ПМ, являющиеся исходными данными для осуществляемой оценки.

Таблица 4

**Технико-экономические показатели сравниваемых робототехнических комплексов**

Наименование показателей	Обозначение	РТК	
		«Кедр»	РТК-ПМ
Технические показатели			
Шасси		МТЛБУ	Т-72
Полная масса 1 ед., кг	$G$	16000	40000
Мощность двигателя, кВт	$N$	228	574
Емкость цистерны ОТВ, л	$V$	3200	18000
Производительность подачи ОТВ пожарным насосом, л/с	$Q_{пн}$	40	200
Производительность подачи насосной станции, л/с	$Q_{нс}$	120	300
Дальность подачи ОТВ лафетным столом, м	$L_c$	60	100
Дальность подачи ОТВ по рукавной линии, м	$L_p$	1000	2000
Дальность управления по радиоканалу, км		1,5	3
Время тушения, мин.		125	50
Срок службы, лет		5	5
Экономические показатели			
Себестоимость техники, млн. руб.	$C$	83,5	153,6
Удельные капитальные вложения в производственные фонды, млн. руб.	$K$	25,3	47,3
Эксплуатационные издержки, млн. руб.	$I$	10,4	19,2
Приведенные затраты, млн. руб.	$Z$	87,3	160,7
Стоимость техники, млн. руб.		89,2	164,2

Принимаем, что сопутствующие капитальные вложения потребителя по сравниваемым вариантам равны  $K_1^1 = K_2^1$ .

Приведенные затраты определены в соответствии с формулой:

$$Z = C + E_H * K, \quad (4)$$

тогда:

$$Z_1 = 83,5 + 0,15 * 25,3 = 87,3 \text{ млн. руб.};$$

$$Z_2 = 153,6 + 0,15 * 47,3 = 160,7 \text{ млн. руб.}$$

**Определение коэффициентов значимости относительных показателей**

В качестве относительных показателей, по которым формируется коэффициент эквивалентности, взяты отношения значений следующих шести параметров (параметров РТС-ПМ к параметрам РТК «Кедр») сравниваемых комплексов: энерговооруженностей ( $N/G$ ), емкостей цистерн ОТВ ( $V$ ), производительностей подачи ОТВ пожарными насосами ( $Q_{пн}$ ), производительностей подачи насосными станциями ( $Q_{нс}$ ), дальностей подачи ОТВ лафетными столами ( $L_c$ ) и дальностей подачи ОТВ по рукавным линиям ( $L_p$ ). Коэффициенты значимости указанных относительных показателей определялись путем обработки экспертных матриц попарных сравнений значимости относительных параметров РТК «Кедр» и РТК-ПМ. Усредненная матрица попарных сравнений значимости относительных показателей, полученная методом медиан Кемени [20], представлена в табл. 5.

Таблица 5

**Усредненная матрица попарных сравнений значимости относительных показателей сравниваемых робототехнических комплексов**

	$N/G$	$V$	$Q_{пн}$	$Q_{нс}$	$L_c$	$L_p$	$\Sigma$	$\alpha$
$N/G$	0,5	1	1	0	1	0,5	4,0	0,23
$V$	0	0,5	0,5	0	0,5	0	1,5	0,08
$Q_{пн}$	0	0,5	0,5	0	0,5	0	1,5	0,08
$Q_{нс}$	1	1	1	0,5	1	0	4,5	0,25
$L_c$	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	2,0	0,11
$L_p$	0,5	1	1	1	0,5	0,5	4,5	0,25

В таблице также представлены значения искомым коэффициентов, как нормированные суммы баллов показателей (по каждой строке).

**Расчет коэффициента эквивалентности**

С учетом полученных значений коэффициентов значимости с использованием формулы (3) определяется эквивалентности:

$$\begin{aligned}
 K_3 &= 0,23 \frac{N_2/G_2}{N_1/G_1} + 0,08 \frac{V_2}{V_1} + 0,08 \frac{Q_{пн2}}{Q_{пн1}} + 0,25 \frac{Q_{нс2}}{Q_{нс1}} + 0,11 \frac{L_{c2}}{L_{c1}} + 0,25 \frac{L_{p2}}{L_{p1}} = \\
 &= 0,23 \frac{576/40000}{228/16000} + 0,08 \frac{18000}{3200} + 0,08 \frac{200}{40} + 0,25 \frac{300}{120} + 0,11 \frac{100}{60} + 0,25 \frac{2000}{1000} = \\
 &= 0,23242 + 0,45 + 0,4 + 0,625 + 0,18333 + 0,5 = 2,39075.
 \end{aligned}$$

**Расчет годового экономического эффекта от производства и использования РТК-ПМ**

Годовой экономический эффект от производства и использования одной единицы РТК-ПМ вместо единицы РТК «Кедр» рассчитывается с использованием формулы (2):

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E} &= \left[ 3_1 K_3 \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} + \frac{(I_1 \cdot K_3 - I_2) - E_n \cdot (K_2^1 - K_1^1)}{P_2 + E_n} - 3_2 \right] K_n = \\
 &= \left[ 87,3 * 2,39 * 1 + \frac{(10,4 * 2,39 - 19,2) - 0,15 * 0}{0,1638 + 0,15} - 160,7 \right] * 0,02 = \\
 &= \left( 208,647 + \frac{5,656}{0,3138} - 160,7 \right) * 0,02 = 65,9712 * 0,02 = 1,319 \text{ млн руб.}
 \end{aligned}$$

Результат расчета показывает, что экономический эффект от производства предлагаемого комплекса многорежимного пожаротушения РТК-ПМ и его использования при тушении пожаров на особо опасных объектах существует и составляет 1,319 млн. рублей в год при внедрении одного комплекса.

Таким образом, результаты оценки технико-экономической эффективности указывают на целесообразность производства и внедрения в практику тушения пожаров на особо опасных объектах предлагаемого робототехнического комплекса многорежимного пожаротушения РТК-ПМ.

Техническая эффективность применения РТК-ПМ составляет:

- ◆ по коэффициенту мобильности развертывания – 1,553;
- ◆ по коэффициенту оперативности тушения пожара – 2,5;
- ◆ по суммарному коэффициенту – 2,065.
- ◆ по степени эффективности роботизации – 1,25 для времени развертывания и 1,73 для времени выполнения задачи.

Годовой экономический эффект от производства и использования одной единицы РТК-ПМ составляет 1,319 млн. рублей.

**Заключение.** Представленный методический аппарат позволяет достаточно надежно проводить оценку технико-экономической эффективности образцов и комплексов робототехнических средств применяемых для ликвидации ЧС. Необходимость его разработки была определена тем, что обычно применяющаяся оценка подходов к достижению базовых параметров, характеризующих выполнение задачи, в данном случае время развертывания и количество подаваемых огнетушащих веществ, не учитывает стоимостные показатели, рассматриваемых технических средств и комплексов. Для решения данной проблемы предлагается, кроме сравнения параметров, характеризующих техническую эффективность, производить оценку экономической эффективности по величине годового экономического эффекта от производства и использования единицы рассматриваемого технического средства. При этом предлагается расчет экономической эффективности осуществлять на основе таких показателей, как приведенные затраты на содержание базовой и новой модели техники; эквивалентность сравниваемых образцов; продолжительность срока службы техники; доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление техники.

Проведенные расчеты подтверждают возможность использования данного подхода и достоверность полученных результатов. В перспективе он может быть использован при разработке технических заданий на создание и закупку РТК для оснащения реагирующих подразделений МЧС России, а также аналогичной по задачам техники для других федеральных органов исполнительной власти.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мошков В.Б., Баранник А.Ю. Перспективы развития системы робототехники МЧС России в интересах повышения эффективности ведения аварийно-спасательных работ // Технологии гражданской безопасности. Спецвыпуск. – 2021. – С. 124-126.
2. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics. – 2020 ed. – <https://www.semanticscholar.org>.
3. Unmanned Systems Roadmap: 2007-2032. – <https://www.globalsecurity.org>.
4. Firefighting Robots Go Autonomous. – <https://www.scientificamerican.com>.
5. Global Robot Firefighter Market 2021 Analysis by Sales, Industry Assessment, Industry, Trends and Forecast 2027. – <https://www.bignewsnetwork.com>.
6. Асхадеев А.И., Павлов Е.В., Баранник А.Ю., Лагутина А.В., Козлов В.И., Пеньков И.А., Чирко О.В. Система робототехники МЧС России. Состояние и перспективы развития // Технологии гражданской безопасности. – 2022. – № 2 (72). – С. 41-47.
7. Павлов Е.В. Условия эффективного пожаротушения и возможности группировки робототехнических комплексов по его выполнению при крупномасштабных авариях // Пожарная безопасность. – 2020. – № 4 (101). – С. 130-136.
8. Павлов Е.В. Технический состав робототехнического комплекса тяжелого класса многорежимного тушения пожара // Пожарная безопасность. – 2015. – № 1. – С. 109-110.
9. Лагутина А.В., Баранник А.Ю. Робототехнические комплексы МЧС России // Школа молодых ученых и специалистов МЧС России: Матер. юбилейного X форума. Санкт-Петербург, 15 октября 2020 г. – С. 207-212.

10. Павлов Е.В. Робототехнический комплекс тяжёлого класса многорежимного пожаротушения // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: Сб. тезисов докладов международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 2. – М.: Академия ГПС МЧС России, 015. – С. 221-226.
11. Развитие, технология и эффективность применения робототехники в чрезвычайных ситуациях: монография. Ч. 1–4 / под научным руководством и общ. ред. д.т.н. Северова Н.В. – Химки: АГЗ МЧС РФ, 2010. – 702 с.
12. Конструктивное построение и эффективность применения робототехнического комплекса тушения пожара в крупномасштабных авариях: монография / под научным руководством д.т.н. Северова Н.В. – Химки: АГЗ МЧС РФ и ВНИИПО МЧС России, 2014. – 145 с.
13. Северов Н.В., Волик О.А. Применение робототехники в чрезвычайных ситуациях и при ликвидации последствий террористических актов. – Новогорск: АГЗ МЧС России, 2002. – 163 с.
14. Северов Н.В. Применение робототехники в чрезвычайных ситуациях: теория и практика: монография. – Новогорск: АГЗ МЧС России, 2003. – 241 с.
15. Северов Н.В. Применение робототехники в чрезвычайных ситуациях: теория и практика: монография. – М.: АГЗ, 2011. – 233 с.
16. Спасательные робототехнические системы и технологии: учебник / под науч. рук. и общ. ред. Н.В. Северова. – Химки: ФГБОУ ВПО «АГЗ МЧС России», 2012. – 728 с.
17. Северов Н.В., Байков А.В. Сетевая система управления и контроля применения робототехники в чрезвычайных ситуациях // Транспорт: наука, техника, управление. – 2014. – № 3. – С. 30-31.
18. Анализ химических аварий и оценка применения в них аварийно-спасательного инструмента. Отчет о НИР, шифр «Спас – 2». – Новогорск: АГЗ МЧС РФ, 2004. – 62 с.
19. Северов Н.В., Желтов В.Г. Технический облик многофункционального робототехнического комплекса тяжёлого класса и технология его применения в крупномасштабных авариях: монография. – Химки, АГЗ МЧС России, 2011. – 168 с.
20. Орлов А.И. Средние величины и законы больших чисел в пространствах произвольной природы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 89 (05). – <http://ej.kubagro.ru/2013/05/pdf/38.pdf> (дата обращения: 19.05.2019).

#### REFERENCES

1. Moshkov V.B., Barannik A.Yu. Perspektivy razvitiya sistemy robototekhniki MCHS Rossii v interesakh povysheniya effektivnosti vedeniya avariyno-spatatel'nykh robot [Prospects for the development of the robotics system of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the interests of improving the efficiency of emergency rescue operations], *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. Spetsvypusk* [Civil Security Technologies. Special issue], 2021, pp.124-126.
2. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics, 2020 ed. Available at: <https://www.semanticscholar.org>.
3. Unmanned Systems Roadmap: 2007-2032. Available at: <https://www.globalsecurity.org>.
4. Firefighting Robots Go Autonomous. Available at: <https://www.scientificamerican.com>.
5. Global Robot Firefighter Market 2021 Analysis by Sales, Industry Assessment, Industry, Trends and Forecast 2027. Available at: <https://www.bignewsnetwork.com>.
6. Askhadeev A.I., Pavlov E.V., Barannik A.Yu., Lagutina A.V., Kozlov V.I., Pen'kov I.A., Chirko O.V. Sistema robototekhniki MCHS Rossii. Sostoyanie i perspektivy razvitiya [The robotics system of the Ministry of Emergency Situations of Russia. State and development prospects], *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technologies], 2022, No. 2 (72), pp 41-47.
7. Pavlov E.V. Usloviya effektivnogo pozharotusheniya i vozmozhnosti gruppировки robototekhnicheskikh kompleksov po ego vypolneniyu pri krupnomasshtabnykh avariyaх [Conditions for effective fire extinguishing and the possibility of grouping robotic systems for its implementation in case of large-scale accidents], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2020, No. 4 (101), pp. 130-136.
8. Pavlov E.V. Tekhnicheskii sostav robototekhnicheskogo kompleksa tyazhelogo klassa mnogorezhimnogo tusheniya pozhara [The technical composition of the heavy class robotic complex for multi-mode fire extinguishing], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2015, No. 1, pp. 109-110.



9. *Lagutina A.V., Barannik A.Yu.* Robototekhnicheskie komplekсы MChS Rossii [Robotic complexes of the Ministry of Emergency Situations of Russia], *Shkola molodykh uchenykh i spetsialistov MChS Rossii: Mater. yubileynogo X foruma. Sankt-Peterburg, 15 oktyabrya 2020 g.* [School of Young Scientists and specialists of the Ministry of Emergency Situations of Russia: Materials of the jubilee X Forum. St. Petersburg, October 15, 2020], pp. 207-212.
10. *Pavlov E.V.* Robototekhnicheskiy kompleks tyazhelogo klassa mnogorezhimnogo pozharotusheniya [Robotic complex of a heavy class of multi-mode fire extinguishing], *Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii: Sb. tezisov dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Firefighting: problems, technologies, innovations: Collection of abstracts of reports of the international scientific and practical conference]: In 2 part. Part 2. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, 015, pp. 221-226.
11. *Razvitie, tekhnologiya i effektivnost' primeneniya robototekhniki v chrezvychaynykh situatsiyakh: monografiya* [Development, technology and effectiveness of the use of robotics in emergency situations: monograph]. Part 1–4. / under the scientific supervision and general editorship of N. V. Severov, dr. of eng. sc. Khimki: AGZ MChS RF, 2010, 702 p.
12. *Konstruktivnoe postroenie i effektivnost' primeneniya robototekhnicheskogo kompleksa tusheniya pozhara v krupnomasshtabnykh aviaryakh: monografiya* [Structural construction and efficiency of the use of a robotic complex for extinguishing a fire in large-scale accidents. monograph], / under the scientific supervision of N.V. Severov, dr. of eng. sc. Khimki: AGZ MChS RF i VNIPO MChS Rossii, 2014, 145 p.
13. *Severov N.V., Volik O.A.* Primenenie robototekhniki v chrezvychaynykh situatsiyakh i pri likvidatsii posledstviy terroristicheskikh aktov [The use of robotics in emergency situations and in the aftermath of terrorist acts]. Novogorsk: AGZ MChS Rossii, 2002, 163 p.
14. *Severov N.V.* Primenenie robototekhniki v chrezvychaynykh situatsiyakh: teoriya i praktika. Monografiya [Application of robotics in emergency situations: theory and practice: monograph]. Novogorsk: AGZ MChS Rossii, 2003, 241 p.
15. *Severov N.V.* Primenenie robototekhniki v chrezvychaynykh situatsiyakh: teoriya i praktika: monografiya [Application of robotics in emergency situations: theory and practice: monograph]. Moscow: AGZ, 2011, 233 p.
16. *Spasatel'nye robototekhnicheskie sistemy i tekhnologii: uchebnik* [Rescue Robotic Systems and Technologies: textbook], under scientific. hands and general. ed. N.V. Severova. Khimki: FGBOU VPO «AGZ MChS Rossii», 2012, 728 p.
17. *Severov N.V., Baykov A.V.* Setsetrichnaya sistema upravleniya i kontrolya primeneniya robototekhniki v chrezvychaynykh situatsiyakh [Network-centric system of control and control of the use of robotics in emergency situations], *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, Technology, Management], 2014, No. 3, pp. 30-31.
18. *Analiz khimicheskikh aviariy i otsenka primeneniya v nikh aviarno-spasatel'nogo instrumenta. Otchet o NIR, shifr «Spas – 2»* [Analysis of chemical accidents and assessment of the use of emergency rescue tools in them. Research report, code "Spas - 2"]. Novogorsk: AGZ MChS RF, 2004, 62 p.
19. *Severov N.V., Zheltov V.G.* Tekhnicheskiy oblik mnogofunktsional'nogo robototekhnicheskogo kompleksa tyazhelogo klassa i tekhnologiya ego primeneniya v krupnomasshtabnykh aviaryakh: monografiya [The technical appearance of a multifunctional robotic complex of a heavy class and the technology of its application in large-scale accidents: monograph]. Khimki, AGZ MChS Rossii, 2011, 168 p.
20. *Orlov A.I.* Srednie velichiny i zakony bol'shikh chisel v prostranstvakh proizvol'noy prirody [Mean values and laws of large numbers in spaces of arbitrary nature], *Politematicheskii setevoj elektromyuy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2013, No. 89 (05). Available at: <http://ej/kubagro.ru/2013/05/pdf/38.pdf> (data obrashcheniya: 19.05.2019).

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.С. Носков.

**Павлов Евгений Владимирович** – ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России»; e-mail: pavlov-yr@mail.ru; г. Балашиха, Россия; тел.: 89167850002; старший научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматизации.

**Ершов Владимир Иванович** – e-mail: evi-monino@mail.ru; тел.: 89690301515; к.в.н.; профессор; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматики.

**Баранник Александр Юрьевич** – Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий; e-mail: auba@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89166951214; к.т.н.; с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

**Лагутина Анна Викторовна** – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

**Pavlov Evgeny Vladimirovich** – Federal State Budgetary Institution "All-Russian Order" Badge of Honor "Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia", e-mail: pavlov-vp@mail.ru; Balashikha, Russia; phone: +79167850002; senior researcher at the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

**Ershov Vladimir Ivanovich** – e-mail: evi-monino@mail.ru; phone: +79690301515; cand. of mil. sc.; professor; leading researcher of the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

**Barannik Alexander Yuryevich** – All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergency of the EMERCOM of Russia, Federal Science and High Technologies Center; e-mail: auba@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

**Lagutina Anna Viktorovna** – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; phone: +79057118834; senior researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

УДК 65.012.122

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-53-66

**А.М. Грузликов**

### **ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ\***

*Целью исследования является повышение эффективности высокоуровневого проектирования робототехнических комплексов в части организации вычислений и диагностирования программного обеспечения бортовых вычислителей. Рассматриваются три проблемы: назначения, планирования и диагностирования. Первая проблема, задача назначения, определение необходимых ресурсов и построения назначения программных модулей по процессорам бортовых вычислителей согласно заданному критерию. В работе дана математическая постановка задачи, приведены алгоритмы, показано наличие областей эффективного доминирования алгоритмов в зависимости от выбранного критерия. Вторая проблема, задача планирования, определение последовательности выполнения заданий в многоканальных системах согласно заданному критерию. Дана математическая постановка задачи, приведены алгоритмы и результаты их исследований. Особенностью рассматриваемых алгоритмов планирования является использование единого подхода, а именно понятия отношения доминирования между процессорами и построение разрешимых классов систем. Третья проблема, диагностирование программного обеспечения. Сложность проблемы диагностирования вычислительных систем определяется не только их высокой размерностью, но и множественностью причин возникновения нарушений. Источником нарушений вычислительного процесса*

---

\* Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ № 22-29-00339.

могут быть как отказы аппаратуры, так и ошибки в организации вычислений допущенные разработчиками. В работе используется иерархический подход, в этом случае компоненты системы, связанные отношением включения, размещаются по уровням сложности так, что модель компоненты более высокого уровня представляется композицией моделей более низкого уровня. Для каждого уровня синтезируются свои средства диагностирования, ориентированные на отказы информационных связей между компонентами предыдущего уровня. В работе предлагается подход тестового диагностирования с использованием сетевых динамической модели, которая предполагает введение избыточности с целью упрощения диагностического эксперимента и снижение трудоёмкости его подготовки. Данный подход позволяет автоматически синтезировать средства диагностирования и обнаруживать нарушения в адресации информационных обменов при работе программного обеспечения робототехнических комплексов по прямому назначению. Апробация рассматриваемых алгоритмов проводилась с использованием разработанного автором программного обеспечения на этапе проектирования бортовых комплексов в АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор».

*Высокоуровневое проектирование; организация вычислений; задача назначения; задача планирования; тестовое диагностирование.*

**A.M. Gruzlikov**

### **CONTROL OF COMPUTING AND DIAGNOSTICS OF SOFTWARE FOR ON-BOARD COMPUTERS OF ROBOTIC COMPLEXES**

*The aim of the study is to improve the efficiency of high-level design of robotic systems in terms of management of computing and diagnostics of on-board computer software. Three problems are considered: assignment, scheduling and diagnostics. The first problem, the assignment task, is to determine the necessary resources and build the distribution of program modules among the on-board computer processors in accordance with a given criterion. The article presents a mathematical formulation of the problem, algorithms are given, and the presence of areas of effective dominance of algorithms depending on the selected criterion is shown. The second problem, the scheduling problem, is to determine the sequence of tasks in multi-channel systems in accordance with a given criterion. A mathematical formulation of the problem is given, algorithms and the results of their study are given. A feature of the scheduling algorithms under consideration is the use of a unified approach, namely the concept of the dominance relation between processors and the construction of solvable classes of systems. The third problem is software diagnostics. The complexity of the task of diagnosing computer systems is determined not only by their high dimensionality, but also by the multiplicity of causes of violations. The source of violations of the computing process can be both hardware failures and errors in the organization of calculations made by developers. The article uses a hierarchical approach, in this case, the components of the system, connected by an inclusion relation, are arranged in accordance with the level of complexity in such a way that the model of higher-level components is represented by a composition of lower-level models. For each level, own diagnostic tools are synthesized, focused on failures of information links between the components of the previous level. The article proposes an approach to test diagnostics using a network dynamic model, which involves the introduction of redundancy in order to simplify the diagnostic experiment and reduce the complexity of its preparation. This approach allows you to automatically synthesize diagnostic tools and detect violations in the addressing of information exchanges when the software of robotic systems works as intended. Approbation of the algorithms under consideration was carried out using software developed by the author at the stage of designing on-board systems at JSC «Concern «Central Research Institute «Elektroprigor».*

*High-level design; management of computing; assignment problem; scheduling problem; test diagnostics.*

**Введение.** Современные бортовые робототехнические комплексы обработки информации и управления среди прочих систем занимают важное место, определяемое ответственностью решаемых ими задач. Основу этих комплексов в настоящее время составляют распределенные вычислительные системы, построенные с использованием многопроцессорных вычислительных модулей. В последние

годы, впечатляющие достижения микроэлектроники привели к тому, что в области проектирования бортовых вычислительных систем сложилась устойчивая тенденция, в результате которой центр тяжести основных проблем сместился в сторону разработки программного обеспечения. При этом существенно возросла значимость высокоуровневого проектирования, т.е. проектирования на уровне базовых архитектурных принципов функционирования системы [1, 2].

Создание систем охватывают широкий круг взаимосвязанных вопросов, затрагивающих практически все важнейшие направления разработки, начиная с организации вычислений в части решения вопросов назначения задач на процессоры системы и планирования вычислений, далее выбор и реализация некоторой модели управления вычислениями и, наконец, высокоуровневое диагностирование вычислительных систем. Кроме того, следует отметить, что на фоне жестких требований по точности, достоверности и надежности бортовые робототехнические комплексы должны обеспечивать решение задач большой вычислительной сложности [3–5]. Необходимость решения всех задач в реальном времени накладывает дополнительные ограничения на применяемые подходы и, в частности, ограничения, связанные с временной привязкой задач.

Ниже излагаются основные результаты исследований, проведенных в АО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в этой области. В фокусе исследований находились проблемы высокоуровневого проектирования, связанные с назначением задач на процессоры бортовых вычислителей, с планированием последовательности их выполнения, синтезом диагностических моделей, высокоуровневым тестированием и автоматизацией всех этих процессов для разрабатываемых робототехнических комплексов.

**Назначение заданий по процессорам вычислительных модулей [5–7].** Будем предполагать, что рассматриваемое множество задач представлено сетевой моделью, заданной ориентированным графом. В общем случае граф может содержать циклы, и более одного пути между двумя выделенными вершинами, может состоять из нескольких компонент связности, которые далее будем называть заданиями. Каждое задание состоит из набора задач, для которых известны длительности их выполнения на используемом вычислительном модуле (процессоре). Считаем, что все процессоры имеют одинаковую производительность. Кроме того, задано отношение предшествования между задачами, и известно время для передачи информации между задачами с использованием выбранных каналов связи.

**Формальная постановка проблемы назначения.** Допустим, что множество задач представлено графом  $G(V, E) = \langle V, E \rangle, V \neq \emptyset, E \subseteq V \times V$ , где  $V$  – вершины (задачи),  $E$  – ребра графа (задано отношение предшествования между задачами). Пусть граф  $G(V, E)$  не является связным и содержит  $n$  компонент связности (заданий), т.е. назначению на процессоры подлежат  $n$  независимых заданий.

Каждое задание состоит из множества задач  $\tau^{(j)} = \{\tau_k^{(j)} | k = \overline{1, n^{(j)}}, j = \overline{1, n}\}$ , где  $\tau_k^{(j)}$  –  $k$ -я задача  $j$  задания,  $n^{(j)}$  – число задач в  $j$  задании. Известна длительность выполнения каждой задачи  $p_k^{(j)}$ , причём длительность нормирована относительно производительности процессора. Считаем, что любая задача может быть решена на одном процессоре, т.е. организация распараллеливания последовательного кода в работе не рассматривается. Известна длительность  $s_{a,b}^{(j)}$  обмена передачи информации из задачи  $a$  в задачу  $b$ , где задачи входят в состав  $j$  задания (вес ребра графа  $G(V, E)$ ).

Введём дополнительные обозначения. Пусть:

♦  $m$  – общее число задач в вычислительной системе (если каждую задачу разместить на своём вычислительном модуле,  $m$  будет максимальным числом необходимых вычислительных модулей);

- ♦  $x_{i,k}^{(j)} \in \{0, 1\}$  – признак размещения задачи, при этом 1 – задача  $k$  из  $j$  задачи выполняется на  $i$  вычислительном модуле, 0 – иначе;
- ♦  $y_i \in \{0, 1\}$  – признак использования вычислительного модуля, при этом 1 –  $i$  вычислительный модуль используется, 0 – иначе;
- ♦  $z_{\alpha,\beta} \in \{0, 1\}$  – признак наличия канала обмена, при этом 1 – существование канала обмена между вычислительными задачами  $\alpha$  и  $\beta$ , 0 – иначе.

Зададим ограничение по допустимому размещению задач на одном вычислительном модуле:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{n^{(j)}} p_k^{(j)} x_{i,k}^{(j)} \leq y_i, i = \overline{1, m}.$$

Зададим ограничения по допустимому объёму (по длительности) передачи данных между задачами размещенных на различных вычислительных модулях с учётом пропускной способности канала обмена:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^{n^{(j)}-1} \sum_{b=a+1}^{n^{(j)}} (s_{a,b}^{(j)} + s_{b,a}^{(j)}) x_{\alpha,a}^{(j)} x_{\beta,b}^{(j)} \leq z_{\alpha,\beta}, \alpha = \overline{1, m-1}, \beta = \overline{\alpha+1, m}.$$

Требование определяет размещение всех задач из состава комплекса:

$$\sum_{i=1}^m x_{i,k}^{(j)} = 1, k = \overline{1, n^{(j)}}, j = \overline{1, n}$$

Определим критерий назначения, который представим взвешенной суммой числа используемых процессоров и числа каналов обменов:

$$f = \min_{f_1, f_2} (A \cdot f_1 + B \cdot f_2),$$

где  $f_1$  является числом используемых вычислительных модулей:

$$f_1 = \sum_{i=1}^m y_i$$

$f_2$  – число используемых каналов обмена:

$$f_2 = \sum_{\alpha=1}^{m-1} \sum_{\beta=\alpha+1}^m z_{\alpha,\beta}$$

$A$  и  $B$ , соответственно коэффициенты учитывающий вес вклада числа вычислительных модулей и каналов обмена. Данные коэффициенты задаются разработчиком комплекса исходя из практических соображений.

**Описание подхода по решению проблемы назначения.** Проблема назначения сводится к квадратичной задаче о рюкзаке [6–10], которая формально является *NP*-трудной, и более того является *APX*-трудной [9–10]. Нахождение точного решения, даже с использованием алгоритмов основанных на вычислении верхней границы является вычислительно сложными задачами. Для решения проблемы предлагается использовать следующие известные эвристические алгоритмы: остовный и кластерный алгоритм [11].

Остовный алгоритм, который базируется на построении максимального остовного дерева, т.е. дерева включающего все вершины графа и характеризующегося максимальным значением суммарного веса всех ребер. Учитывая, что в графе  $G(V, E)$  задано  $n$  компонент связности, все сформированные деревья сортируются по убыванию их веса. Затем осуществляется последовательный перебор деревьев,

и назначение задач на процессоры в последовательности, определяемой некоторым специальным образом выбранным обходом вершин дерева, при котором вероятным становится локализация поддеревьев остова в рамках некоторых процессоров и, как следствие, сокращение межпроцессорных обменов.

Кластерный алгоритм, который предполагает, что на один процессор назначаются в первую очередь пары задач, информационный обмен между которыми наиболее интенсивен.

В обоих алгоритмах в процессе назначения проверяются ограничения на производительность процессора (1) и пропускную способность канала обмена (2). При их превышении на некотором шаге число процессоров или каналов обмена увеличивается на единицу. Недостатки обоих эвристических алгоритмов очевидны. По эффективности они, безусловно, будут проигрывать оптимальным. Для улучшения их характеристик предлагается использовать двухэтапные процедуры, где на первом этапе используется остовный или кластерный алгоритм, а на втором (когда размерность задачи существенно уменьшилась) использовать более эффективный ресурсоёмкий алгоритм.

Исследование эффективности предложенных алгоритмов назначения осуществлялось путем генерации тестовых примеров заданий. Учитывая многообразие возможных вариантов структуры графа, формировался вариант графа без базовых циклов (дерево), и вариант с пятью базовыми циклами. Для каждого примера проводилась оценка оптимального значения согласно критерию (3), и выполнялась процедура назначения по остовному и кластерному алгоритму.

Было установлено, что остовный и кластерный алгоритмы имеют неперекрывающиеся области эффективного применения (доминирования), определяемые соотношением затрат процессор/канал обмена ( $B/A$ ). Пример считался положительным, если полученный результат «близок» к оценке оптимального значения. На рис. 1 представлена доля положительных примеров в зависимости от затрат весовых коэффициентов  $B$  и  $A$ .

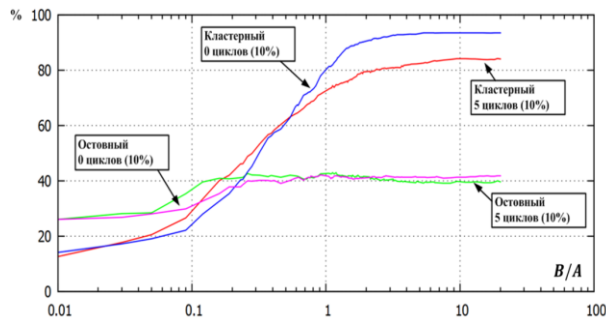


Рис. 1. Результаты исследования эффективности алгоритмов назначения

**Планирование заданий [12–15].** В области планирования решение фокусируется на определении последовательности выполнения заданий в бортовой многоканальной системе обработки информации, когда система обрабатывает информацию, поступающую от одного или многих датчиков, но с формированием различных потоков обработки. Примером такой системы является бортовая система освещения обстановки робототехнического комплекса, когда информация поступившая с антенной решётки обрабатывается различными наборами задач – обнаружение и оценка параметров сигналов, задачи обеспечения безопасности маневрирования аппарата и т.д. При этом каждый поток информации обрабатывается по своему алгоритму с использованием распределенных вычислений, а все алгоритмы исполняются на общих вычислительных ресурсах. В результате, проблема планирова-

ния состоит в поиске упорядоченности заданий, наилучшей с точки зрения некоторого критерия. Данная проблема известна в теории расписаний под названием задачи точного планирования (англ. – permutation flow shop scheduling) (PFS) [12].

Предполагается, что при назначении задач на процессоры было выполнено условие, гарантирующее независимость обработки разных порций входной информации. В этом случае исключается образование растущих очередей на процессоры из-за незавершенности обработки предыдущей порции входной информации. Следующая позиция постановки проблемы требует, чтобы передача и прием данных между задачами одного задания, выполняемыми на смежных процессорах, осуществлялась без дополнительных задержек по их готовности. Если же реально такие задержки существенны, то будем считать, что они учтены в используемых значениях длительностей решения задач.

**Формальная постановка проблемы планирования [14, 16].** Будем предполагать, что по результату выполнения назначения, определено распределение задач по процессорам бортового вычислительного комплекса. При этом, рассматриваемое множество задач, задано информационным графом  $G(V, E)$ , содержащим  $n$  компонент связности (заданий). Каждое задание  $\tau^{(j)}, j = \overline{1, n}$  состоит из множества задач, которые изоморфны некоторому вычислительному графу (считаем, что задания выполняются на множестве процессоров с сохранением последовательности, т.е. порядок выполнения заданий на процессоре 1 совпадает с порядком выполнения заданий на процессоре 2 и т.д.). Известна длительность выполнения задач на процессорах вычислительных модулей:  $p_i^{(j)}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ , где  $m$  число используемых процессоров. Тогда для случая конвейерной обработки данных, условия времени выполнения задач будут:

$$\begin{aligned} C(\pi_1, 1) &= p_1^{(\pi_1)}, \\ C(\pi_j, 1) &= C(\pi_{j-1}, 1) + p_1^{(\pi_j)}, \quad j = \overline{2, n}, \\ C(\pi_1, i) &= C(\pi_1, i-1) + p_i^{(\pi_1)}, \quad i = \overline{2, m}, \\ C(\pi_j, i) &= \max\{C(\pi_{j-1}, i), C(\pi_j, i-1)\} + p_i^{(\pi_j)}, \quad j = \overline{2, n}, i = \overline{2, m}, \\ C_{max}(\pi) &= C(\pi_n, m), \end{aligned}$$

где  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$  – перестановка, которая определяет порядок выполнения заданий на процессорах,  $C(\pi_j, i)$  – время завершения выполнения задания  $\tau^{(j)}$  на процессоре  $i$ ,  $C_{max}(\pi)$  – время завершения выполнения последнего задания. Очевидно, что данное условие по времени выполнения задач на процессорах можно перенести и на произвольные ациклические графы.

По типу целевой функции, проблема планирования заданий делится на задачи с минимаксными и с суммарными критериями оптимизации.

Сформулируем задачу с минимаксным критерием оптимизации: поиск такой перестановки  $\pi^*$  из множества  $\Pi$  всех возможных перестановок заданий  $\tau^{(j)}$ , при которой  $C_{max}(\pi^*) \leq C_{max}(\pi) \forall \pi \in \Pi$ , т.е. требуется определить такую последовательность выполнения заданий, при которой время выполнения последнего задания будет минимальным [16].

Для формулирования задачи с суммарным критерием оптимизации введём следующие понятия: джиттер задачи, временная привязка [17].

Пусть длительность выполнения задачи задано в интервале  $\tilde{p}_i^{(j)} = [p_i^{(j)}, \bar{p}_i^{(j)}]$ , при этом величину  $\Delta(\tau_i^{(j)}) = \bar{p}_i^{(j)} - p_i^{(j)}$  будем называть джиттером задачи  $\tau_i^{(j)}$ .

Говорят, что  $j$ -я задача  $j$ -го задания привязана к моменту времени  $t_i^{(j)}$  с точностью  $\delta_i^{(j)}$ , если время начала решения этой задачи лежит в интервале  $[t_i^{(j)} - \delta_i^{(j)}, t_i^{(j)} + \delta_i^{(j)}]$ . Это понятие поясняется на рис. 2, где представлена временная

диаграмма исполнения трех задач  $\tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \tau_3^{(j)}$ . Задача  $\tau_1^{(j)}$ , стоящая первой в цикле обработки, имеет точную временную привязку ( $\delta_1^{(j)} = 0$ ). Однако уже привязка второй задачи  $\tau_2^{(j)}$  характеризуется погрешностью  $\delta_2^{(j)}$ , равной неопределенности длительности выполнения первой задачи  $\delta_2^{(j)} = \Delta(\tau_1^{(j)}) \neq 0$ , привязка третьей задачи характеризуется погрешностью  $\delta_3^{(j)}$ , равной сумме неопределенностей длительностей выполнения первой и второй задач  $\delta_3^{(j)} = \Delta(\tau_1^{(j)}) + \Delta(\tau_2^{(j)}) \neq 0$ , и т.д.

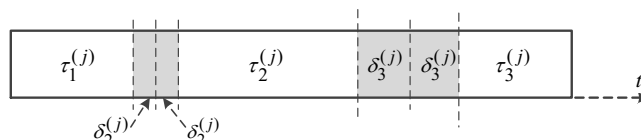


Рис. 2. Иллюстрация неточности временной привязки задач

Сформулируем задачу с суммарным критерием оптимизации: поиск такой перестановки  $\pi^*$  из множества  $\Pi$  всех возможных перестановок заданий  $\tau^{(j)}, j = \overline{1, n}$ , при которой:

$$\sum_{j=1}^n \delta(\pi_j^*, m) \leq \sum_{j=1}^n \delta(\pi_j, m), \forall \pi \in \Pi.$$

т.е. требуется определить такую последовательность выполнения заданий, при которой суммарная неточность временной привязки будет минимальной.

**Описание подхода по решению проблемы планирования.** Проблема планирования является *NP*-трудной, поэтому для её решения воспользуемся следующим эвристическим алгоритмом на основе формализма разрешимых классов распределенных систем реального времени (РКС-формализм) для которых известен алгоритм нахождения оптимального плана [16].

*Алгоритм планирования по критерию минимизации времени завершения последнего задания.* Предлагаемый алгоритм основывается на понятии разрешимого класса распределенной системы, который вводится ниже. Для этого предварительно определим на множестве процессоров отношение доминирования «>».

*Определение 1.* Процессор  $P_q$  доминирует над процессором  $P_r$  ( $P_q \geq P_r$ ), если  $\min_j p_q^{(j)} \geq \max_j p_r^{(j)}, j = \overline{1, n}$ .

Общее свойство рассматриваемых далее разрешимых классов распределенных систем состоит в следующем: для любого задания, реализуемого в системе, критический путь единственен и проходит по одним и тем же процессорам. Номера процессоров вдоль критического пути обозначим как  $P_{[1]}, P_{[2]}, \dots, P_{[m^*]}$ , где  $m^*$  будет длиной критического пути.

Приведем определяющие свойства для каждого из разрешимых классов.

*Определение 2 (класс 1).* Множество процессоров критического пути представляет собой последовательность  $P_{[1]} \geq P_{[2]} \geq \dots \geq P_{[m^*]}$ , убывающую по отношению доминирования.

*Определение 3 (класс 2).* Множество процессоров критического пути представляет собой последовательность  $P_{[1]} \leq P_{[2]} \leq \dots \leq P_{[m^*]}$ , возрастающую по отношению доминирования.

*Определение 4 (класс 3).* Множество процессоров критического пути представляет собой пару соединенных последовательность

$$P_{[1]} \leq P_{[2]} \leq \dots \leq P_{[h]} \geq \dots \geq P_{[m^*]}, 1 \leq h \leq m^*,$$

первая из которых возрастает, а вторая убывает по отношению доминирования.



*Определение 5 (класс 4).* Множество процессоров критического пути представляет собой пару соединенных последовательность

$$P_{[1]} \geq P_{[2]} \geq \dots \geq P_{[h]} \leq \dots \leq P_{[m^*]}, 1 \leq h \leq m^*,$$

первая из которых убывает, а вторая возрастает по отношению доминирования.

Очевидно, что на практике для распределенной системы общего вида, условия ее принадлежности к тому или иному разрешимому классу чаще всего не выполняются. В частности, могут не совпадать критические пути разных заданий, может нарушаться отношение доминирования между процессорами, а если оно и выполняется, то может не быть характерных для разрешимых классов упорядоченных по этому отношению цепочек процессоров. В результате исчезают гарантии оптимальности упомянутых выше алгоритмов, и теряет силу справедливый для разрешимых классов факт независимости качества плана от варианта упорядоченности некрайних заданий. В связи с этим используется пусть приближенный, но справедливый для любой из рассматриваемых систем рекурсивный алгоритм планирования, выполняемый за число шагов, не большее, чем исходное число заданий. На каждом шаге рекурсии определяется некоторый аналог критического пути, называемый псевдокритическим. Далее используется алгоритм планирования, соответствующий тому разрешимому классу, к которому наиболее близка рассматриваемая на данном шаге система. При этом выбранные задания занимают обе крайние позиции из интервала свободных позиций формируемого плана или одну из них. После размещения эти задания исключаются из исходного множества, и осуществляется переход к следующему шагу рекурсии, реализуемому уже для оставшегося множества заданий на множестве свободных позиций плана. В результате алгоритм последовательно размещает в плане все рассматриваемые задания в направлении от крайних заданий плана к центру.

*Алгоритм планирования по критерию минимизации суммарной неточности временной привязки.* По отношению к рассматриваемому ранее алгоритму планирования, новый алгоритм заключается не только в применении нового критерия, но и в оперировании интервальными длительностями задач. Как следствие, требуется небольшая корректировка определения отношения доминирования, но не определений разрешимых классов.

*Определение 6.* Процессор  $P_q$  доминирует над процессором  $P_r$  ( $P_q \geq P_r$ ), если  $\min_j p_q^{(j)} \geq \max_j \bar{p}_r^{(j)}, j = \overline{1, n}$ .

Далее будем различать входной и выходной джиттеры задания. В первом случае имеется в виду неточность привязки начала задания, а во втором случае – неточность привязки его конца.

Обозначим  $\Delta_k(\pi)$  как выходной джиттер для плана  $\pi$  для  $k$ -го разрешимого класса системы.

Приведем следующие утверждения выбора последовательности заданий.

*Утверждение 1.* Минимальное значение среднего по заданиям выходного джиттера  $\Delta_1(\pi)$  для системы из класса 1 достигается в плане  $\pi$ , в котором задания упорядочены по неубыванию джиттера их первых задач критического пути, т.е.

$$\Delta(\tau_{[1]}^{(1)}) \leq \Delta(\tau_{[1]}^{(2)}) \leq \dots \leq \Delta(\tau_{[1]}^{(n)}).$$

*Утверждение 2.* Минимальное значение среднего по заданиям выходного джиттера  $\Delta_2(\pi)$  для системы из класса 2 достигается в плане  $\pi$ , для которого выполняется:

1) задания упорядочены по неубыванию джиттера последних задач критического пути, т.е.

$$\Delta(\tau_{[m^*]}^{(1)}) \leq \Delta(\tau_{[m^*]}^{(2)}) \leq \dots \leq \Delta(\tau_{[m^*]}^{(n)}).$$

2) первое задания плана  $\pi$  удовлетворяет условию

$$j^* = \arg \min_j \sum_{i=1}^{m^*-1} \Delta(\tau_{[i]}^{(j)}).$$

*Утверждение 3.* Минимальное значение среднего по заданиям выходного джиттера  $\Delta_3(\pi)$  для системы из класса 3 достигается в плане  $\pi$ , для которого выполняется:

задания упорядочены по неубыванию джиттера задач стыковки критического пути, т.е.

$$\Delta(\tau_{[h]}^{(1)}) \leq \Delta(\tau_{[h]}^{(2)}) \leq \dots \leq \Delta(\tau_{[h]}^{(n)}).$$

1) первое задания плана  $\pi$  удовлетворяет условию

$$j^* = \arg \min_j \sum_{i=1}^{h-1} \Delta(\tau_{[i]}^{(j)}).$$

*Утверждение 4.* Минимальное значение среднего по заданиям выходного джиттера  $\Delta_4(\pi)$  для системы из класса 4 достигается в плане  $\pi$ , для которого выполняется:

2) задания упорядочены по неубыванию суммарного джиттера первых и последних задач критического пути, т.е.

$$\left( \Delta(\tau_{[1]}^{(1)}) + \Delta(\tau_{[m^*]}^{(1)}) \right) \leq \left( \Delta(\tau_{[1]}^{(2)}) + \Delta(\tau_{[m^*]}^{(2)}) \right) \leq \dots \leq \left( \Delta(\tau_{[1]}^{(n)}) + \Delta(\tau_{[m^*]}^{(n)}) \right).$$

3) первое задания плана  $\pi$  удовлетворяет условию

$$j^* = \arg \min_j \sum_{i=1}^{m^*-1} \Delta(\tau_{[i]}^{(j)}).$$

Очевидно, что на практике, как и в предыдущем случае, для распределенной системы общего вида, описанной в постановке задачи, условия ее принадлежности к тому или иному разрешимому классу чаще всего не выполняются. В связи с этим предлагается аналогичный приближенный, но справедливый для любой из рассматриваемых систем итерационный алгоритм планирования, выполняемый за число шагов, не большее, чем число заданий.

Для исследования эффективности алгоритмов планирования был осуществлён модельный эксперимент, основанный на случайной генерации тестовых примеров. Проводилось исследование для различных ациклических графов, формировалась оценка нижней границы оптимального планирования заданий путём расширения подхода Тейлора, предложенное им для конвейерной обработки информации [18].

Исследования показали, что средний проигрыш оценке нижней границы оптимального планирования заданий составил 8%.

Стоит отметить, что неоднозначность соотнесения системы к одному из разрешимых классов можно использовать в качестве генерации начального размещения агентов с дальнейшим использованием алгоритмов мультиагентной оптимизации, например для использования в методе роя частиц [19].

**Диагностирование программного обеспечения бортовых вычислителей [20–24].** Рассмотрим метод тестового диагностирования с параллельной моделью для распределенных бортовых вычислительных систем реального времени [22]. Объектом рассмотрения являются комплексы, на вход которых поступает периодический поток данных, примером такого комплекса, является гидроакустическая аппаратура АНПА, где с заданным периодом осуществляется съём информации с

приёмного элемента антенной решётки. Данный метод предполагает введением в систему избыточности с целью упрощения диагностического эксперимента и снижения трудоемкости его подготовки.

Проиллюстрируем решение на следующем примере. Пусть для определенности граф информационных связей системы имеет вид, представленный на рис. 3. Каждая из систем на основе входных данных ( $u_1$  – для  $\Sigma_1$ ,  $u_2$  – для  $\Sigma_2$ , и  $y_1$  и  $y_2$  – для  $\Sigma_3$ ) формирует выходные ( $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$  соответственно).

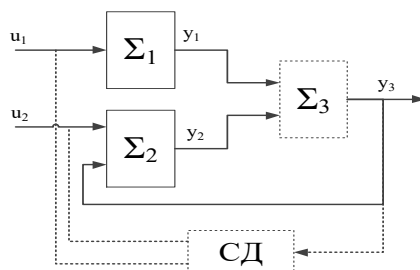


Рис. 3. Граф информационных связей системы

Все эти данные имеют вид массивов информационных слов. Пусть за период решения между системами происходит  $N$  сеансов обмена информацией. В данном случае их три. В первом сеансе система  $\Sigma_1$  передает информацию системе  $\Sigma_3$ , во втором система  $\Sigma_2$  передает информацию системе  $\Sigma_3$ , а в третьем система  $\Sigma_3$  передает информацию системе  $\Sigma_2$  и внешним потребителям.

Известно, что решение задачи диагностирования всегда связано с использованием в системе аппаратной, информационной или временной избыточности. Сами системы диагностики (СД) являются примером такой избыточности. Кроме того, перед синтезом СД в систему может вводиться избыточность с целью упрощения процесса диагностирования. В частности, это могут быть шаги по увеличению числа входов или выходов системы, по введению в систему специальных средств анализа и т.п. Вводимая избыточность формально может быть отнесена как к системе, так и к СД, что несущественно. Именно этому направлению, предполагающему введение избыточности для упрощения диагностирования, и принадлежит рассматриваемый далее подход, названный тестовым диагностированием с параллельной моделью. Сразу оговоримся, что этот подход справедлив не только для распределенных систем, но и для одной локальной системы, рассматриваемой в виде композиции реализуемых в ней программных модулей (ПМ). Допустим и третий вариант, когда распределенная система, представлена композицией ПМ. В дальнейшем в обозначениях будем следовать последнему варианту.

На рис. 4 рассматриваемый пример представлен уже в новых обозначениях совместно с СД. В каждый ПМ системы уже введена избыточность в виде алгоритмов  $\pi_{d1}$ ,  $\pi_{d2}$  и  $\pi_{d3}$ . СД состоят из генератора тестов (ГТ), генератора эталонных реакций (ГЭР) и компаратора (К).

СД формируют для системы тестовые данные, дополняя ими входные данные для ПМ<sub>1</sub> и ПМ<sub>2</sub>, и анализирует выходную реакцию системы  $\Sigma$  (ПМ<sub>3</sub>). В каждый ПМ – ПМ<sub>1</sub>, ПМ<sub>2</sub> и ПМ<sub>3</sub> – по каналам обмена поступает информация, которая обрабатывается штатными алгоритмами. Параллельно с этим тестовые информационные слова обрабатываются специальными алгоритмами  $\pi_{d1}$ ,  $\pi_{d2}$  и  $\pi_{d3}$ , реагирующими на события приема/выдачи информации, а результаты их обработки выдаются в составе выходных данных.

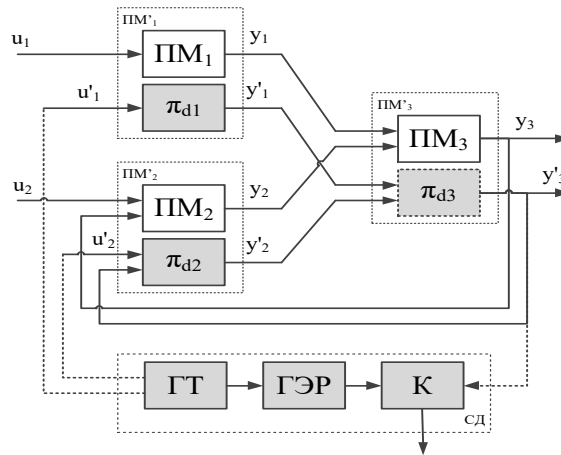


Рис. 4. Структура избыточной системы со средствами тестового диагностирования

Основу подхода к тестированию систем с параллельной моделью составляет алгоритм синтеза диагностической модели с иерархической структурой, состоящий из двух этапов. На первом этапе построения модели на основе известных алгоритмов [24] формируется множество вычислительных путей (трасс), составляющих покрытие дуг графа межмодульных связей. При этом под вычислительным путем понимаем последовательность срабатывающих ПМ, соединяющую некоторый вход системы с выходом. Затем с каждым из полученных путей сопоставляется цепь из такого числа динамических звеньев, через сколько ПМ проходит данный путь. После описанных построений модель системы представляется совокупностью функционально независимых цепей, а задача диагностирования может быть сведена к диагностированию отдельных цепей. На втором этапе учитывается, что искомая динамическая модель системы далее используется для построения тестов и что процедура построения тестов упрощается, если модель системы, во-первых, линейна, а во-вторых, управляема и наблюдаема. Отсюда можно сформулировать требование к звеньям цепей модели. Они должны быть линейны, т.е.

$$x_i(t + 1) = f_i x_i(t) + g_i u_i(t), \quad y_i(t) = h_i x_i(t), \quad i = \overline{1, v},$$

где  $x_i(t)$ ,  $u_i(t)$ ,  $y_i(t)$  – векторы состояния, входа и выхода,  $f_i, g_i, h_i$  – матрицы динамики, входа и выхода соответственно для  $i$ -го звена цепи,  $v$  – число звеньев в модели. Кроме того, звенья должны быть таковы, чтобы модель системы также была бы управляема и наблюдаема.

Описание цепи, получается, по следующим правилам. Предположим, что в каждый момент времени в системе происходит лишь один обмен. Тогда формируется вектор состояния  $x(t)$ , составленный из векторов состояния звеньев  $x_i(t)$   $i = \overline{1, v}$ , входящих в эту модель, а с помощью матриц  $F(t), G(t), H(t)$  описывается перенос информации между ПМ или ПМ и СД в каждом  $i$ -м информационном обмене. Если для удобства описания связать с каждой последовательностью матриц на интервале, равном периоду, свою последовательность индексов, множество которых обозначим через  $\Gamma = \{\gamma_s | s = \overline{1, N}\}$ , описание модели для системы  $\Sigma$  принимает вид:

$$x(t + 1) = F(\gamma_s(j))x(t) + G(\gamma_s(j))u(t), \quad y(t) = H(\gamma_s(j))x(t), \quad j = \overline{1, N}.$$

Матрицы в этих уравнениях зависят от номера такта (номера обмена), т.е. модель нестационарна. Более того, она периодически нестационарна, т.к. из-за периодичности входного потока процессы обработки данных в системе периодические.

Центральной проблемой второго этапа синтеза диагностической сетединамической модели является обеспечение ее наблюдаемости и управляемости путем соответствующего выбора ее звеньев. Эта проблема решается в результате анализа соответствующей стационарной модели системы. Последняя получается путем сведения к ней исходной периодически нестационарной системы. Проблема сведения или, другими словами, замены периодически нестационарной модели стационарной известна, причем известно также, что она не всегда имеет решение. Однако в важном для нас случае такое сведение возможно [23].

Опишем процедуру построения теста. Тест предназначен для обнаружения всех неэквивалентных искажений матриц системы, т.е. таких искажений, при которых неисправная система неэквивалентна исправной. Тест состоит из  $N$  фрагментов:

$$U_T = U_{\gamma_1} U_{\gamma_2} \dots U_{\gamma_N},$$

каждый из которых включает две характерные части:

$$U_{1\gamma_r} = u_{1\gamma_r}^* 0^{nN} u_{2\gamma_r}^* 0^{nN} \dots u_{n\gamma_r}^* 0^{nN},$$

$$U_{2\gamma_r} = u_{1\gamma_r} 0^{nN} u_{2\gamma_r} 0^{nN} \dots u_{m\gamma_r} 0^{nN}.$$

В первой части  $U_{1\gamma_r}$  всех фрагментов система при последовательности матриц  $\gamma_r$  проходит в пространстве состояний через состояния некоторого выбранного базиса  $X = \{x_s | s = \overline{1, n}\}$ . Для каждого состояния  $x_s$  в фрагменте предусмотрены установочная последовательность  $u_{s,\gamma_r}^*$  длиной, кратной  $N$ , и интервал свободного движения при последовательности матриц  $\gamma_r$ , когда на входе системы есть  $nN$  нулей, обозначенные как  $0^{nN}$ . Благодаря тому, что длины установочных последовательностей кратны  $N$ , все интервалы свободного движения система проходит при последовательности матриц  $\gamma_r$ . Во второй части  $U_{2\gamma_r}$  всех фрагментов на вход системы последовательно подаются векторы  $u_{q,\gamma_r}$ ,  $q = \overline{1, m}$ , принадлежащие некоторому базису пространства входных векторов. После каждого вектора система находится в свободном движении на  $nN$  тактах при последовательности матриц  $\gamma_r$ .

**Заключение.** Рассмотренные в работе алгоритмы реализованы в инструментальной среде проектирования программного обеспечения бортовых вычислителей робототехнических комплексов. На входе среды задаётся описание информационного графа и параметры задач. В результате выполнения, формируется проект, реализующий управления вычислительным процессом бортовой вычислительной системы с решением рассмотренных в работе проблем.

Практическая значимость работы определяется тем, что предложенные алгоритмы позволяют повысить эффективность применяемых на практике средств высокоуровневого проектирования. Предложенные решения были применены при разработке бортовых комплексов в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Платунов А.Е. Теоретические и методологические основы высокоуровневого проектирования встраиваемых вычислительных систем. – СПб.: Университет ИТМО, 2010. – 477 с.
2. Harris D., Harris S. Digital Design and Computer Architecture. – 2nd ed. – Morgan Kaufman, 2012.
3. Liu J.W.S. Real-Time Systems. Prentice Hall. – NJ, 2000. – 590 p.
4. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений. – М.: Физматлит, 2004. – 316 с.
5. Edward A. Lee and Sanjit A. Seshia. Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. – Second ed. – MIT Press, 2017.

6. *Kellerer H., Pferschy U., Pisinger U.* Knapsack Problems. – Springer, Berlin, Germany, 2004. – 546 p.
7. *Burkard R.E., Dell'Amico M. and Martello S.* Assignment problems. – SIAM, Philadelphia, 2009.
8. *Gonzalez T.F.* Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics. – Second ed. Vol. 2: Contemporary and Emerging Applications. Ed. Chapman. – 2018. – <https://doi.org/10.1201/9781351235426>.
9. *Jansen K.* Parameterized Approximation Scheme for the Multiple Knapsack Problem // SIAM Journal on Computing. – 2010. – Vol. 39, No. 4. – P. 1392-1412. – <https://doi.org/10.1137/080731207>.
10. *Cacchiani V., Iori M., Locatelli A. et al.* Knapsack problems - An overview of recent advances. Part II: Multiple, multidimensional, and quadratic knapsack problems // Computers & Operations Research. – 2022. – Vol. 143. – P. 105693. – <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105693>.
11. *Грузликов А.М., Колесов Н.В., Скородумов Ю.М., Толмачева М.В.* Графовый подход к назначению заданий в распределенных системах реального времени // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 5. – С. 84-94.
12. *Cottet F., Kaiser J., Mammeri Z.* Scheduling in Real-Time Systems. – John Wiley & Sons Ltd, 2002.
13. *Brucker P., Knust S.* Complex scheduling. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
14. *Лазарев А.А.* Теория расписаний. Методы и алгоритмы. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 408 с.
15. *Pinedo M.L.* Scheduling. Theory: Algorithms and systems. – Springer. Science, 2016. – 670 p.
16. *Грузликов А.М., Колесов Н.В., Скородумов Ю.М., Толмачева М.В.* Планирование заданий в распределенных системах реального времени // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 2. – С. 67-76.
17. *Грузликов А.М., Колесов Н.В.* Использование разрешимых классов систем реального времени для планирования с минимизацией джиттера // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2021. – № 6. – С. 43-51.
18. *Taillard E.* Benchmarks for Basic Scheduling Problems // Europ. J. Operational Research. – 1993. – Vol. 64, No. 2. – P. 278-285.
19. *Zhang X., Guo P., Zhang H., Yao, J.* Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm for Process Planning // Mathematics. – 2020. – Vol. 8. – P. 1745. – <https://doi.org/10.3390/math8101745>.
20. *Isermann R.* Fault Diagnosis Application. – Heidelberg: Springer, 2011. – 354 p.
21. *Zaytoon J., Lafortune S.* Overview of Fault Diagnosis Methods for Discrete Event Systems // Annual Reviews in Control. – 2013. – Vol. 37. – P. 308-320.
22. *Грузликов А.М., Колесов Н.В., Лукоянов Е.В.* Тестовое диагностирование нарушений адресации информационных обменов в вычислительных системах с использованием параллельной модели // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2018. – № 3. – С. 76-89.
23. *Gruzlikov A., Kolesov N., Lukoyanov E., and Tolmacheva M.* Test-based diagnosis of distributed computer system using a time-varying model // 10th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, SAFEPROCESS – 2018.
24. *Gruzlikov A.M., Kolesov N.V.* Hierarchical model for testing a distributed computer system // J. Korbicz et al. (eds.), Advances in Diagnostics of Processes and Systems, Studies in Systems, Decision and Control 313, 14th International Conference on Diagnostics of Processes and Systems (DPS), 2021.

#### REFERENCES

1. *Platunov A.E.* Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy vysokourovnevnogo proektirovaniya vstraivaemykh vychislitel'nykh sistem [Theoretical and methodological bases of high-level design of embedded computing systems]. St. Petersburg: Universitet ITMO, 2010, 477 p.
2. *Harris D., Harris S.* Digital Design and Computer Architecture. 2nd ed. Morgan Kaufman, 2012.
3. *Liu J.W.S.* Real-Time Systems. Prentice Hall. NJ, 2000, 590 p.
4. *Toporkov V.V.* Modeli raspredelennykh vychisleniy [Distributed computing models]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 316 p.
5. *Edward A. Lee and Sanjit A. Seshia.* Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. Second ed. MIT Press, 2017.
6. *Kellerer H., Pferschy U., Pisinger U.* Knapsack Problems. Springer, Berlin, Germany, 2004, 546 p.

7. *Burkard R.E., Dell'Amico M. and Martello S.* Assignment problems. SIAM, Philadelphia, 2009.
8. *Gonzalez T.F.* Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics. Second ed. Vol. 2: Contemporary and Emerging Applications. Ed. Chapman, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781351235426>.
9. *Jansen K.* Parameterized Approximation Scheme for the Multiple Knapsack Problem, *SIAM Journal on Computing*, 2010, Vol. 39, No. 4, pp. 1392-1412. Available at: <https://doi.org/10.1137/080731207>.
10. *Cacchiani V., Iori M., Locatelli A. et al.* Knapsack problems - An overview of recent advances. Part II: Multiple, multidimensional, and quadratic knapsack problems, *Computers & Operations Research*, 2022, Vol. 143, pp. 105693. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105693>.
11. *Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Skorodumov Yu.M., Tolmacheva M.V.* Grafovyy podkhod k naznacheniyu zadaniy v raspredelennykh sistemakh real'nogo vremeni [Graph approach to assignment of tasks in distributed real-time systems], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya of the RAS. Theory and control systems], 2014, No. 5, pp. 84-94.
12. *Cottet F., Kaiser J., Mammeri Z.* Scheduling in Real-Time Systems. John Wiley & Sons Ltd, 2002.
13. *Brucker P., Knust S.* Complex scheduling. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
14. *Lazarev A.A.* Teoriya raspisaniy. Metody i algoritmy [Schedule theory. Methods and algorithms]. Moscow: IPU RAN, 2019, 408 p.
15. *Pinedo M.L.* Scheduling. Theory: Algorithms and systems. Springer. Science, 2016, 670 p.
16. *Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Skorodumov Yu.M., Tolmacheva M.V.* Planirovanie zadaniy v raspredelennykh sistemakh real'nogo vremeni [Task scheduling in distributed real-time systems], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya of the RAS. Theory and control systems], 2017, No. 2, pp. 67-76.
17. *Gruzlikov A.M., Kolesov N.V.* Ispol'zovanie razreshimykh klassov sistem real'nogo vremeni dlya planirovaniya s minimizatsiey dzhittera [Using solvable classes of real-time systems for planning with jitter minimization], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya of the RAS. Theory and control systems], 2021, No. 6, pp. 43-51.
18. *Taillard E.* Benchmarks for Basic Scheduling Problems, *Europ. J. Operational Research*, 1993, Vol. 64, No. 2, pp. 278-285.
19. *Zhang X., Guo P., Zhang H., Yao, J.* Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm for Process Planning, *Mathematics*, 2020, Vol. 8, pp. 1745. Available at: <https://doi.org/10.3390/math8101745>.
20. *Isermann R.* Fault Diagnosis Application. Heidelberg: Springer, 2011, 354 p.
21. *Zaytoon J., Lafortune S.* Overview of Fault Diagnosis Methods for Discrete Event Systems, *Annual Reviews in Control*, 2013, Vol. 37, pp. 308-320.
22. *Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Lukoyanov E.V.* Testovoe diagnostirovanie narusheniy adresatsii informatsionnykh obmenov v vychislitel'nykh sistemakh s ispol'zovaniem paralel'noy modeli [Test diagnostics of addressing violations of information exchanges in computing systems using a parallel model], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya of the RAS. Theory and control systems], 2018, No. 3, pp. 76-89.
23. *Gruzlikov A., Kolesov N., Lukoyanov E., and Tolmacheva M.* Test-based diagnosis of distributed computer system using a time-varying model, *10th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, SAFEPROCESS – 2018*.
24. *Gruzlikov A.M., Kolesov N.V.* Hierarchical model for testing a distributed computer system, *J. Korbicz et al. (eds.), Advances in Diagnostics of Processes and Systems, Studies in Systems, Decision and Control 313, 14th International Conference on Diagnostics of Processes and Systems (DPS), 2021*.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.В. Колесов.

**Грузликов Александр Михайлович** – Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: [agruzlikov@yandex.ru](mailto:agruzlikov@yandex.ru); г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89312664852; к.т.н.; начальник отдела.

**Gruzlikov Alexander Mikhailovich** – State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor; e-mail: [agruzlikov@yandex.ru](mailto:agruzlikov@yandex.ru); Saint Petersburg, Russia; phone: +79312664852; cand. of eng. sc.; head of the department.

С.Е. Кондаков, К.С. Чудин, М.В. Болычев

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГРОЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ КАДРОВОГО ОРГАНА ПРЕДПРИЯТИЯ ОПК

Целью данной статьи является обоснование показателя для оценки эффективности мер обеспечения безопасности персональных данных кадрового органа предприятия промышленного комплекса (далее – ОПК). Для построения математической модели вероятности возникновения угрозы используется методический аппарат оценки актуальных угроз безопасности информации, сформированных на основе нормативно-методических документов ФСТЭК России. В статье приводится авторская интерпретация основных методических положений, представленных в рассматриваемых документах, применительно к оценке угроз безопасности персональных данных (далее - ПДн) кадрового органа предприятия ОПК. Особенностью выявления уязвимостей информационных ресурсов кадрового органа предприятия ОПК, через которые возможна реализация угроз безопасности ПДн, является использование расчетных методик, позволяющих установить факт потенциальной возможности угрозы. Для определения уязвимостей информационных ресурсов кадрового органа предприятия ОПК к реализации угроз безопасности ПДн проводится экспертный анализ информационной среды ИС. В результате формируется множество, элементы которого и определяют уязвимости. Таким образом, следует рассматривать математическую модель вероятностной характеристики возникновения угрозы безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК как произведение вероятностей предотвращения несанкционированного копирования, несанкционированной модификация и блокирование доступа к информационным ресурсам ИС кадрового органа предприятия ОПК.

Персональные данные; угрозы безопасности; экспертный анализ.

S.E. Kondakov, C.S. Chudin, M.V. Bolichev

### MATHEMATICAL MODEL OF EMERGENCY SAFETY OPK

The purpose of this article is to substantiate the indicator for evaluating the effectiveness of measures to ensure the security of personal data of the personnel body of an industrial complex enterprise (hereinafter - the defense industry). To build a mathematical model of the probability of a threat, the methodological apparatus for assessing current threats to information security, formed on the basis of regulatory and methodological documents of the FSTEC of Russia, is used. The article presents the author's interpretation of the main methodological provisions presented in the documents under consideration in relation to the assessment of threats to the security of personal data (hereinafter - PD) of the personnel body of the defense industry enterprise. The peculiarity of identifying vulnerabilities of information resources of the personnel body of the defense industry enterprise, through which it is possible to implement threats to the security of PD, is the use of calculation methods that allow to establish the fact of the potential possibility of a threat. To determine the vulnerabilities of the information resources of the personnel body of the defense industry enterprise to the implementation of threats to the security of PD, an expert analysis of the information environment of the IP is carried out. As a result, a set is formed, the elements of which determine vulnerabilities. Thus, it is necessary to consider a mathematical model of the probabilistic characteristics of the occurrence of a threat to the security of the PD of the personnel body of the defense industry enterprise as a product of the probabilities of preventing unauthorized copying, unauthorized modification and blocking access to the information resources of the IS of the personnel body of the defense industry enterprise.

Personal data; security threats; expert analysis.

**Введение.** Современная философия относит понятие «эффективность» (лат. *efficientia*) к общеметодологическим категориям и трактует ее, как «способность производить определённый эффект» [1]. Естественно полагать, что в основе любого частного определения данного понятия будет лежать субъективное понимание эф-



факта. Анализ исследуемой предметной области дает основание предложить следующий вариант определения понятия «эффективность мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК». Исходя из целей обеспечения безопасности ПДн под эффективностью соответствующих мер следует понимать их способность обеспечить заданный уровень качества деятельности кадрового органа предприятия ОПК в условиях угроз нарушения состояний защищенности ПДн.

Из данного определения очевидно, что для процесса обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК, как объекта исследования, характерна необходимость анализа трех взаимосвязанных явлений – угроз безопасности ПДн, обеспечение безопасности ПДн, а так же обработка ПДн в условиях угроз безопасности ПДн и реализации мер по обеспечению безопасности ПДн.

Подобная специфичность трансформируется и на исследовательский аппарат, применяемый для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК.

**Постановка задачи исследования.** С учетом этого сформулируем задачу построения математической модели угрозы безопасности персональных данных кадрового органа предприятия ОПК.

Для этого необходимо сформулировать концепцию построения исследовательского аппарата. В основе концепции лежит положение о системном характере показателя эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК, что является следствием системной природы такого рода мер.

Это приводит к необходимости интегрированного отражения в данном показателе трех взаимосвязанных множеств характеристик, отражающих возможности по реализации угроз безопасности ПДн, возможности по реализации мер обеспечения безопасности ПДн, а так же возможности кадрового органа предприятия ОПК, как оператора ПДн [2], по их обработке в условиях угроз безопасности и реализации мер обеспечения безопасности ПДн. В свою очередь интегральный характер показателя эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК требует однотипной метрики оценки этих характеристик.

Важнейшей особенностью концепции построения исследовательского аппарата для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК является то, что при проведении исследований в данной сфере деятельности, как впрочем, и в деятельности по обеспечению безопасности информации в целом, натурные эксперименты применяются в самом минимальном объеме. Это обстоятельство обусловлено существенным ущербом деятельности кадрового органа предприятия ОПК, связанного с рисками нарушения безопасности ПДн при проведении таких экспериментов. Следствием этого является построение исследовательского аппарата для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК на основе методологии математического моделирования.

Это влечет за собой необходимость адаптации данной методологии к рассматриваемой области исследований как в теоретическом, так и в практическом плане. Направлением совершенствования теории моделирования должна стать разработка методического аппарата систематизации математических моделей для оценки возможностей нарушителя по реализации угроз безопасности ПДн и возможностей по обеспечению заданного уровня качества деятельности кадрового органа предприятия ОПК в условиях подобного рода угроз. Направлениями совершенствования практики моделирования в данной области должно стать научное обоснование требований к совершенствованию мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК на основе вычислительных экспериментов с разработанными моделями [3, 4].

Как любая концепция, концепция построения исследовательского аппарата для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК реализует два базовых принципа – принцип дифференциации исследуемых явлений и принцип их интегративности. Дифференциация исследуемых явлений предполагает их системный анализ. С этой целью производится декомпозиция соответствующих целевых функций – целевой функции действий нарушителя по реализации угроз безопасности ПДн и целевой функции действий должностных лиц кадрового органа ОПК по обеспечению безопасности ПДн. В соответствии с принципом интегративности исследуемых явлений предполагается, что показатель эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК формируется в результате синтеза характеристик угроз безопасности ПДн и характеристик мер, направленных на обеспечение безопасности ПДн.

Таким образом, задача построения математической модели вероятности возникновения угрозы сводится к построению методического аппарата оценки актуальных угроз безопасности информации, сформированных на основе нормативно-методических документов.

**Описание алгоритма исследования.** Методологическим базисом концепции построения исследовательского аппарата для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК являются основы информационной безопасности, что предполагает [5, 6]:

1. Формулировку цели оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК, задач, решаемых для достижения этой цели и определение методов построения соответствующей исследовательской среды для их решения.

2. Разработку методик, позволяющих характеризовать возможности нарушителя по реализации угроз безопасности ПДн и возможности по обеспечению заданного уровня качества деятельности кадрового органа предприятия ОПК в условиях подобного рода угроз как факторы, определяющие эффективность мер обеспечения безопасности ПДн.

3. Разработку структурного представления процессов обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК, как следствия угроз безопасности ПДн.

4. Обоснование системной классификации характеристик мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК на основе анализа различных вариантов угроз безопасности ПДн и процессов обеспечения заданного уровня качества деятельности кадрового органа предприятия ОПК в условиях подобного рода угроз.

5. Разработка математических моделей для исследования угроз безопасности ПДн и процессов обеспечения заданного уровня качества деятельности кадрового органа предприятия ОПК в условиях подобного рода угроз.

6. Формирование исследовательской среды для проведения вычислительных экспериментов по оценке эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК.

7. Определение критериев, обеспечивающих возможность формального обоснования требований к характеристикам средств, используемых в процессе реализации мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК.

На рис. 1 приводится порядок формирования соответствующей исследовательской среды.

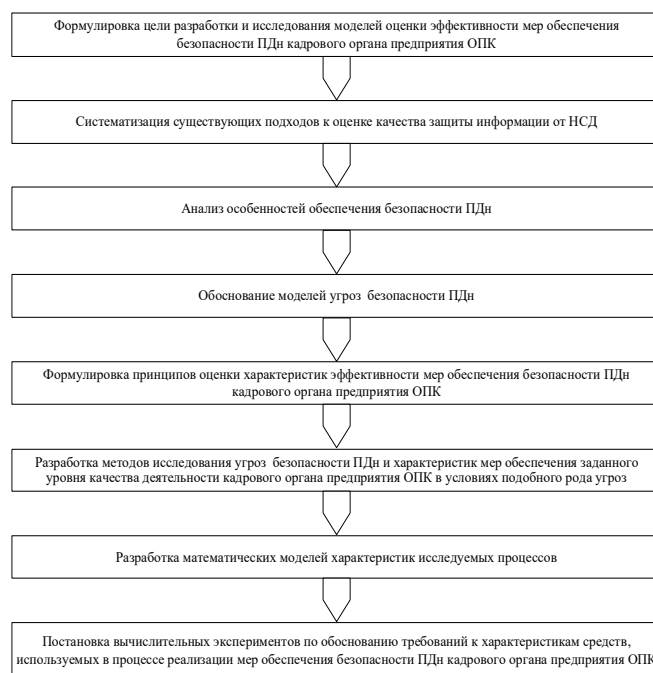


Рис. 1. Порядок формирования исследовательской среды для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК

Исходя из общеметодологических положений системного анализа методические основы построения исследовательской среды для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК следует рассматривать как систему взглядов относительно возможностей исследования угроз безопасности ПДн и процессов обеспечения заданного уровня качества деятельности кадрового органа предприятия ОПК в условиях подобного рода угроз. Присущая такой системе целостность представления о путях решения исследуемой проблемы достигается за счет систематизации опыта оценки возможностей механизмов защиты ПДн и адекватного отображения структуры и содержания взаимосвязей с другими проблемами в сфере обеспечения безопасности информации. Выбор направлений эффективного решения задач моделирования таких механизмов и предоставление для этого соответствующих методических средств достигается за счет реализации в данной предметной области общеметодологических принципов системного анализа, теории моделирования систем и практики проведения вычислительных экспериментов с математическими моделями [7–9].

Основными этапами формирования концепции построения исследовательского аппарата для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК являются:

1) сбор и систематизация сведений о необходимости создания соответствующей исследовательской среды, адекватно учитывающих потребности этого данного органа в обеспечении информационной безопасности и объективные предпосылки обеспечения безопасности ПДн;

2) анализ существующего опыта разработки теоретических основ решения подобных задач;

3) формулировка формализованной постановка научно обоснованной задачи создания исследовательской среды для адекватной оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК, обоснование порядка решения данной задачи;

4) выработка системных требований к порядку исследования эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК, учитывающих условия обеспечения высокой адекватности оценки;

5) разработка макроструктуры содержания конкретных прикладных методов оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК и реализация этих методов.

Предложенная концепция построения исследовательского аппарата для оценки характеристик мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК позволяет сформировать исследовательскую среду для адекватной оценки эффективности таких мер.

Исходя из обоснованного выше определения понятия «эффективность мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК» очевидно, что соответствующий показатель должен отражать следующие возможности:

- ◆ возможности нарушителя по реализации угроз безопасности ПДн;
- ◆ возможности по предотвращению нарушения состояний защищенности информации в работе кадрового органа предприятия ОПК;
- ◆ возможности кадрового органа предприятия ОПК, как оператора ПДн, по их обработке в условиях угроз безопасности ПДн и реализации процессов защиты информации.

Существующий методический аппарат позволяет оценить возможности нарушителя по реализации угроз безопасности информации двумя типами характеристик.

Первый тип характеристик отражает экспертную оценку причинно-следственных отношений между источниками угроз безопасности информации, ее уязвимостями к такого рода угрозам и возможностями реализации данными угрозами деструктивного воздействия на информационные ресурсы или процессы. Естественно, что эмпирический характер экспертизы приводит к вероятностному характеру оценок.

Второй тип характеристик отражает функциональные возможности по реализации нарушителем угроз безопасности информации и представляется временными характеристиками выполняемых им функций.

**Решение задачи исследования.** Исходя из этого, к показателям, характеризующим возможности нарушителя по реализации угроз безопасности ПДн, следует отнести вероятность  $P_{(i\bar{o})}$  угрозы безопасности ПДн и время  $\tau_{(i\bar{o})}$  ее реализации нарушителем.

При характеристике возможностей по предотвращению нарушения состояний защищенности информации в работе кадрового органа предприятия ОПК следует учитывать варианты формализованного представления такого рода возможностей. Наиболее распространенным в методологии информационной безопасности вариантом является вариант их представления в виде показателя своевременности предотвращения нарушения состояний защищенности информации. Соответствующий показатель формально интерпретируется как характеристика времени  $\tau_{(n)}$  предотвращения нарушения нормированного продолжительностью  $\tau_{(n)}$  действий нарушителя. Данный показатель определяется исходя из условий:

$$C_{(n)} = 1 \text{ при } \tau_{(n)} \leq \tau_{(n)} \quad (1)$$

и

$$C_{(n)} = 0 \text{ при } \tau_{(n)} > \tau_{(n)}. \quad (2)$$

В общем случае обе входящие в неравенства (1) и (2) величины являются случайными, а их выполнение является случайным событием. Вероятность  $P(\tau_{(n)} \leq \tau_{(n)})$  данного события представляет собой среднее количество ситуаций, при которых в течение продолжительности деструктивного воздействия на информацию удалось предотвратить нарушения состояний ее защищенности относительно общего числа попыток нарушения на временном сегменте  $[t_{(nu)}, t_{(ou)}]$  от момента начала  $t_{(nu)}$  до момента окончания  $t_{(ou)}$  исследования:

$$P(\tau_{(n)} \leq \tau_{(n)}) = \frac{\sum_{i=1}^I \alpha_i}{I}, \quad (3)$$

где

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & \text{при } \tau_{(n)i} \leq \tau_{(n)i}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$\tau_{(n)i}$  и  $\tau_{(n)i}$  – время предотвращения и продолжительность действий нарушителя по реализации  $i$ -го,  $i = 1, 2, \dots, I$ , нарушения состояний защищенности информации, соответственно;

$I$  – общее число попыток нарушения состояний защищенности информации, фиксируемых на временном сегменте  $[t_{(nu)}, t_{(ou)}]$ .

С учетом изложенного выражение для характеристики своевременности предотвращения нарушения состояний защищенности информации в работе кадрового органа предприятия ОПК может иметь следующий формат:

$$C_{(n)} = P(\tau_{(n)} \leq \tau_{(n)}). \quad (4)$$

Возможности по обработке ПДн в условиях угроз их безопасности и реализации мероприятий, направленных на предотвращение нарушения состояний защищенности информации. В соответствии с сформулированным требованием одно-типной метрики оценки характеристик эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК показатель возможностей по обработке ПДн в условиях угроз их безопасности и реализации мероприятий, направленных на предотвращение нарушения состояний защищенности информации, представляется как результат нормирования времени обработки ПДн его максимально допустимым значением. Формально это можно представить, как

$$C = 1 \text{ при } \tau_{(ПДн)} \leq \tau_{(max)} \quad (5)$$

и

$$C = 0 \text{ при } \tau_{(ПДн)} > \tau_{(max)}, \quad (6)$$

где  $C$  – показатель своевременности обработки ПДн;  $\tau_{(ПДн)}$  – время реализации процессов обработки ПДн;  $\tau_{(max)}$  – максимально допустимое значение времени  $\tau_{(ПДн)}$ .

С учетом рассмотренных выше характеристик и показателей возможностей нарушителя по реализации угроз безопасности ПДн и возможностей по предотвращению нарушения состояний защищенности информации в работе кадрового органа предприятия ОПК время  $\tau_{(ПДн)}$  реализации процессов обработки ПДн является функцией

$$\tau_{(ПДн)} = \tau_{(ПДн)}^{(uy)} [ \tau_{(ПДн)}^{(uy)}, \tau_{(e)}, P_{(y\delta)}, C_{(n)}(\tau_{(n)}, \tau_{(n)}), \tau_{(ек)} ] \quad (7)$$

следующих параметров:

$\tau_{(ПДн)}^{(uy)}$  – случайной величины значения времени обработки ПДн в идеальных условиях (в условиях отсутствия угроз безопасности ПДн и механизмов защиты информации от такого рода угроз безопасности информации);

$\tau_{(e)}$  – случайной величины времени, затрачиваемого на выявление признаков деструктивного воздействия на ПДн, проявляющегося при реализации угрозы их безопасности;

$P_{(v\bar{o})}$  – вероятности угрозы безопасности ПДн;

$C_{(n)}(\tau_{(n)}, \tau_{(u)})$  – показателя своевременности предотвращения нарушения состояний защищенности информации в работе кадрового органа предприятия ОПК;

$\tau_{(n)}$  – случайной величины времени предотвращения нарушения состояний защищенности информации в работе кадрового органа предприятия ОПК;

$\tau_{(u)}$  – продолжительности действий нарушителя по реализации угроз безопасности ПДн;

$\tau_{(ак)}$  – случайной величины времени, затрачиваемого на восстановление корректности процессов обработки ПДн.

Величина  $\tau_{(max)}$  определяется нормативными требованиями к времени реализации процессов обработки ПДн.

В соответствии с приведенным в статьях [12–14] обоснованием показателей для оценки эффективности мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК возможности нарушителя характеризуются и вероятностью возникновения угрозы  $P_{(v\bar{o})}$ .

С целью построения математической модели вероятностной характеристики возникновения угрозы воспользуемся методическим аппаратом оценки актуальных угроз безопасности информации, сформированным на основе соответствующих нормативно-методических документов ФСТЭК России [10, 11].

Ниже приводится авторская интерпретация основных методических положений, представленных в рассматриваемых документах, применительно к оценке угроз безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК.

Рассматриваемые методики [15, 16] дают возможность отнести факторы, способствующие возникновению угроз безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК, путем анализа соответствий между источниками угроз и их признаками. При этом в основе анализа лежит эмпирика опыта экспертов. В результате формируется множество  $\{a_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, |a_k|$ , элементы которого являются признаками источников угроз, а индексы – их номерами.

Источниками угроз безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК являются:

$k = 1$  – иностранные спецслужбы;

$k = 2$  – пользователи ИС кадрового органа предприятия ОПК;

$k = 3$  – производители оборудования и организации, осуществляющие ремонт и обслуживание СВТ и периферийного оборудования ИС;

$a_1$  – наличие интереса у иностранных спецслужб к информационным ресурсам кадрового органа предприятия ОПК;

$a_2$  – самостоятельное проведение должностными лицами кадрового органа предприятия ОПК обслуживания СВТ и периферийного оборудования ИС;

$a_3$  – использование несертифицированного программного обеспечения (ПО) при техническом обслуживании и ремонтно-восстановительных работах в ИС.

Особенностью выявления уязвимостей информационных ресурсов кадрового органа предприятия ОПК, через которые возможна реализация угроз безопасности ПДн, является использование расчетных методик, позволяющих установить факт потенциальной возможности угрозы [17, 18, 19].

Для определения уязвимостей информационных ресурсов кадрового органа предприятия ОПК к реализации угроз безопасности ПДн проводится экспертный анализ информационной среды ИС. В результате формируется множество  $\{b_l\}$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$ , элементы которого определяют уязвимости. При этом индексы соответствуют номерам уязвимостей из их перечня.

Для случая оценки возможностей нарушителя по реализации угрозы безопасности ПДн уязвимыми для такого рода угроз являются:

- $b_1$  – драйверы средств ввода информации;
- $b_2$  – драйверы средств отображения информации;
- $b_3$  – драйверы средств обработки информации;
- $b_4$  – драйверы микросхем BIOS;
- $b_5$  – ПО серверов с открытым физическим доступом;
- $b_6$  – ПО коммуникационного оборудования ИС;
- $b_7$  – стек протоколов TCP/IP;
- $b_8$  – протоколы межсетевое взаимодействия прикладного уровня;
- $b_9$  – недокументированные точки межсетевое взаимодействия;
- $b_{10}$  – несертифицированные компоненты ПО;
- $b_{11}$  – электронная почта;
- $b_{12}$  – Web-браузер;
- $b_{13}$  – кабели оборудования ИС на участках, где к ним имеется физический доступ.

Результатом экспертизы возможностей по использованию источниками угроз уязвимостей информации служит качественная оценка этих возможностей, представляемая в терминах лингвистической шкалы, где терминами «да» и «нет» характеризуются высший и низший уровень таких возможностей, соответственно, а терминами «вероятно», «возможно» и «маловероятно» – промежуточные уровни. Лингвистическим значениям оценки возможностей использования  $k$ -м источником угрозы компьютерной атаки  $l$ -ой уязвимости ставятся в соответствие количественные значения вероятности  $p_{kl}$  использования. При этом процедура установок соответствий является эмпирической.

На основании данной вероятности определяется вероятность  $P_l$  использования  $l$ -й уязвимости ( $l = 1, 2, \dots, 13$ ) возможными тремя источниками угроз:

$$P_l = 1 - (\gamma_1 \cdot (1 - p_{1l}) \cdot \gamma_2 \cdot (1 - p_{2l}) \cdot \gamma_3 \cdot (1 - p_{3l})), \quad (8)$$

где  $\gamma_k$  – коэффициент соответствия, равный 1, если  $l$ -я уязвимость соответствует  $k$ -му источнику и 0, если не соответствует.

Это позволяет сформировать множество  $\{u_m\}$ ,  $m = 1, 2, \dots, 14$ , угроз безопасности ПДн [18]:

- $u_1$  – загрузка вредоносного ПО с функциями альтернативной ОС с расширенными полномочиями;
- $u_2$  – несанкционированное копирование информации;
- $u_3$  – несанкционированная модификация информации;
- $u_4$  – внедрение ложного доверенного объекта;
- $u_5$  – подмена системного ПО;
- $u_6$  – перенаправление сетевого трафика;
- $u_7$  – манипулирование данными в удаленном режиме;
- $u_8$  – вскрытие электронного почтового ящика;
- $u_9$  – блокирование электронного почтового ящика;
- $u_{10}$  – подмена Web-браузеров;
- $u_{11}$  – использование ошибок в алгоритмах прикладного ПО;
- $u_{12}$  – блокирование хоста пользователя;
- $u_{13}$  – блокирование маршрутизатора;
- $u_{14}$  – обход межсетевого экрана.

Количественной характеристикой уровня  $m$ -ой,  $m = 1, 2, \dots, 14$ , угрозы безопасности ПДн является вероятность:

$$P_m^{(y)} = 1 - \prod_{l=1}^{15} (1 - \alpha_{lm} \cdot P_l), \quad (9)$$

где  $P_l$  – соответствует выражению (8);

$\alpha_{lm}$  – коэффициент актуальности уязвимостей информации кадрового органа предприятия ОПК для инициализации угроз безопасности ПДн, равный 1, если  $l$ -я уязвимость актуальна для инициализации  $m$ -ой угрозы и 0, если не актуальна.

Значения коэффициента актуальности уязвимостей информации кадрового органа предприятия ОПК для инициализации угроз безопасности ПДн приводятся в табл. 1.

Таблица 1

**Значения коэффициента актуальности уязвимостей информации для инициализации угроз безопасности ПДн**

Угрозы безопасности ПДн	Уязвимости ИС к реализации угроз безопасности ПДн												
	$b1$	$b2$	$b3$	$b4$	$b5$	$b6$	$b7$	$b8$	$b9$	$b10$	$b11$	$b12$	$b13$
$u1$	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
$u2$	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
$u3$	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
$u4$	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$u5$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$u6$	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
$u7$	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
$u8$	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0
$u9$	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0
$u10$	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
$u11$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$u12$	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
$u13$	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
$u14$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Количественной характеристикой деструктивного воздействия на информацию в результате реализации угроз безопасности ПДн [20, 21] кадрового органа предприятия ОПК является вероятность:

$$P_n^{(d)} = 1 - \prod_{m=1}^{14} (1 - \delta_{mn} \cdot P_m^{(y)}), \quad (10)$$

где  $P_m^{(y)}$  – соответствует выражению (2/37);

$n$  – номер деструкции (1 – несанкционированное копирование ПДн, 2 – их несанкционированная модификация, 3 – блокирование доступа к информационным ресурсам ИС кадрового органа предприятия ОПК);

$\delta_{mn}$  – коэффициент деструкции, равный 1, если  $m$ -я угроза реализует  $n$ -ю деструкцию и 0, если не реализует.



Значения коэффициента деструкции угроз безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК приводятся в табл. 2. В таблице использованы следующие условные обозначения деструкций: *НК* – несанкционированное копирование ПДн, *НМ* – несанкционированная модификация ПДн, *БД* – блокирование доступа к информационным ресурсам ИС кадрового органа предприятия ОПК.

Таблица 2

**Значения коэффициента деструкции угроз безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК**

Деструкции	Угрозы безопасности ПДн													
	<i>u1</i>	<i>u2</i>	<i>u3</i>	<i>u4</i>	<i>u5</i>	<i>u6</i>	<i>u7</i>	<i>u8</i>	<i>u9</i>	<i>u10</i>	<i>u11</i>	<i>u12</i>	<i>u13</i>	<i>u14</i>
НК	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
НМ	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
БД	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1

На основании изложенного вероятность  $P_{(y\phi)}$  угрозы угроз безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК определяется в соответствии с выражением:

$$P_{(y\phi)} = 1 - \prod_{n=1}^3 (1 - P_n^{(D)}). \quad (11)$$

Таким образом, с учетом выражений (8)-(10) выражение (11) следует рассматривать как математическую модель вероятностной характеристики возникновения угрозы безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК.

**Заключение.** Фундаментальными свойствами, характеризующими возможности по обеспечению защиты ПДн кадрового органа предприятия ОПК является свойство эффективности соответствующих мер. Эффективность мер обеспечения безопасности ПДн кадрового органа предприятия ОПК определяется как их способность обеспечить заданный уровень качества деятельности кадрового органа предприятия ОПК в условиях угроз нарушения состояний защищенности ПДн. Тривиальность идеи экспертной оценки обстоятельств, влияющих на защищенность объектов информатизации, является предпосылкой широкого использования рассмотренного методического аппарата на практике, что является его несомненным достоинством. Что касается недостатков, то к ним следует отнести низкую адекватность формальной модели угроз безопасности ПДн, не учитывающей особенности действий нарушителя и формальной интерпретации динамики НСД к информации кадрового органа предприятия ОПК, не учитывающей случайные состояния процесса его обнаружения.

Задача исследования сводилась к разработке математической модели, характеризующей возможности предотвращения НСД к ПДн кадрового органа предприятия ОПК, как упорядоченного, за счет структурной согласованности с соответствующими функциональными моделями, множества, что позволяет повысить адекватность оценки и обеспечить обоснованность требований к способам и средствам обеспечения защищенности ИСПДн рассматриваемого класса от НСД к информации.

В соответствии с исходными данными при моделировании исследуемых процессов с целью определения показателей, характеризующих возможности предотвращения НСД к ПДн кадрового органа предприятия ОПК, используются значения времени реализации функций выявления признаков соответствующих действий нарушителя. Данная характеристика является измеряемой, ее значения фиксируются

соответствующими компонентами операционной системы и представляются случайными выборками. Вид аналитических моделей временных характеристик угроз НСД к ПДн кадрового органа предприятия ОПК и процессов предотвращения такого рода угроз определяется функциональными моделями этих процессов. Учитывая выше изложенное построенная математическая модель оценки возможностей предотвращения НСД к ПДн кадрового органа предприятия ОПК позволяет количественно оценивать показатель эффективности мер обеспечения безопасности ПДн.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффективность\\_\(философия\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффективность_(философия)).
2. Закон Российской Федерации «О персональных данных» от 27 июля 2006 г. № 152-ФЗ // Рос. газ. – 29 июля 2006.
3. Покусов В.В. Оценка эффективности системы обеспечения ИБ. Ч. 1. Показатели и модели представления // Защита информации. Инсайд. – 2019. – № 2 (86). – С. 54-60.
4. Язов Ю.К., Авсентьев О.С., Рубцова И.О. К вопросу об оценке эффективности защиты информации в системах электронного документооборота // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 1 (29). – С. 25-34.
5. Кондаков С.Е., Чудин К.С. Разработка исследовательского аппарата оценки эффективности мер обеспечения защиты персональных данных // Вопросы кибербезопасности. – 2021. – № 5 (45). – С. 45-51.
6. Мирошниченко Е.Л., Пасечник Р.М., Большев М.В. Алгоритм построения диаграммы достижимости модели состояния работоспособности информационной системы // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 6 (34). – С. 79-91.
7. Щеглов А.Ю., Щеглов К.А. Математические модели и методы формального проектирования систем защиты информационных систем: учеб. пособие по дисциплине «Безопасность вычислительных систем и сетей». – СПб., 2015.
8. Probabilistic Modeling in System Engineering / by ed. A. Kostogryzov. – London: IntechOpen, 2018. – 278 p. 10.5772/intechopen.71396. – DOI: 10.5772/intechopen.71396.
9. Булдакова Т.И., Миков Д.А. Обеспечение согласованности и адекватности оценки факторов риска информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. – 2017. – № 3 (21). – С. 8-15. – DOI: 10.21681/2311-3456-2017-3-08-15.
10. Методический документ. Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных, утв. ФСТЭК России 14.02.2008.
11. Методический документ. Методика оценки угроз безопасности информации. Меры защиты информации в государственных информационных системах. Методический документ ФСТЭК России. Утвержден 11 февраля 2014 г. ии, утв. ФСТЭК России 05.02.2021.
12. Мецерыкова Т.В., Скрьль С.В., Фирюлин М.Е. Математические модели информационных процессов в автоматизированных информационных системах органов внутренних дел в условиях простейшей модели нарушения безопасности информации: монография. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2017. – 124 с.
13. Скрьль С.В., Кондаков С.Е., Чудин К.С. Обоснование показателя для оценки эффективности мер обеспечения защиты персональных данных в деятельности кадрового органа службы защиты государственной тайны // Информационная безопасность – актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности: Матер. XXI Всероссийской межведомственной научно-технической конференции. Т. 1. – Краснодар: КВВУ, 2020. – С. 19-24.
14. Казарин О.В., Кондаков С.Е., Троицкий И.И. Подходы к количественной оценке защищенности информационных ресурсов автоматизированных систем // Вопросы кибербезопасности. – 2015. – № 2 (10). – С. 31-35.
15. Скрьль С.В., Гайфулин В.В., Сычев В.М., Грачева Ю.В. [и др.]. Актуальные вопросы проблематики оценки угроз компьютерных атак на информационные ресурсы значимых объектов критической информационной инфраструктуры // Безопасность информационных технологий. – 2021. – № 1. – С. 24-33.
16. Кондаков С.Е., Мецерыкова Т.В., Скрьль С.В., Стадник А.Н., Суворов А.А. Вероятностное представление условий своевременного реагирования на угрозы компьютерных атак // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 6 (34). – С. 59-68. – DOI: 10.21681/2311-3456-2019-6-59-68.

17. Максимова Е.А., Кузнецова М.А., Топилин Я.Н., Федонюк Н.И., Петрищева Т.С. Внутренний контроль соответствия обработки ПДн требованиям к их защите // Защита информации. Инсайд. – 2019. – № 6 (90). – С. 5-9.
18. Терентьева Л.В. Критерий «направленной деятельности» применительно к отношениям, связанным с защитой персональных данных // Правовая информатика. – 2021. – № 1. – С. 61-69. – DOI: 10.21681/1994-1404-2021-1-61-69.
19. Лившиц И.И. Оценка степени влияния General Data Protection Regulation на безопасность предприятий в Российской Федерации // Вопросы кибербезопасности. – 2020. – № 4 (38). – С. 66-75.
20. Хасин Е.В., Астрахов А.В., Кондаков С.Е. [и др.]. Безопасность операционных систем: учебное пособие для системы высшего профессионального образования / под ред. С.В. Скрыля. – М.: Издательский центр «Академия», 2021. – 256 с.
21. Скрыль С.В., Шелупанов А.А. Основы системного анализа в защите информации: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. – М.: Машиностроение, 2008. – 138 с.

## REFERENCES

1. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Effektivnost'\\_\(filosofiya\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Effektivnost'_(filosofiya)).
2. Zakon Rossiyskoy Federatsii «O personal'nykh dannykh» ot 27 iyulya 2006 g. № 152-FZ [The Law of the Russian Federation "On Personal Data" dated July 27, 2006 No. 152-FZ], *Ros. gaz.* [Russian Gas], 29 iyulya 2006.
3. Pokusov V.V. Otsenka effektivnosti sistemy obespecheniya IB. Ch. 1. Pokazateli i modeli predstavleniya [Evaluation of the effectiveness of the information security system. Part 1. Indicators and presentation models], *Zashchita informatsii. Insayd* [Information protection. Inside], 2019, No. 2 (86), pp. 54-60.
4. Yazov Yu.K., Avsent'ev O.S., Rubtsova I.O. K voprosu ob otsenke effektivnosti zashchity informatsii v sistemakh elektronnoy dokumentooborota [On the issue of evaluating the effectiveness of information protection in electronic document management systems], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity issues], 2019, No. 1 (29), pp. 25-34.
5. Kondakov S.E., Chudin K.S. Razrabotka issledovatel'skogo apparata otsenki effektivnosti mer obespecheniya zashchity personal'nykh dannykh [Development of a research apparatus for evaluating the effectiveness of measures to ensure the protection of personal data], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Issues of cybersecurity], 2021, No. 5 (45), pp. 45-51.
6. Miroshnichenko E.L., Pasechnik R.M., Bolychev M.V. Algoritm postroyeniya diagrammy dostizhimosti modeli sostoyaniya rabotosposobnosti informatsionnoy sistemy [Algorithm for constructing a diagram of the reachability of an information system health state model], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Questions of cybersecurity], 2019, No. 6 (34), pp. 79-91.
7. Shcheglov A.Yu., Shcheglov K.A. Matematicheskie modeli i metody formal'nogo proektirovaniya sistem zashchity informatsionnykh sistem: ucheb. posobie po distsipline «Bezopasnost' vychislitel'nykh sistem i setey» [Mathematical models and methods of formal design of information systems protection systems: a textbook on the discipline "Security of computing systems and networks"], St. Petersburg, 2015.
8. Probabilistic Modeling in System Engineering, by ed. A. Kostogryzov. London: IntechOpen, 2018, 278 p. 10.5772/intechopen.71396. DOI: 10.5772/intechopen.71396.
9. Buldakova T.I., Mikov D.A. Obespechenie soglasovannosti i adekvatnosti otsenki fakto-rov riska informatsionnoy bezopasnosti [Ensuring consistency and adequacy of information security risk factors assessment], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues], 2017, No. 3 (21), pp. 8-15. DOI: 10.21681/2311-3456-2017-3-08-15.
10. Metodicheskiy dokument. Metodika opredeleniya aktual'nykh ugroz bezopasnosti personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh, utv. FSTEK Rossii 14.02.2008 [Methodical document. Methodology for determining the actual threats to the security of personal data when they are processed in personal data information systems, approved by the FSTEC of Russia on 02/14/2008].
11. Metodicheskiy dokument. Metodika otsenki ugroz bezopasnosti informatsii. Mery zashchity informatsii v gosudarstvennykh informatsionnykh sistemakh. Metodicheskiy dokument FSTEK Rossii. Utverzhen 11 fevralya 2014 g. ii, utv. FSTEK Rossii 05.02.2021 [Methodical document. Methodology for assessing information security threats. Information protection measures in state information systems. Methodological document of the FSTEC of Russia. Approved on February 11, 2014 by the ai, approved by the FSTEC of Russia 05.02.2021].

12. Meshcheryakova T.V., Skryl' S.V., Firyulin M.E. Matematicheskie modeli informatsionnykh protsessov v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh organov vnutrennikh del v usloviyakh prosteyshykh modeli narusheniya bezopasnosti informatsii: monografiya [Mathematical models of information processes in automated information systems of internal affairs bodies in the conditions of the simplest model of information security violations: monograph]. Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2017, 124 p.
13. Skryl' S.V., Kondakov S.E., Chudin K.S. Obosnovanie pokazatelya dlya otsenki effektivnosti mer obespecheniya zashchity personal'nykh dannykh v deyatel'nosti kadrovogo organa sluzhby zashchity gosudarstvennoy tayny [Substantiation of the indicator for evaluating the effectiveness of measures to ensure the protection of personal data in the activities of the personnel body of the state secret protection service], *Informatsionnaya bezopasnost' – aktual'naya problema sovremenosti. Sovershenstvovanie obrazovatel'nykh tekhnologiy podgotovki spetsialistov v oblasti informatsionnoy bezopasnosti: Mater. XXI Vserossiyskoy mezhvedomstvennoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Information security is an urgent problem of our time. Improving educational technologies for training specialists in the field of information security: Materials of the XXI All-Russian Interdepartmental Scientific and Technical Conference]. Vol. 1. Krasnodar: KVVU, 2020, pp. 19-24.
14. Kazarin O.V., Kondakov S.E., Troitskiy I.I. Podkhody k kolichestvennoy otsenke zashchishchennosti informatsionnykh resursov avtomatizirovannykh sistem [Approaches to quantifying the security of information resources of automated systems], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues], 2015, No. 2 (10), pp. 31-35.
15. Skryl' S.V., Gayfulin V.V., Sychev V.M., Gracheva Yu.V. [i dr.]. Aktual'nye voprosy problematiki otsenki ugroz komp'yuternykh atak na informatsionnye resursy znachimykh ob"ektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury [Topical issues of the problem of assessing threats of computer attacks on information resources of significant objects of critical information infrastructure], *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Information technology security], 2021, No. 1, pp. 24-33.
16. Kondakov S.E., Meshcheryakova T.V., Skryl' S.V., Stadnik A.N., Suvorov A.A. Veroyatnostnoye predstavlenie usloviy svoevremennogo reagirovaniya na ugrozy komp'yuternykh atak [Probabilistic representation of conditions for timely response to threats of computer attacks], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Questions of cybersecurity], 2019, No. 6 (34), pp. 59-68. DOI: 10.21681/2311-3456-2019-6-59-68.
17. Maksimova E.A., Kuznetsova M.A., Topilin Ya.N., Fedonyuk N.I., Petrishcheva T.S. Vnutrenniy kontrol' sootvetstviya obrabotki PDn trebovaniyam k ikh zashchite [Internal control of compliance of PD processing with the requirements for their protection], *Zashchita informatsii. Insayd* [Information protection. Inside], 2019, No. 6 (90), pp. 5-9.
18. Terent'eva L.V. Kriteriy «napravlennoy deyatel'nosti» primenitel'no k otnosheniyam, svyazannym s zashchitoy personal'nykh dannykh [Criterion of "directed activity" in relation to relations related to the protection of personal data], *Pravovaya informatika* [Legal Informatics], 2021, No. 1, pp. 61-69. DOI: 10.21681/1994-1404-2021-1-61-69.
19. Livshits I.I. Otsenka stepeni vliyaniya General Data Protection Regulation na bezopasnost' predpriyatiy v Rossiyskoy Federatsii [Assessment of the impact of General Data Protection Regulation on the security of enterprises in the Russian Federation], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues], 2020, No. 4 (38), pp. 66-75.
20. Khasin E.V., Astrakhov A.V., Kondakov S.E. [i dr.]. Bezopasnost' operatsionnykh sistem: ucheb. posobie dlya sistemy vysshogo professional'nogo obrazovaniya [Security of operating systems: a textbook for the system of higher professional education], ed. by S.V. Skrylya. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2021, 256 p.
21. Skryl' S.V., Shelupanov A.A. Osnovy sistemnogo analiza v zashchite informatsii: ucheb. posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy [Fundamentals of system analysis in the protection of information: a textbook for students of higher educational institutions]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 138 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

**Кондаков Сергей Евгеньевич** – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: sergeikondakov@list.ru; г. Москва, Россия, тел.: +79037947857; кафедра защиты информации; к.т.н.

**Чудин Кирилл Сергеевич** – e-mail: 4ydo-kirill@rambler.ru; тел.: +79653295515; кафедра защиты информации; ассистент.

**Большев Максим Владимирович** – e-mail: Nat15171@yandex.ru; тел.: +79167260955; кафедра защиты информации; соискатель.

**Kondakov Sergey Evgenievch** – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: sergeikondakov@list.ru; Moscow, Russia; phone: +79037947857; the department of information security; can. of eng. sc.

**Chudin Kirill Sergeevich** – e-mail: 4ydo-kirill@rambler.ru; phone: +79653295515; the department of information security; assistant.

**Bolychev Maxim Vladimirovich** – e-mail: Nat15171@yandex.ru; phone: +79167260955; the department of information security; applicant.

УДК 004.067

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-80-89

**Ю.А. Брюхомицкий****ИММУНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛАВИАТУРНОГО МОНИТОРИНГА ОПЕРАТОРОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

*Целью работы является разработка модели клавиатурного мониторинга операторов информационных систем, основанной на использовании цепочного метода учета параметров клавиатурного почерка. Указанный метод предусматривает оценку клавиатурного почерка оператора на цепочках символов заданной длины, отражающих лингвистически связанные параметры клавиатурного набора, характерные для данного оператора. Клавиатурный набор таких цепочек оператором с «хорошим» клавиатурным почерком обладает существенно более высокой индивидуальностью, обусловленной корреляционными зависимостями между временными параметрами последовательно идущих символов и пауз. В итоге цепочный метод позволяет обеспечить более высокую точность верификации личности оператора. Клавиатурный мониторинг на основе цепочного метода предлагается реализовать в базе искусственных иммунных систем с использованием иммунологической модели клональной селекции, в которой детекторы представлены идентификационными параметрами области распределения клавиатурных параметров «своего». В задачах клавиатурного мониторинга область распределения клавиатурных параметров верифицируемого оператора всегда существенно меньше совокупной области распределения клавиатурных параметров других возможных операторов. Выбор указанной модели позволяет существенно снизить необходимый объем популяции детекторов, и как следствие, – существенно сократить время верификации работающего оператора. Принятие решения о подмене «своего» оператора «чужим» предлагается считать обоснованным при превышении частоты срабатывания детекторов установленного порогового значения. Предложенная иммунологическая модель обладает рядом преимуществ. Использование цепочного метода учета клавиатурных параметров позволяет с большей точностью верифицировать оператора, в сравнении с традиционными методами. Используемая модель клональной селекции в сочетании с векторным представлением клавиатурных данных позволяет существенно ускорить процесс обучения и сократить время, необходимое для своевременного принятия решения о присутствии «чужого» оператора. Важным достоинством модели является возможность обучаться исключительно на примерах клавиатурного почерка оперативно доступных «своих» операторов. Использование модели клональной селекции позволяет также существенно снизить необходимый объем популяции детекторов, способных эффективно «покрыть» область распределения клавиатурных параметров «своего» оператора.*

*Цепочный метод клавиатурного мониторинга операторов информационных систем; иммунологическая модель клональной селекции с положительным отбором; верификация работающего оператора по принципу «свой-чужой».*

Yu.A. Bryuhomitsky

## IMMUNOLOGICAL MODEL OF KEYBOARD MONITORING OF INFORMATION SYSTEM OPERATORS

*The purpose of this work is to develop a model of keyboard monitoring of information system operators, based on the use of a chain method of accounting keyboard handwriting parameters. The specified method provides estimation of operator's keyboard handwriting on chains of characters of given length, reflecting linguistically related parameters of keyboard set, characteristic for the given operator. The keyboard typing of such chains by the operator with "good" keyboard handwriting has significantly higher individuality due to correlation dependences between the time parameters of successive characters and pauses. As a result, the chain method allows to provide higher accuracy of operator's identity verification. Keyboard monitoring based on the chain method is proposed to be implemented in the basis of artificial immune systems using an immunological model of clonal selection, in which the detectors are represented by identifying parameters of the distribution area of the keyboard parameters of "friend". In the tasks of keyboard monitoring the area of distribution of keyboard parameters of the verified operator is always significantly less than the cumulative area of distribution of keyboard parameters of other possible operators. The choice of the specified model allows to significantly reduce the required volume of the detector population, and as a consequence - to significantly reduce the verification time of the working operator. The decision to replace "friend" operator with "stranger" is proposed to be considered reasonable when the frequency of operation of detectors exceeds the established threshold value. The proposed immunological model has a number of advantages. The use of the chain method of keyboard parameters accounting allows to verify the operator with greater accuracy in comparison with traditional methods. The clonal selection model in combination with vector representation of the keyboard data allows to significantly speed up the learning process and reduce the time required to make a timely decision on the presence of a "stranger" operator. An important advantage of the model is the ability to learn solely from the examples of keyboard handwriting operationally available "friend" operators. The use of the clonal selection model also makes it possible to significantly reduce the required volume of the population of detectors capable of effectively "covering" the distribution area of the keyboard parameters of "friend" operator.*

*Chain method of keyboard monitoring of information system operators; immunological model of clonal selection with positive selection; verification of working operator by the principle of "friend-or-stranger".*

**Введение.** Для обеспечения безопасности информационных систем (ИС) в ракурсе возможных нарушений и злоупотреблений со стороны операторов этих систем могут эффективно применяться современные биометрические технологии клавиатурного мониторинга [1, 2]. Клавиатурный мониторинг позволяет верифицировать личность оператора путем непрерывного текстонезависимого анализа его клавиатурного почерка. При необходимости клавиатурный мониторинг может проводиться скрытно (прозрачно) для операторов. Система клавиатурного мониторинга (СКМ) позволяют решать ряд важных задач для обеспечения информационной безопасности ИС, которые трудно решаются другими методами:

- ◆ непрерывная (при необходимости скрытная) верификация личности оператора в процессе его клавиатурной работы в ИС;
- ◆ скрытное выявление операторов-инсайдеров, совершающих неправомерные и злонамеренные действия, ставящие под угрозу информационную безопасность ИС;
- ◆ скрытное выявление отклонений психофизических характеристик операторов ИС критических приложений, характеризующихся высокой ценой ошибки оператора;
- ◆ тестирование (при необходимости скрытное) кандидатов на должность операторов ИС критических приложений, характеризующихся высокой ценой ошибки оператора;
- ◆ контролировать правдивость ответов операторов на заданные вопросы в процессе аудита нарушений безопасности ИС (аналог «детектора лжи»).

При реализации СКМ первостепенное значение имеют параметры точности и скорости верификации личности работающего оператора, которые, определяются способами представления и классификации клавиатурных биометрических параметров, а также – подходами и методами, используемыми для реализации процедуры верификации.

Известные методы построения СКМ основаны на прямом измерении параметров клавиатурной работы оператора: длительностей удержания и пауз между удержаниями одиночных клавиш [3–7]. Недостатком метода является низкая точность верификации личности оператора, обусловленная, недостаточной информативностью представления его индивидуальных клавиатурных параметров.

**Постановка задачи.** Автором статьи был предложен цепочный метод построения СКМ, отличающийся от известных тем, что временные параметры клавиатурного набора измеряются на последовательно идущих цепочках заданной длины, содержащих лингвистически связанные совокупности символов и пауз [8–10]. Клавиатурный набор таких цепочек оператором с «хорошим» клавиатурным почерком обладает существенно более высокой индивидуальностью, обусловленной корреляционными зависимостями между временными параметрами последовательно идущих символов и пауз. В итоге цепочный метод обладает более высокой точностью верификации личности оператора, но при этом требует существенно больших вычислительных затрат.

При использовании цепочного метода множество всех событий клавиатуры в терминах формальных грамматик рассматривается как алфавит  $A$ , состоящий из двух подмножеств  $A = A_y \cup A_n$ :

$A_y \subset A$  – события клавиатуры, состоящие в удержании одной из  $n$  клавиш;

$A_n \subset A$  – события клавиатуры, состоящие в наличии пауз между удержаниями очередных клавиш или перекрытий времен удержаний смежных при наборе клавиш.

Ограниченные последовательности событий клавиатуры множества  $A$ , ориентированные слева направо, начинающиеся и оканчивающиеся событиями из подмножества  $A_y$ , трактуются как цепочки событий  $T_{i_1, i_2, \dots, i_p}$ . Длиной  $r$  цепочки является общее число событий алфавита  $A$ , входящих в цепочку:  $|T_{i_1, i_2, \dots, i_p}| = r$ ,  $i_1, i_2, \dots, i_p = 1, 2, \dots, n$ . При клавиатурном наборе события из множеств  $A_y$  и  $A_n$  строго чередуются, поэтому в каждой цепочке длины  $r$  будет содержаться  $p$  событий множества  $A_y$  и  $q = p - 1$  событий множества  $A_n$ . Длина цепочки всегда есть целое нечетное число  $r = p + q = 2p - 1 = 1, 3, 5, \dots$ . Для заданного числа контролируемых клавиш  $n$  и заданной длины цепочек  $r$  суть цепочного метода в терминах формальных грамматик состоит в формировании всех возможных цепочек событий алфавита  $A$  длины  $r$  в пространстве размерности  $p = (r + 1)/2 = q + 1$ .

Для представления клавиатурных параметров цепочным методом в поле действительных чисел  $P$  задается пространственная матрица размерности  $p$

$$T^p = \left\| T_{i_1, i_2, \dots, i_p} \right\|, \quad i_1, i_2, \dots, i_p = 1, 2, \dots, n, \quad p = 2, 3, \dots,$$

состоящая, в общем случае, из  $n^p$  элементов, представленных цепочками  $T_{i_1, i_2, \dots, i_p}$ ,  $i_1, i_2, \dots, i_p = 1, 2, \dots, n$ ,  $p = 2, 3, \dots$ . При этом каждая цепочка длины  $r$  будет содержать  $r$  временных параметров из числового поля  $P$ . Для реальных алфавитов  $A$ , содержащих ограниченное число учитываемых при клавиатурном наборе символов, а также не используемых сочетаний из более двух одинаковых последовательно идущих символов, общее число элементов матрицы  $T^p$  будет всегда меньшим, чем  $n^p$ .

Для описания и последующего использования пространственной матрицы  $T^p$ , она представляется совокупностью своих сечений с фиксированным значением одного  $i_\alpha$  или двух индексов  $i_\alpha, i_\beta$ . В первом случае образуется совокупность про-

стных сечений ориентации  $i_\alpha$ , являющихся  $(p - 1)$ -мерными матрицами  $n$ -го порядка. Во втором случае образуется совокупность двукратных сечений ориентации  $i_\alpha, i_\beta$ , являющихся  $(p - 2)$ -мерными матрицами  $n$ -го порядка.

При реализации цепочного метода длина цепочки  $r = |T_{i_1, i_2, \dots, i_p}|$  выбирается фиксированной по формуле  $r = 3 + 2l$ , где  $l = 0, 1, 2, \dots$ .

Цепочный метод фактически использует многомерное представление клавиатурных параметров, при котором каждой цепочке соответствует точка  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p)$  в пространстве мерности  $p$  с координатами  $\xi_k, k = 1, 2, \dots, p$ , определяемыми событиями  $i_p = 1, 2, \dots, n$  подмножества  $A_p$ . На рис. 1 – пример представления цепочным методом слова «почерк» с длиной цепочек  $r = 5$  в пространстве мерности  $p = 3$ .

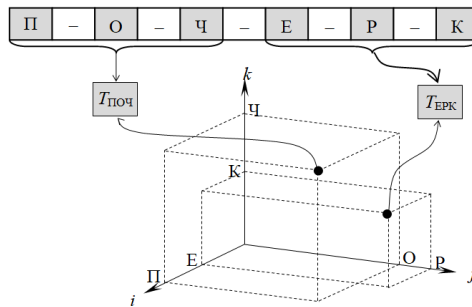


Рис. 1. Пример представления цепочным методом клавиатурного набора слова «почерк» с заданной длиной цепочек  $r = 5$  в пространстве мерности  $p = 3$

В цепочном методе идентифицирующие личность оператора клавиатурные параметры определяются цепочками лингвистически связанных событий, характеризующихся выраженной индивидуальностью их воспроизведения данным оператором. Такое представление параметров клавиатурного набора хорошо согласуется с принципами представления и анализа информационных потоков, принятыми в искусственных иммунных системах (ИИС) [11–25].

**Решение поставленной задачи.** Построение СКМ на основе цепочного метода в базе ИИС предлагается реализовать с использованием иммунологической модели, реализующей децентрализованную верификацию личности оператора, основанную на сопоставлении последовательности информационных единиц, представленными цепочками его клавиатурных параметров, с предварительно созданными детекторами. В ИИС применяется две основных модели сопоставления последовательности информационных единиц с детекторами. «Модель отрицательного отбора (МОО)», в которой детекторы представлены идентификационными параметрами совокупной области распределения «чужих» и «модель клональной селекции (МКС)», в которой детекторы представлены идентификационными параметрами области распределения «свой». Выбор модели предопределяет необходимый объем популяции детекторов, способных эффективно «покрыть» соответствующую область распределения параметров. В СКМ область распределения клавиатурных параметров верифицируемого оператора («свой») как правило существенно меньше совокупной области распределения клавиатурных параметров других возможных операторов («область чужие»). Это обстоятельство определяет целесообразность применения в СКМ иммунологической модели МКС.

Другой разновидностью применяемых иммунологических моделей является используемый способ представления информационных единиц данных: строковый или векторный. Исходя из описания цепочного метода СКМ, следует, что адекватным представлением для реализации этого метода является векторное представление данных.



МКС содержит две фазы: обучения и верификации.

В фазе обучения в МКС осуществляется генерация начальной популяции детекторов в метрике клавиатурных параметров цепочного метода СКМ с последующим отбором тех из них, которые в пространстве признаков в наибольшей степени соответствуют личности оператора «свой». Входящие в начальную популяцию детекторы подвергаются затем операциям клонирования и гипермутации, что позволяет существенно увеличить популяцию детекторов области «свой». Итогом фазы обучения является рабочая популяция детекторов области «свой», которая размещается в памяти МКС.

В фазе верификации клавиатурные параметры работающего оператора ИС сопоставляются с рабочей популяцией детекторов «свой». При сопоставлении проверяется априори установленный «уровень близости» для сравниваемых параметров. Принятие конечного решения о том, кому принадлежит анализируемый клавиатурный почерк «своему» или «чужому», осуществляется на основе статистического подхода, при котором контролируется частота выполнения условия близости.

Реализация модели осуществляется в  $r$ -мерном Евклидовом пространстве  $E^r$ , ограниченном рабочим подпространством  $E_p^r \subset E^r$ , определяемом минимаксными значениями координат  $x_1, x_2, \dots, x_r$  векторов признаков  $x_i = x_1, x_2, \dots, x_r$ , соответствующих предельным значениям временных параметров  $\tau_i$  и  $\tau_{i,j}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$  событий клавиатуры для верифицируемого оператора. Точки пространства  $E^r$ , представленные векторами признаков  $x_i = x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}$ , можно трактовать как последовательность  $X_i = x_1, x_2, \dots$ , которая «пробегаёт» конечное множество  $\Psi_x$  векторов клавиатурных признаков  $x_i$  верифицируемого оператора. Далее последовательность  $X_i$  расчленяется на фрагменты по  $r$  отсчетов  $x_i$  в каждом фрагменте. Результатом будет новая последовательность  $Y_j = y_1, y_2, \dots$ ,  $j = 1, 2, \dots$ , каждый элемент  $y_j$  которой содержит  $r$   $n$ -мерных векторов  $x_i$  исходной последовательности  $X_i$ :

$$y_j = x_1, x_2, \dots, x_r, \quad i = 1, 2, \dots, r, \quad j = 1, 2, \dots$$

Совокупность векторов  $x_1, x_2, \dots, x_r$  каждого фрагмента  $y_j$  можно представить как один  $s$ -мерный вектор  $y_j$ , содержащий  $s = n \times r$  компонент:

$$y_j = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1r} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nr} \end{bmatrix}.$$

В итоге образ клавиатурной биометрии оператора будет представлен последовательностью  $Y_j$   $s$ -мерных векторов признаков  $y_j$  в пространстве признаков  $E^s$ .

Последовательность  $Y_j$ , ограниченная  $N_y$  элементами  $\bar{Y}_j = y_1, y_2, \dots, y_{N_y}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_y$ , можно трактовать как клавиатурный эталон оператора.

В фазе обучения ИИС вначале создается начальная популяция детекторов в метрике векторов  $y_j$ . Затем по принципу положительного отбора выявляются детекторы из начальной популяции, которые в пространстве  $E^s$  наиболее близки между собой. При этом степень близости векторов моделирует свойство аффинности клеток иммунной системы. Детекторы, отобранные из начальной популяции, на основе итерационной процедуры подвергаются клонированию, гипермутации и последующему отбору. Останов процедуры обучения осуществляется по определенным признакам, свидетельствующим о достижении достаточной степени покрытия популяцией детекторов области распределения клавиатурных параметров данного оператора.

На этапе распознавания клавиатурные параметры  $Y_j$  верифицируемой личности сравниваются с детекторами популяции «своего» по принципу близости. Соотношение числа сработавших детекторов к их общему числу позволяет сделать оценку вероятности для принятия системой решения «свой–чужой».

1. Создание в пространстве  $E^r$  путем случайной генерации (с равномерным законом распределения) начальной популяции детекторов  $D_k^\lambda = d_1, d_1, \dots, d_{N_d}$ ,  $\lambda = 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_d$  представленных векторами в формате векторов  $y_j$ .

2. Для каждой пары  $d_k \in D_k^\lambda$  и  $y_j \in \bar{Y}_j$  вычисляется степень их взаимной аффинности. В качестве меры аффинности  $a_{kj}$  используется Евклидово расстояние между векторами  $d_k$  и  $y_j$ :

$$a_{kj}(d_k, y_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^N (d_{kp} - y_{jp})^2}, \quad p = 1, 2, \dots, N, \quad N = N_d \cdot N_y.$$

Результатом вычислений будет матрица взаимной аффинности  $A$ , содержащая  $N = N_d \cdot N_y$  элементов  $a_{kj}$ :

$$A \| a_{kj}(d_k, y_j) \| = \left\| \begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N_y} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N_y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N_d 1} & a_{N_d 2} & \dots & a_{N_d N_y} \end{array} \right\|, \quad k = 1, 2, \dots, N_d, j = 1, 2, \dots, N_y.$$

3. Из каждого столбца матрицы  $A$  отбирается  $l$  из  $N_d$  детекторов  $d_k$ , соответствующих наибольшей взаимной аффинности  $a_{kj}(d_k, y_j)$ ,  $k = 1, 2, \dots, l$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_y$  и подвергаются операции клонирования  $C$ :

$$C[d_k] = d_k^c, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad c = 1, 2, \dots, q$$

Количество образуемых клонов  $q_k$  каждого из  $l$  детекторов  $d_k^c$  пропорционально взаимной аффинности  $a_{kj}(d_k, y_j)$ :  $q_k \propto k_c \cdot a_{kj}(d_k, y_j)$ , где  $k_c$  коэффициент пропорциональности при клонировании. При этом общее количество образванных клонов должно оставаться равным  $N_d$ :

$$\sum_{k=1}^l q_k = \left\lfloor \sum_{k=1}^l k_c \cdot a_{kj}(d_k, y_j) \right\rfloor = N_d.$$

Таким образом все детекторы популяции  $D_k^\lambda$  заменяются клонами  $d_k^c$ :  $D_k^\lambda \rightarrow D_k^{\lambda c}$ . Очевидно, что для выполнения этого условия

$$k_c = N_d / \sum_{k=1}^l a_{kj}(d_k, y_j).$$

Операция клонирования повышает вероятность покрытия детекторами областей распределения клавиатурных параметров  $y_j$ .

4. Все клоны  $d_k^c$  популяции  $D_k^{\lambda c}$  подвергаются операции гипермутации  $G$ :

$$G[d_k^c] = d_k^{cG}, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad c = 1, 2, \dots, q.$$

Операцию гипермутации  $G$  клонов предлагается реализовать путем изменения на случайные величины  $0 < \xi < \delta$  некоторого числа  $m$  компонент векторов детекторов  $d_k^c$ . При этом гипермутация  $G$  клонов  $d_k^c$  осуществляется обратно пропорционально взаимной аффинности  $a_{kj}(d_k, y_j)$ :

$$G \propto k_m / a_{kj}(d_k, y_j),$$

где  $k_m$  – коэффициент гипермутации клонов  $d_k^{cG}$  определяемый из условия:  $m = 1$  при  $\max_{k=1, 2, \dots, l} a_{kj}(d_k, y_j)$

Операция гипермутации сужает область поиска новых эффективных детекторов.

Детекторы  $d_k^{cGm}$  заменяют популяцию  $D_k^{\lambda c}$  на новую  $D_k^{\lambda cG}$ .

5. Для каждой пары  $d_k^{cG} \in D_k^{\lambda cG}$  и  $y_j \in \bar{Y}_j$  вычисляется степень взаимной аффинности.

$$a_{kj}(d_k^{cG}, y_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^N (d_{kp}^{cG} - y_{jp})^2}, \quad p = 1, 2, \dots, N.$$

Результатом будет матрица взаимной аффинности  $A$ , содержащая  $N = N_d \cdot N_y$  элементов  $a_{ij}$ :

$$A \| a_{kj}(d_k^{cG}, y_j) \|, \quad k = 1, 2, \dots, N_d \quad j = 1, 2, \dots, N_y.$$

6. Из каждого столбца матрицы  $A$  отбирается совокупность из  $l$  детекторов  $d_k^{cG}$ , соответствующих наибольшей взаимной аффинности  $a_{kj}(d_k^{cG}, y_j)$ ,  $k = 1, 2, \dots, l$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_y$ . Полученные детекторы  $d_k^{cGm}$  образуют популяцию детекторов памяти  $D^M$ .

7. Проверка условия останова: при выполнении условия, – переход на шаг 9, иначе следующий шаг.

8.  $(N_d - l)$  детекторов популяции  $D_k^{\lambda cG}$ , обладающих наименьшей аффинностью  $a_{kj}(d_k, y_j)$  заменяются новыми, путем случайной генерации (с равномерным законом распределения) новой популяции детекторов  $D_k^\lambda = d_1, d_1, \dots, d_{N_d}$ ,  $\lambda = \lambda + 1$ ,  $k = 1, 2, \dots, (N_d - l)$  представленных векторами в формате векторов  $y_j$ .

9. Останов, конец алгоритма. Условием останова алгоритма является достижение заданного максимального размера популяции детекторов памяти  $D^M = D_{\max}^M$ , образующейся при  $k = N_M$ .

В фазе распознавания элементы  $y_j$  анализируемой последовательности клавиатурных параметров  $Y_j$  сопоставляются с детекторами  $d_k^M$  популяции памяти  $D^M$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_M$  с использованием меры близости Евклида между векторами  $y_j$  и  $d_k^M$ :

$$\nabla(y_j, d_k^M) = \sqrt{\sum_{v=1}^s (y_{jv} - d_{kv})^2}.$$

Критический уровень близости  $\nabla(y_j, d_k^M) = \nabla^*$  определяет границу для принятия СКМ решения «свой/чужой» и задается, исходя из допустимых ошибок первого рода. Если для некоторой пары  $y_j$  и  $d_k^M$   $\nabla(y_j, d_k^M) > \nabla^*$ , то считается, что элемент  $y_j$  анализируемой биометрии  $Y_j$ , принадлежит «чужому».

Существенные вариации клавиатурных параметров в последовательностях  $Y_j$  и значительные размеры самих последовательностей  $Y_j$  определяют целесообразность применения статистического подхода для принятия СКМ решения «свой»-«чужой» [22, 23]. При таком подходе контролируется частота  $f$  выполнения условия  $\nabla(y_j, d_k^M) > \nabla^*$ , которая определяет статистическую вероятность принадлежности клавиатурных параметров «чужому»:

$$\hat{P}^{\text{ч}} \approx f = n_{\nabla^+}^{\text{ч}} / n_{\nabla},$$

где  $n_{\nabla^+}^{\text{ч}}$  число случаев выполнения условия  $\nabla(y_j, d_k^M) > \nabla^*$  в  $n_{\nabla}$  проведенных операциях сопоставлений  $y_j$  с  $d_k^M$ .

Принятие СКМ решения о принадлежности клавиатурных параметров «чужому» считается обоснованным, при превышении частоты  $f$  заданного порогового значения  $f_{\text{п}}$ :

$$Y_j \equiv \begin{cases} Y_j^{\text{с}}, & \text{если } f < f_{\text{п}}; \\ Y_j^{\text{ч}}, & \text{если } f \geq f_{\text{п}}, \end{cases}$$

где  $Y_j^{\text{с}}$  – последовательность биометрических признаков «своего»;  $Y_j^{\text{ч}}$  – последовательность векторов признаков «чужого»;

**Заключение.** Предложенная иммунологическая модель клавиатурного мониторинга операторов ИС потенциально обладает рядом преимуществ.

Временные параметры клавиатурного набора текста оператором с «хорошим» клавиатурным почерком обладает существенно более высокой индивидуальностью, обусловленной корреляционными зависимостями между временными параметрами последовательно идущих символов и пауз. Это позволяет с большей точностью верифицировать оператора ИС, чем традиционные методы КМ на основе прямых измерений клавиатурных параметров.

Используемая в СКМ модель клональной селекции обладает высокой скоростью сходимости при решении задач классификации. В сочетании с принятым векторным представлением клавиатурных данных она позволяет существенно ускорить процесс обучения СКМ, а также сократить время, необходимое для своевременного принятия решения о наличии в ИС «чужого» оператора.

Важным достоинством применяемой в СКМ модели клональной селекции является возможность обучаться исключительно на примерах клавиатурного почерка «своих» операторов ИС, которые всегда оперативно доступны для обучения в СКМ.

Выбор модели клональной селекции для СКМ позволяет также существенно снизить необходимый объем популяции детекторов, способных эффективно «покрыть» априори доступную область распределения клавиатурных параметров «своего» оператора.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брюхомицкий Ю.А. Клавиатурная идентификация личности. – Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2012. – 140 с. – ISBN 978-3-8484-1119-1.
2. Файсханов И.Ф. Аутентификация пользователей при помощи устойчивого клавиатурного почерка со свободной выборкой текста // Кибернетика и программирование. – 2018. № 3. – С. 72-86.
3. Yevetskiy V., Horniichuk I. Use of keyboard handwriting in user authentication systems // Information Technology and Security. – 2016. – Vol. 4, Issue 1. – P. 27-33.
4. Вязигин А.А., Тупикина Н.Ю., Сытин Е.В. Разработка и реализация программы для биометрии пользователя персонального компьютера на базе определения параметров клавиатурного почерка // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 1 (25). – С. 43-48.
5. Аверин А.И., Сидоров Д.П. Аутентификация пользователей по клавиатурному почерку // Ogarev-online. – 2015. – № 20. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/autentifikaciya-polzovatelej-po-klaviaturnomu-pocherku>.
6. Joyce R., Gupta G. Identity Authentication Based on Keystroke Latencies. – <http://www.cs.cmu.edu/~maxion/courses/JoyceGupta90.pdf>.
7. Monroe F. Keystroke Dynamics as a Biometric for Authentication. – <http://avirubin.com/fgcs.pdf>.
8. Roth J., Liu X., Ross A. Biometric Authentication via Keystroke Sound. – [http://www.cse.msu.edu/~liuxm/publication/Roth\\_Liu\\_Ross\\_Metaxas\\_ICB2013.pdf](http://www.cse.msu.edu/~liuxm/publication/Roth_Liu_Ross_Metaxas_ICB2013.pdf)
9. Scott M. L. et al. Continuous Identity Verification through Keyboard Biometrics. – <https://sa.rochester.edu/jur/issues/fall2005/ordal.pdf>.
10. Брюхомицкий Ю.А. Цепочный метод клавиатурного мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 11. – С. 135-145.
11. Брюхомицкий Ю.А. Выделение информативных биометрических параметров в системах клавиатурного мониторинга // Матер. XI Международной научно-практической конференции «Информационная безопасность». Ч. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 67-72.
12. Брюхомицкий Ю.А., Казарин М.Н. Многосвязное представление биометрических параметров в системах клавиатурного мониторинга // Матер. XI Международной научно-практической конференции «Информационная безопасность». Ч. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 72-77.
13. Брюхомицкий Ю.А. Иммунологический подход к организации клавиатурного мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 2 (151). – С. 33-41.
14. Брюхомицкий Ю.А. Клавиатурный мониторинг на основе иммунологического клонирования // Безопасность информационных технологий. – 2016. – № 4 (40). – С. 5-11.

15. *Dasgupta D.* Artificial Immune Systems and Their Applications. – Springer-Verlag, 1998.
16. *De Castro L.N., Timmis J.I.* Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach. – London: Springer-Verlag, 2000. – 357 p.
17. *Hofmeyr S., Forrest S.* Architecture for an Artificial Immune System // *Evolutionary Computation*. – 2000. – 8 (4). – P. 443-473.
18. *De Castro L.N., Von Zuben F.J.* The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications, submitted to GECCO'00. – 2000. – P. 36-37.
19. *Hofmeyr S., Forrest S.* Architecture for an Artificial Immune System // *Evolutionary Computation*. – 8 (4). – P. 443-473.
20. *De Castro L.N., Von Zuben F.J.* Learning and optimization using the clonal selection principle // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Special Issue on Artificial Immune Systems. – 2002. – Vol. 6, No. 3. – P. 239-251.
21. *De Castro L.N. and Timmis J.I.* Artificial immune systems as a novel soft computing paradigm // *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*. – 2003. – 7 (8). – P. 526-544.
22. *Ji Z., Dasgupta D.* Real-valued negative selection algorithm with variable-sized Detectors // *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation*, Seattle. – Springer. Verlag: Seattle, WA, USA, 2004. – P. 287-298.
23. *Ji Z., Dasgupta D.* Revisiting negative selection algorithm // *Evolutionary Computation*. – 2007. – Vol. 15, No. 2 (Summer). – P. 223-251.
24. Искусственные иммунные системы и их применение / под ред. Д. Дасгупты: пер. с англ. А.А. Романюхи. – М.: Физматлит, 2006. – 344 с.
25. *Dasgupta D., Yua S., Nino F.* Recent advances in artificial immune systems: Models and applications // *Applied Soft Computing*. – 2011. – Vol. 11. – P. 1574-1587.
26. *Зайцев С.А., Субботин С.А.* Модели и методы автоматической классификации объектов по признакам на основе иммунокомпьютинга // *Радиоэлектроника, информатика, управление*. – 2010. – № 2. – С. 117-124.

## REFERENCES

1. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Klaviaturnaya identifikatsiya lichnosti [Keyboard identification of the person]. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2012, 140 p. ISBN 978-3-8484-1119-1.
2. *Fayskhanov I.F.* Autentifikatsiya pol'zovateley pri pomoshchi ustoychivogo klaviaturnogo pocherka so svobodnoy vyborkoy teksta [Authentication of users using a stable keyboard handwriting with a free selection of text], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2018, No. 3, pp. 72-86.
3. *Yevetskiy V., Horniichuk I.* Use of keyboard handwriting in user authentication systems, *Information Technology and Security*, 2016, Vol. 4, Issue 1, pp. 27-33.
4. *Vyazigin A.A., Tupikina N.Yu., Sypin E.V.* Razrabotka i realizatsiya programmy dlya biometrii pol'zovatelya personal'nogo komp'yutera na baze opredeleniya parametrov klaviaturnogo pocherka [Development and implementation of a program for biometrics of a personal computer user based on determining the parameters of the keyboard handwriting], *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2019, No. 1 (25), pp. 43-48.
5. *Averin A.I., Sidorov D.P.* Autentifikatsiya pol'zovateley po klaviaturnomu pocherku [User authentication by keyboard handwriting], *Ogarev-online* [Ogarev-online], 2015, No. 20. Available at: <https://journal.mrsu.ru/arts/autentifikatsiya-polzovatelej-po-klaviaturnomu-pocherku>.
6. *Joyce R., Gupta G.* Identity Authentication Based on Keystroke Latencies. Available at: <http://www.cs.cmu.edu/~maxion/courses/JoyceGupta90.pdf>.
7. *Monrose F.* Keystroke Dynamics as a Biometric for Authentication. Available at: <http://avirubin.com/fgcs.pdf>.
8. *Roth J., Liu X., Ross A.* Biometric Authentication via Keystroke Sound. Available at: [http://www.cse.msu.edu/~liuxm/publication/Roth\\_Liu\\_Ross\\_Metaxas\\_ICB2013.pdf](http://www.cse.msu.edu/~liuxm/publication/Roth_Liu_Ross_Metaxas_ICB2013.pdf)
9. *Scott M. L. et al.* Continuous Identity Verification through Keyboard Biometrics. Available at: <https://sa.rochester.edu/jur/issues/fall2005/ordal.pdf>.

10. Bryukhomitskiy Yu.A. Tsepohnyy metod klaviaturnogo monitoringa [Chain method of keyboard monitoring], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 11, pp. 135-145.
11. Bryukhomitskiy Yu.A. Vydelenie informativnykh biometricheskikh parametrov v sistemakh klaviaturnogo monitoringa [Identification of informative biometric parameters in keyboard monitoring systems], *Mater. XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Informatsionnaya bezopasnost'»* [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Information Security"]. Part 2. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, pp. 67-72.
12. Bryukhomitskiy Yu.A., Kazarin M.N. Mnogosvyaznoe predstavlenie biometricheskikh parametrov v sistemakh klaviaturnogo monitoringa [Multi-connected representation of biometric parameters in keyboard monitoring systems], *Mater. XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Informatsionnaya bezopasnost'»* [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Information Security"]. Part 2. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, pp. 72-77.
13. Bryukhomitskiy Yu.A. Immunologicheskii podkhod k organizatsii klaviaturnogo monitoringa [Immunological approach to the organization of keyboard monitoring], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 2 (151), pp. 33-41.
14. Bryukhomitskiy Yu.A. Klaviaturnyy monitoring na osnove immunologicheskogo klonirovaniya [Keyboard monitoring based on immunological cloning], *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Security of Information Technologies], 2016, No. 4 (40), pp. 5-11.
15. Dasgupta D. Artificial Immune Systems and Their Applications. Springer-Verlag, 1998.
16. De Castro L.N., Timmis J.I. Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach. London: Springer-Verlag, 2000, 357 p.
17. Hofmeyr S., Forrest S. Architecture for an Artificial Immune System, *Evolutionary Computation*, 2000,– 8 (4), pp. 443-473.
18. De Castro L.N., Von Zuben F.J. The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications, submitted to GECCO'00, 2000, pp. 36-37.
19. Hofmeyr S., Forrest S. Architecture for an Artificial Immune System, *Evolutionary Computation*, 8 (4), pp. 443-473.
20. De Castro L.N., Von Zuben F.J. Learning and optimization using the clonal selection principle, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Special Issue on Artificial Immune Systems*, 2002, Vol. 6, No. 3, pp. 239-251.
21. De Castro L.N. and Timmis J.I. Artificial immune systems as a novel soft computing paradigm, *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 2003, 7 (8), pp. 526-544.
22. Ji Z., Dasgupta D. Real-valued negative selection algorithm with variable-sized Detectors, *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation, Seattle*. Springer. Verlag: Seattle, WA, USA, 2004, pp. 287-298.
23. Ji Z., Dasgupta D. Revisiting negative selection algorithm, *Evolutionary Computation*, 2007, Vol. 15, No. 2 (Summer), pp. 223-251.
24. Iskusstvennyye immunnye sistemy i ikh primeneniye [Artificial immune systems and their application], ed. by D. Dasgupty: trans. from Engl. A.A. Romanyukhi. Moscow: Fizmatlit, 2006, 344 p.
25. Dasgupta D., Yua S., Nino F. Recent advances in artificial immune systems: Models and applications, *Applied Soft Computing*, 2011, Vol. 11, pp. 1574-1587.
26. Zaytsev S.A., Subbotin S.A. Modeli i metody avtomaticheskoy klassifikatsii ob"ektov po priznakam na osnove immunokomp'yutinga [Models and methods of automatic classification of objects by features based on immunocomputing], *Radioelektronika, informatika, upravlenie* [Radioelectronics, informatics, management], 2010, No. 2, pp. 117-124.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Брюхомицкий Юрий Анатольевич** – Южный федеральный университет; e-mail: bryuhomitskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371905; кафедра безопасности информационных технологий; с.н.с.; доцент.

**Bryuhomitskiy Yuriy Anatoly** – Southern Federal University; e-mail: bryuhomitskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371905; the department of security in data processing technologies; senior researcher; associate professor.

**В.А. Деркачев, В.В. Бахчевников, А.Н. Бакуменко**

### **КЛАССИФИКАТОР БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА**

*Рассматривается классификатор радиолокационных сигналов, отраженных от беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), основанный на нейронных сетях. В предложенном классификаторе для формирования обучающих данных используется модель рассеяния радиолокационных сигналов от БПЛА. В последнее время запрос на классификацию БПЛА достаточно высок ввиду значительного увеличения количества моделей и объема продаж данных устройств. Увеличение вычислительной мощности процессоров и развитие теории нейронных сетей позволяет создать новые виды классификаторов. При использовании моделей возможно создание набора обучающих данных приемлемого для обучения нейронной сети классификатора. Сверточная нейронная сеть классификатора обучается с применением радиолокационных изображений, полученных с применением предложенной модели рассеяния радиолокационных сигналов от БПЛА. Получаемые радиолокационные изображения моделируются с учетом углов ориентации БПЛА относительно нормальной системы координат БПЛА, скорости полета, различных параметров винтов моделируемого БПЛА. Для формирования обучающих данных помимо сигнальной конструкции добавляется белый шум определенной конфигурации, который помогает увеличить разнообразие обучающих выборок для улучшения обучающей способности сверточной нейронной сети. Применение данных, полученных с помощью модели для обучения нейронной сети обусловлено необходимостью использования большого числа обучающих выборок с различными параметрами движения БПЛА, такими как высота, скорость, направление, ориентация в пространстве, а также большим разнообразием возможных конфигураций беспилотных летательных аппаратов: трикоптер (три винта), квадрокоптер (четыре винта), гексакоптер (шесть винтов) или октокоптер (восемь винтов), что усложняет применение экспериментальных данных для создания классификаторов данного типа.*

*Классификатор; беспилотный летательный аппарат; радиолокационное изображение; математическая модель; нейронная сеть; БПЛА.*

**V.A. Derkachev, V.V. Bakhchevnikov, A.N. Bakumenko**

### **MULTI-ROTOR UAV CLASSIFIER**

*This article discusses a classifier of radar signals reflected from unmanned aerial vehicles (UAVs), based on neural networks. In the proposed classifier, for the formation of training data, a model of scattering of radar signals from UAVs is used. Recently, the demand for UAV classification has been quite high due to a significant increase in the number of models and sales of these devices. Increasing the computing power of processors and the development of the theory of neural networks allows you to create new types of classifiers. When using models, it is possible to create a set of training data that is acceptable for training a classifier neural network. The convolutional neural network of the classifier is trained using radar images obtained using the proposed model of scattering of radar signals from UAVs. The resulting radar images are modeled taking into account the UAV orientation angles relative to the UAV normal coordinate system, flight speed, and various propeller parameters of the simulated UAV. To form training data, in addition to the signal structure, white noise of a certain configuration is added, which helps to increase the diversity of training samples to improve the learning ability of the convolutional neural network. The use of data obtained using the model for training a neural network is due to the need to use a large number of training samples with various UAV movement parameters, such as height, speed, direction, orientation in space, as well as a wide variety of possible configurations of unmanned aerial vehicles: tri-copter (three propellers), quadcopter (four propellers), hexacopter (six propellers), or octocopter (eight propellers), which complicates the use of experimental data to create classifiers of this type.*

*Classifier; unmanned aerial vehicle; radar image; mathematical model; neural network; UAV.*

**Введение.** При разработке классификатора беспилотных летательных аппаратов с применением радиолокационных средств обычно применяется разделение обработки данных на два этапа: предварительная обработка данных с приведением к необходимому формату отображения и, собственно, сама классификация. Одной из основных проблем классификаторов является сложность выделения признаков, требуемых для устойчивой классификации объектов по определенным классам. Формирование радиолокационных изображений, поступающих в классифицирующую часть системы, требует определенной предварительной подготовки данных. Для решения задачи классификации необходимо определиться с видом отображения информации. Полученные после обработки радиолокационные изображения должны сохранить микродоплеровскую структуру, характеризующую параметры вращения лопастей беспилотного летательного аппарата во времени.

Одним из самых популярных методов анализа является выделение микродоплеровской сигнатуры (MDS), получаемой в следствие вращения лопастей БПЛА с большой частотой [1–5]. Данная методика является двухэтапной: преобразования полученных сигналов с применением средств частотного-временного анализа и построения представления сигнала, пригодного для дальнейшего извлечения данных. Для предварительной подготовки принимаемых радиолокационных сигналов зачастую используют метод оконного преобразования Фурье (STFT) [1, 6–9]. Применение данного метода позволяет получить изображения только низкого разрешения. Использование таких методов как MUSIC [10], итеративного адаптивного подхода (IAA) [11], и сглаженного преобразования Вигнера-Вилля (SPWVD) [12], может позволить достичь лучших результатов в плане разрешения на итоговом радиолокационном изображении. Применение предложенных методов может быть затруднено в реальных устройствах классификации ввиду большой вычислительной сложности. В результате анализа было получено решение использовать в качестве типа обработки оконное преобразование Фурье с дальнейшей генерацией дальностно-скоростного портрета наблюдаемого объекта.

Полученные в результате обработки полученного сигнала радиолокационные изображения можно использовать для классификации с применением статистических или нейронных методов. Одним из примеров классических методов является корреляционный [13]. Помимо данной методики возможно применение оптимальных байесовских классификаторов [14]. Использование вышеперечисленных методов является сложной задачей из-за трудоемкости выделения отдельных признаков в классифицируемых данных, что достаточно трудозатратно, особенно при условии сложной структуры данных, а следовательно, с большим количеством признаков. Кроме сложности в выделении признаков в классических статистических методах классификации возникают трудности с малой скоростью изменения параметров под конкретную задачу. В последнее время набирает популярность применение нейронных сетей в задачах классификации радиолокационных данных. Прогресс в развитии сверточных нейронных сетей за последние годы совместно с кратным увеличением мощностей вычислителей дал возможность формировать и использовать достаточно сложные нейросетевые структуры. Возникла возможность создания классификаторов основанных на нейронных сетях для обработки данных с радиолокационных с минимальными задержками или даже в режиме реального времени.

Использование нейросетевого классификатора приводит к необходимости в большом объеме данных для обучения нейронной сети, для чего требуется создание модели генерирующей радиолокационные изображения требуемой конфигурации БПЛА.



Совместное использование предложенной модели формирования радиолокационного изображения и нейросетевой архитектуры позволяет создать классификатор БПЛА высокой точности с большой гибкостью подстройки под решаемые задачи.

**Постановка задачи.** Рассматриваемая задача заключается в создании классификатора радиолокационных сигналов отраженных БПЛА различной конфигурации. Ее решение выполняется в два этапа: 1) разработка алгоритма формирования радиолокационных изображений; 2) проектирование алгоритма нейросетевого классификатора БПЛА различной конфигурации, обладающего требуемыми параметрами, для обучения которого применяются радиолокационные изображения, формируемые с использованием алгоритма полученного в первом этапе. Предлагаемый подход позволит решить следующие проблемы: 1) создание большой обучающей выборки под заданные параметры РЛС без большого объема натуральных замеров; 2) формирование гибкого алгоритма классификатора под заданные параметры радиолокационных изображений.

**Описание модели рассеяния сигнала от бпла.** Алгоритм работы модели рассеяния радиолокационного сигнала показан на рис. 1. В начале предполагается задание параметров РЛС и БПЛА. Затем осуществляется создание первичного радиолокационного сигнала.



Рис. 1. Алгоритм модели рассеяния сигнала

Далее производится вычисление значений отраженных сигналов от БПЛА, данный этап заключается в выполнении ряда следующих операций:

- ◆ установка значений координат ротора и лопастей в системе координат  $P_3$  (для каждого ротора по отдельности);
- ◆ перенос точек, описывающих лопасти и ротор, из системы координат  $P_3$  в  $P_2$  (с центром в центральной точке БПЛА);
- ◆ перенос точек, описывающих лопасти и ротор, из системы координат  $P_2$  в  $P_1$  (с учетом углов ориентации БПЛА);
- ◆ перенос точек, описывающих лопасти и ротор, из системы координат  $P_1$  в  $P$  (с центром в точке с координатами РЛС);

- ◆ нахождение дальностей от лопастей и роторов БПЛА до РЛС;
- ◆ вычисление углов  $\varphi$  между плоскостями вращения роторов двигателей и направлением на РЛС;
- ◆ вычисление углов  $\Theta$  между нормальными лопастей и направлением на РЛС;
- ◆ получение результирующего отклика на РЛ сигнал БПЛА [15].

Затем для экономии вычислительных ресурсов производится децимация отсчетов. Вычисленные отсчеты радиолокационного сигнала применяются для получения дальностно-скоростного портрета (ДСП) путем осуществления внутриимпульсного БПФ, а затем применением межпериодного БПФ.

**Нейронная сеть классификатора.** Одной из проблем создания классификатора является выбор архитектуры нейронной сети. Для разработки классификаторов применяют несколько типов архитектур такие как: глубокие нейронные сети [16, 17], сети глубокого доверия [18], рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью [19], сети на основе многослойного перцептрона [20]. Наибольшего распространения в обработке РЛ данных получили сверточные нейронные сети. Для данной работы применена сверточная архитектура.

На рис. 2 показана применяемая в работе архитектура нейронной сети. Входной слой имеет размерность  $1@128 \times 128$  (1 – вид цветового пространства, что значит использование градаций серого, 128 – число точек по вертикали, 128 – число точек по горизонтали) на рисунке обозначен как Input. Conv\_ReLU – слой свертки с применением функции ReLU (rectified linear unit – «линейный выпрямитель»), размерность ядра применяемых слоев в начале архитектуры составляет  $7 \times 7$  и  $5 \times 5$ , а к концу архитектуры уменьшается до  $3 \times 3$ , что необходимо для правильного выделения признаков из радиолокационного изображения. Выходная размерность данных слоев обозначена следующим образом:  $A@H \times W$ , где  $A$  – число ядер свертки,  $H$  – высота изображения,  $W$  – ширина изображения. Dropout – слой исключения, необходимый для регуляризации, что позволяет улучшить обобщающую способность нейронной сети. MaxPool – слой субдискретизации осуществляющий уменьшение размерности слоев (обобщение). Full\_Connected – полносвязные слои, а Output – выходной слой.

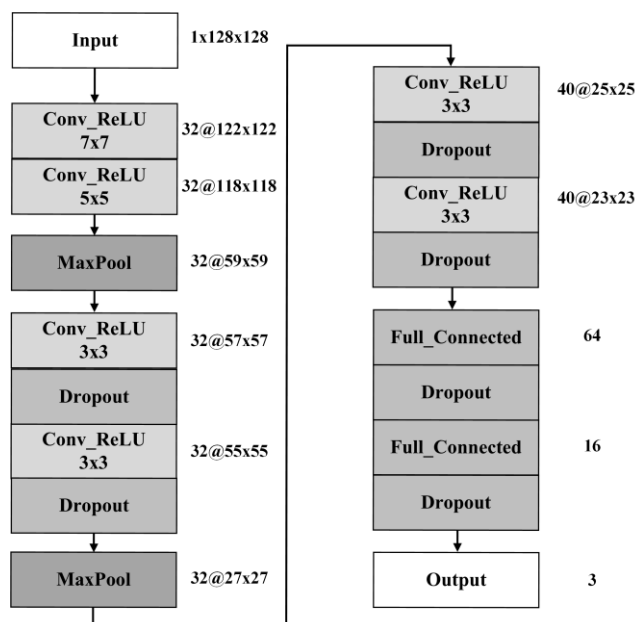


Рис. 2. Архитектура нейросетевого классификатора

**Моделирование рассеяния сигнала от БПЛА.** Параметры моделирования взяты в соответствии реальными данными РЛС миллиметрового диапазона TI IWR1642. В следствии отсутствия экспериментальных данных показана валидация модели путем произведения моделирования одиночного ротора с лопастями большой длины и вращающегося с очень малой скоростью. Использование данных допущений позволяет обнаружить отклики, соответствующие каждой из лопастей на сечении дальностно-скоростного портрета в различных элементах разрешения.

В табл. 1 продемонстрированы основные параметры моделирования.

В табл. 2 показаны основные параметры БПЛА в модели, используемые для валидации. Параметры модельного БПЛА подобраны таким образом, чтобы показать работоспособность модели.

Таблица 1

Параметр	Величина
Несущая частота	77 ГГц
Крутизна ЛЧМ	29,982 МГц/мкс
Ширина спектра сигнала (используемая)	767,54 МГц
Частота дискретизации ВЧ	1,6 ГГц
Число периодов ЛЧМ импульсов	128
Длительность ЛЧМ импульса	60 мкс
Период ЛЧМ импульсов	160 мкс
Частота дискретизации АЦП	10 МГц
Число отсчетов АЦП за один период	256
Время моделирования	20,3 мс

Таблица 2

Параметр	Величина
Число лопастей на роторе	2
Число роторов	1
Размеры лопасти	2 м
Радиус оси ротора	0,0025 м
Частота вращения лопасти	0,0796 Гц

На рис. 3 представлен результат моделирования в виде сечения дальностно-скоростного портрета, который является результатом моделирования одиночного ротора с лопастями большого размаха и очень малой скорости вращения (табл. 1, 2).

Радиальные скорости оконечной части лопастей при установке начального угла поворота лопасти  $20^0$  равны 1 м/с и минус 0,8 м/с, что совпадает с результатами показанными на сечении ДСП по уровню минус 20 дБ.

Помимо скоростных характеристик лопастей на сечении ДСП можно увидеть попадание откликов оконечной части лопастей в разные элементы по дальности (9,38 м и 10,9 м для каждой из лопастей, при условии нахождения ротора на расстоянии 10 м), что подтверждает правильность формирования радиолокационных изображений для заданных параметров сигнала и цели.

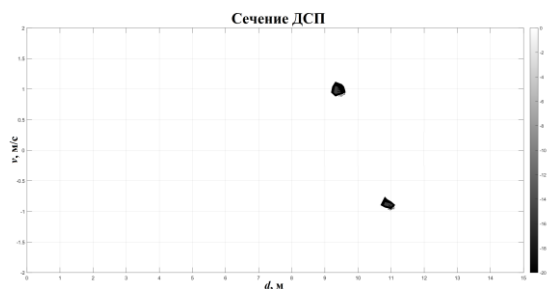


Рис. 3. Сечение ДСП одиночного винта

**Формирование обучающих данных.** Для тестирования нейронной сети классификатора предполагается использование двух моделей БПЛА: Xiaomi Mi Drone Mini (рис. 4,а) и DJI Mavic2 PRO (рис. 4,б). Основные характеристики Xiaomi Mi Drone Mini представлены в табл. 3, а DJI Mavic2 PRO представлены в табл. 4.



Рис. 4. Моделируемые БПЛА

Таблица 3

Параметр	Величина
Число лопастей на роторе	2
Число роторов	4
Длина лопасти	0,038 м
Радиус оси ротора	0,0025 м
Ширина лопасти	0,005 м
Частота вращения лопастей	$\pm 100$ Гц
Координаты ротора 1	-0.041; 0.041 м
Координаты ротора 2	0.041; 0.041 м
Координаты ротора 3	0.041; -0.041 м
Координаты ротора 4	-0.041; -0.041 м

Таблица 4

Параметр	Величина
Число лопастей на роторе	2
Число роторов	4
Длина лопасти	0,107 м
Радиус оси ротора	0,011 м
Ширина лопасти	0,022 м
Частота вращения лопастей	$\pm 100$ Гц
Координаты ротора 1	-0.1285; 0.109 м
Координаты ротора 2	0.1285; 0.109 м
Координаты ротора 3	0.1524; -0.109 м
Координаты ротора 4	-0.1524; -0.109 м

Получаемые радиолокационные изображения имеют разрешение 128x128 точек. Для обучения генерируется 1000 изображений для каждого БПЛА с различными параметрами углов ориентации БПЛА. Помимо изображений с БПЛА сформированы изображения только с подстилающей поверхностью. Затем добавляя шум на изображение с различными значениями параметров нормального распределения: матожидание от 56,99 до 79,66 и среднеквадратического отклонения от 11,17 до 12,3. В результате имеется по 10000 изображений каждого класса. Примеры полученных РЛИ представлены для Xiaomi Mi Drone Mini на рис. 5,а, для DJI Mavic2 PRO на рис. 5,б, для подстилающей поверхности без БПЛА рис. 5,в.

**Обучение нейронной сети.** Обучение НС производилось в Tensorflow версии 2.11 установленной в системе Ubuntu 20.04 LTS. Моделируемые РЛИ, полученные в предыдущем разделе, были разделены на 3 выборки – обучающую (70% изображений), тестовую (по 50 изображений каждого класса) и валидационную (оставшиеся изображения). Графики точности нейронной сети и функции потерь в процессе обучения показаны на рис. 6.

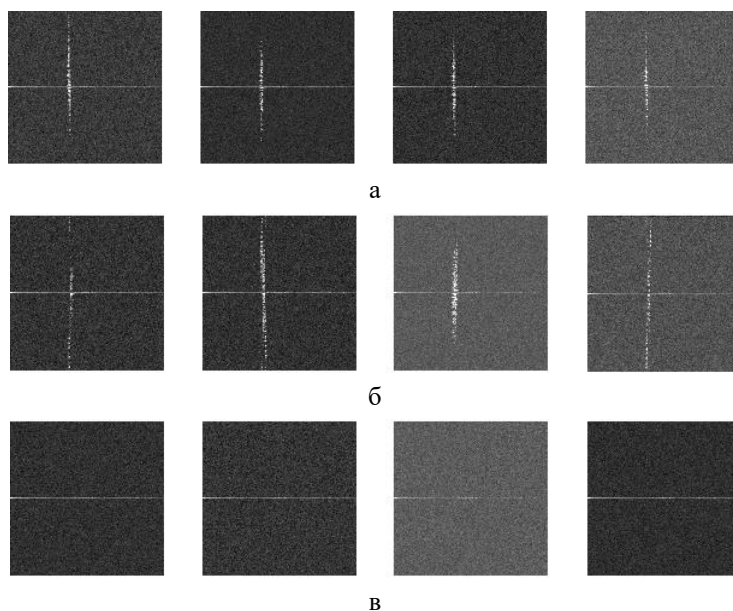


Рис. 5. Моделируемые РЛИ

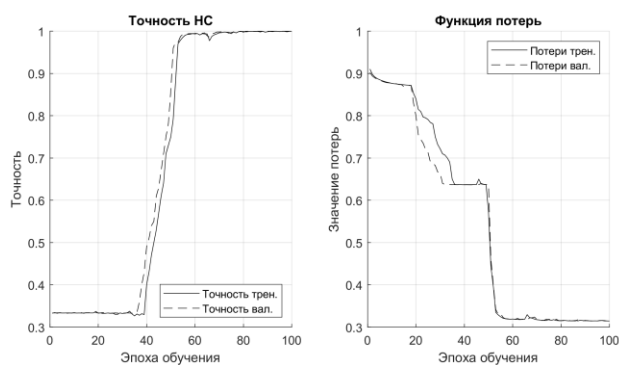


Рис. 6. Графики процесса обучения НС

Проверка на тестовых данных, состоящих из 50 изображений класса Xiaomi Mi Drone Mini, 50 изображений DJI Mavic2 PRO и 50 изображений без БПЛА, показана на рис. 7. НС допускает 1 ошибку на 150 тестовых изображений.

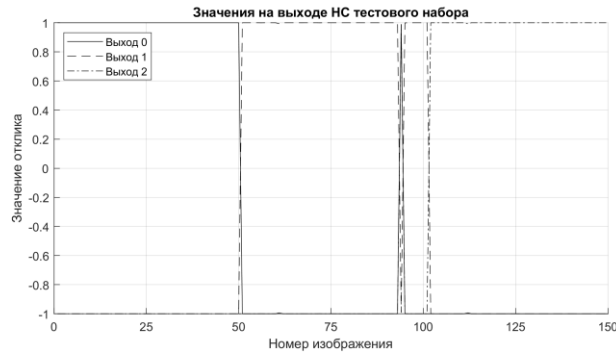


Рис. 7. Работа НС на тестовых данных

По результатам обучения достигнута точность тренировочная 0,9998, валидационная 0,9999, тестовая 0,9933.

**Выводы.** Предложенный классификатор мультироторных БПЛА с применением нейронных сетей позволяет осуществлять классификацию объектов различной конфигурации. Применение модели рассеяния РЛ сигналов от БПЛА позволяет осуществлять генерацию обучающих данных для нейронной сети классификатора с различными параметрами сигнала РЛС, характеристиками БПЛА и текущими параметрами полета данного аппарата. Использование модели рассеяния позволяет относительно быстро формировать большие наборы данных, что является одним из самых трудоемких и дорогих этапов создания классификаторов. Применение в структуре классификатора нейронной сети сверточного типа, а также правильно сформированных обучающих данных позволяет получить стабильные результаты классификации различных моделей мультироторных БПЛА. В результате численного эксперимента получена точность классификации 0,9933 по тестовым данным. Полученная точность превышает точность классификации нейросетевых классификаторов БПЛА из работы [16] и [17], которая составила 0,9815 и 0,9654, соответственно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Molchanov P. et al. Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2014. – Vol. 6, No. 3-4. – P. 435-444.
2. De Wit J.J.M., Harmanny R.I.A., Molchanov P. Radar micro-Doppler feature extraction using the singular value decomposition // 2014 International Radar Conference. – IEEE, 2014. – P. 1-6.
3. Zhang P. et al. Classification of drones based on micro-Doppler signatures with dual-band radar sensors // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL). – IEEE, 2017. – P. 638-643.
4. Kim B.K., Kang H.S., Park S.O. Drone classification using convolutional neural networks with merged Doppler images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2016. – Vol. 14, No. 1. – P. 38-42.
5. Oh B.S. et al. An EMD-based micro-Doppler signature analysis for mini-UAV blade flash reconstruction // 2017 22nd International Conference on Digital Signal Processing (DSP). – IEEE, 2017. – P. 1-5.

6. *Stankovic L., Djurovic I., Thayaparan T.* Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* – 2006. – Vol. 42, No. 4. – P. 1496-1506.
7. *Fioranelli F., et al.* Classification of loaded/unloaded micro-drones using multistatic radar // *Electronics Letters.* – 2015. – Vol. 51, No. 22. – P. 1813-1815.
8. *Stankovic L., Thayaparan T., Dakovic M.* Signal decomposition by using the S-method with application to the analysis of HF radar signals in sea-clutter // *IEEE Transactions on Signal Processing.* – 2006. – Vol. 54, No. 11. – P. 4332-4342.
9. *Stankovic L., Daković M., Thayaparan T.* Time-frequency signal analysis with applications. – Artech house, 2014.
10. *Schmidt R.* Multiple emitter location and signal parameter estimation // *IEEE transactions on antennas and propagation.* – 1986. – Vol. 34, No. 3. – P. 276-280.
11. *Sun H., et al.* Improving the Doppler resolution of ground-based surveillance radar for drone detection // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* – 2019. – Vol. 55, No. 6. – P. 3667-3673.
12. *Tan R., et al.* Improved micro-Doppler features extraction using smoothed-pseudo Wigner-Ville distribution // *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON).* – IEEE, 2016. – P. 730-733.
13. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений: пер. с англ. – М.: Издательский дом Техносфера, 2005. – 1073 с.
14. *Anderson T.W., Goodman L.A.* Statistical inference about Markov chains // *The Annals of Mathematical Statistics.* – 1957. – P. 89-110.
15. *Деркачев В.А.* Модель рассеяния радиолокационных сигналов от беспилотных летательных аппаратов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2021. – № 2 (219). – С. 120-129.
16. *Martinez J., et al.* Convolutional neural network assisted detection and localization of UAVs with a narrowband multi-site radar // *2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwave for Intelligent Mobility (ICMIM).* – IEEE, 2018. – P. 1-4.
17. *Wang L., Tang J., Liao Q.* A study on radar target detection based on deep neural networks // *IEEE Sensors Letters.* – 2019. – Vol. 3, No. 3. – P. 1-4.
18. *Mendis G.J., et al.* Deep learning based doppler radar for micro UAS detection and classification // *MILCOM 2016-2016 IEEE Military Communications Conference.* – IEEE, 2016. – P. 924-929.
19. *Stankovic L., Djurovic I., Thayaparan T.* Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* – 2006. – Vol. 42, No. 4. – P. 1496-1506.
20. *Regev N., Yoffe I., Wulich D.* Classification of single and multi propelled miniature drones using multilayer perceptron artificial neural network. – 2017.

## REFERENCES

1. *Molchanov P. et al.* Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2014, Vol. 6, No. 3-4, pp. 435-444.
2. *De Wit J.J.M., Harmanny R.I.A., Molchanov P.* Radar micro-Doppler feature extraction using the singular value decomposition, *2014 International Radar Conference.* IEEE, 2014, pp. 1-6.
3. *Zhang P. et al.* Classification of drones based on micro-Doppler signatures with dual-band radar sensors, *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL).* IEEE, 2017, pp. 638-643.
4. *Kim B.K., Kang H.S., Park S.O.* Drone classification using convolutional neural networks with merged Doppler images, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, Vol. 14, No. 1, pp. 38-42.
5. *Oh B.S. et al.* An EMD-based micro-Doppler signature analysis for mini-UAV blade flash reconstruction, *2017 22nd International Conference on Digital Signal Processing (DSP).* IEEE, 2017, pp. 1-5.
6. *Stankovic L., Djurovic I., Thayaparan T.* Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, Vol. 42, No. 4, pp. 1496-1506.
7. *Fioranelli F., et al.* Classification of loaded/unloaded micro-drones using multistatic radar, *Electronics Letters*, 2015, Vol. 51, No. 22, pp. 1813-1815.

8. *Stankovic L., Thayaparan T., Dakovic M.* Signal decomposition by using the S-method with application to the analysis of HF radar signals in sea-clutter, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, Vol. 54, No. 11, pp. 4332-4342.
9. *Stankovic L., Daković M., Thayaparan T.* Time-frequency signal analysis with applications. Artech house, 2014.
10. *Schmidt R.* Multiple emitter location and signal parameter estimation, *IEEE transactions on antennas and propagation*, 1986, Vol. 34, No. 3, pp. 276-280.
11. *Sun H., et al.* Improving the Doppler resolution of ground-based surveillance radar for drone detection, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, Vol. 55, No. 6, pp. 3667-3673.
12. *Tan R., et al.* Improved micro-Doppler features extraction using smoothed-pseudo Wigner-Ville distribution, *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. IEEE, 2016, pp. 730-733.
13. *Gonzalez R., Vuds R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]: transl. from engl. Moscow: Izdatel'skiy dom Tekhnosfera, 2005, 1073 p.
14. *Anderson T.W., Goodman L.A.* Statistical inference about Markov chains, *The Annals of Mathematical Statistics*, 1957, pp. 89-110.
15. *Derkachev V.A.* Model' rasseyaniya radiolokatsionnykh signalov ot bespilotnykh letatel'nykh apparatov [The scattering model of radar signals from unmanned aerial vehicles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2 (219), pp. 120-129.
16. *Martinez J., et al.* Convolutional neural network assisted detection and localization of UAVs with a narrowband multi-site radar, *2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwave for Intelligent Mobility (ICMIM)*. IEEE, 2018, pp. 1-4.
17. *Wang L., Tang J., Liao Q.* A study on radar target detection based on deep neural networks, *IEEE Sensors Letters*, 2019, Vol. 3, No. 3, pp. 1-4.
18. *Mendis G.J., et al.* Deep learning based doppler radar for micro UAS detection and classification, *MILCOM 2016-2016 IEEE Military Communications Conference*. IEEE, 2016, pp. 924-929.
19. *Stankovic L., Djurovic I., Thayaparan T.* Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, Vol. 42, No. 4, pp. 1496-1506.
20. *Regev N., Yoffe I., Wulich D.* Classification of single and multi propelled miniature drones using multilayer perceptron artificial neural network, 2017.

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

**Деркачев Владимир Александрович** – Южный федеральный университет; e-mail: vderkachev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79614154733; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; ассистент.

**Бахчевников Валентин Владимирович** – e-mail: bahchevnikov@sfedu.ru; тел.: +79518289271; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; старший преподаватель.

**Бакуменко Алексей Николаевич** – e-mail: baku@sfedu.ru; тел.: +79886031853; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; ассистент.

**Derkachev Vladimir Aleksandrovich** – Southern Federal University; e-mail: vderkachev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone +79614154733; the department of radio engineering & telecommunication systems; assistant.

**Bakhchevnikov Valentin Vladimirovich** – e-mail: bahchevnikov@sfedu.ru; phone: +79518289271; the department of radio engineering & telecommunication; senior lecturer.

**Bakumenko Alexey Nikolaevich** – e-mail: baku@sfedu.ru; phone: +79886031853; the department of radio engineering & telecommunication systems; assistant.



**Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, Г.В. Куповых, А.А. Ташилова,  
М.Б. Ашабокова**

## **МЕТОД СНИЖЕНИЯ РИСКОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ВСЛЕДСТВИЕ ГРАДОБИТИЙ**

*Ключевыми проблемами обеспечения условий развития общества в настоящее время становятся адаптация различных сфер деятельности к изменению климата и снижение рисков, связанных с опасными погодными явлениями. В статье обсуждаются возможные подходы к снижению рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями, затронуты особенности их информационного обеспечения. Предложены один метод решения данной задачи и модель для его реализации, разработанная в рамках теории принятия решений. Метод решения задачи отнесен нами к "пассивным" методам, которые не предполагают вмешательства в процессы формирования градовых осадков в облаках. В качестве механизма снижения рисков в предложенном методе используется тот факт, что уязвимость сельскохозяйственных культур градом различна для различных культур. Соответственно, управление рисками осуществляется путем подбора структуры производства сельскохозяйственных культур с учетом особенностей их уязвимости данным погодным явлением, а также условиями, наложенными на объемы производства сельскохозяйственной продукции. В статье обсуждаются основные задачи, возникающие на пути практического использования данного метода. Для анализа эффективности метода для производственно-экономических условий степной климатической зоны Кабардино-Балкарской республики проведены модельные расчеты. При этом для определения возможных состояний градовых процессов была использована частота выпадения града (число дней с градом на рассматриваемой территории за год). Пользуясь временным рядом данного показателя за период 1958-2018 гг., частота выпадения града в рассматриваемой климатической зоне была представлена в виде дискретной случайной величины с известным законом распределения. Это дало возможность рассмотреть задачу снижения потерь сельского хозяйства как задачу принятия решений в условиях риска. Результаты модельных расчетов показали высокую эффективность метода для снижения потерь сельского хозяйства от градобитий. Важным достоинством метода является то, что практическое его использование будет связано с незначительными затратами.*

*Климатические риски; градобития; сельское хозяйство; повреждаемость сельхозкультур; снижение рисков; теория принятия решения; целевая функция.*

**B.A. Ashabokov, L.M. Fedchenko, G.V. Kupovykh, A.A. Tashilova, M.B. Ashabokova**

## **METHOD FOR REDUCING RISKS IN AGRICULTURE DUE TO HAILSTORMINGS**

*The key problems of ensuring the conditions for the development of society are now becoming the adaptation of various fields of activity to climate change and the reduction of risks associated with dangerous weather events. The article discusses possible approaches to reducing the risks in agriculture associated with hail damage, touches upon the features of their information support. One method for solving this problem and a model for its implementation, developed in the framework of decision theory, are proposed. The method for solving the problem is classified by us as "passive" methods, which do not imply interference in the processes of formation of hail precipitation in clouds. As a risk mitigation mechanism, the proposed method uses the fact that the vulnerability of crops to hail is different for different crops. Accordingly, risk management is carried out by selecting the structure of agricultural production, taking into account the peculiarities of their vulnerability to this weather event, as well as the conditions imposed on the volume of agricultural production. The article discusses the main tasks that arise in the way of the practical use of this method. To analyze the effectiveness of the method for the production and economic conditions of the steppe climatic zone of the Kabardino-Balkarian Republic, model calculations were carried out. At the same time, to determine the possible states of hail processes, the frequency of hail fall (the number of days with hail in the territory under consideration per year) was used. Using the time series of this indicator for the period 1958-2018, the frequency of hail in the considered climatic zone was presented as a discrete random variable with a known distribution law. This made it possible to consider the problem of reducing losses in agriculture as a problem of decision-*

*making under risk. The results of model calculations showed the high efficiency of the method for reducing the losses of agriculture from hail damage. An important advantage of the method is that its practical use will be associated with insignificant costs.*

*Climate risks; hailstorming; agriculture; crop damage; risk reduction; decision theory; objective function.*

**Введение.** Из отраслей экономики сельское хозяйство является одной из самых чувствительных к изменению климата. Это обусловлено существенной зависимостью производства растениеводческой продукции от погодных условий [1–5]. Уже сейчас заметно влияние изменения климата на условия функционирования данной отрасли, на формирование урожаев сельскохозяйственных культур и, таким образом, на устойчивость производства, на спрос и предложение сельскохозяйственной продукции. Во многих работах, посвященных проблеме обеспечения условий устойчивого развития сельского хозяйства, отмечается, что актуальность решения данной проблемы в последние десятилетия заметно повысилась. Следует еще добавить, что проблема эта претерпела значительные изменения, обусловленные влиянием изменения климата на условия производства сельскохозяйственной продукции, она стала существенно сложнее [6–13]. Решение данной проблемы требует проведения исследований по различным направлениям, к которым относятся: проведение детального анализа и прогноза глобального и регионального изменения климата и возможных его последствий; исследование механизмов влияния изменения данного фактора на функционирование отрасли; формулировка задач адаптации сельского хозяйства к изменению климата и разработка методов их решения и т.д. Важнейшее место среди этих направлений исследований занимает разработка методов снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с экстремальными погодными явлениями, частота возникновения и мощность которых увеличиваются быстрыми темпами вследствие изменения климата, происходит расширение территорий, охваченных этими явлениями.

В настоящей работе изложен метод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями. Как известно, они наносят значительный ущерб народному хозяйству многих стран, в том числе и нашей страны. В качестве механизма снижения рисков в методе используется тот факт, что уязвимость сельскохозяйственных культур градом различна для различных культур. Соответственно, управление рисками осуществляется путем подбора структуры производства сельскохозяйственных культур с учетом особенностей их уязвимости данным погодным явлением, а также условиями, наложенными на объемы производства сельскохозяйственной продукции. Обсуждаются проблемы, возникающие на пути практической реализации метода.

**1. Основные подходы к снижению рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями.** Результатом отсутствия эффективных методов снижения рисков, связанных с экстремальными погодными явлениями, может быть нарушение устойчивости функционирования различных сфер деятельности. Градобития, например, могут повлиять на ценообразование на сельскохозяйственную продукцию, на функционирование продовольственных систем. Следует отметить, что под термином риск в настоящей работе имеются в виду ожидаемые потери сельского хозяйства конкретной территории за год от градобитий [14].

Как известно, возникновение рисков на заданной территории, связанных с тем или иным экстремальным погодным явлением, а также уровень этих рисков определяются: подверженностью территории данным погодным явлениям и уязвимостью объектов (реципиентов), расположенных на ней этим явлением [15].

Исходя из этого, в качестве механизмов снижения рисков, связанных с экстремальными погодными явлениями, можно использовать:

- ◆ снижение подверженности территории экстремальному погодному явлению, на которой располагаются реципиенты риска;
- ◆ снижение уязвимости реципиентов риска на этой территории данным погодным явлением.

Соответственно методы снижения рисков, связанных с экстремальными погодными явлениями, можно разделить на "активные" и "пассивные".

"Активными" назовем методы, предусматривающие вмешательство в те процессы, которые сопровождаются экстремальными погодными явлениями. Эти методы, можно сказать, направлены на снижение подверженности рассматриваемой территории экстремальным погодным явлениям. К ним можно отнести, например, методы снижения потерь сельского хозяйства от градобитий, основанные на активном воздействии на градовые облака (с целью предотвращения градобитий) [16]. Снижение подверженности сельского хозяйства градобитиям в данном случае осуществляется путем активного воздействия на градовые облака, в результате которого должно произойти переход их в не градовые. Эти методы в широких масштабах используются для защиты сельскохозяйственных культур от града.

Таким же образом "пассивными" будем называть методы, не предполагающие вмешательства в процессы формирования градовых осадков в облаках. Они направлены на снижение уязвимости сельскохозяйственного производства градом. К таким методам можно отнести, например, использование сеток для защиты садов от града.

Ниже излагается метод, который относится к "пассивным" и основан на использовании того факта, что повреждаемость градовыми частицами различна для различных сельскохозяйственных культур, то есть при одних и тех же условиях одни культуры сильнее повреждаются градом, а другие в меньшей степени. Отсюда снижение рисков или потерь сельского хозяйства от града осуществляется путем управления структурой производства сельскохозяйственных культур. "Пассивный" метод, который будет изложен ниже, основан на этом механизме.

Однако на пути разработки методов и моделей, необходимых для практической реализации метода, возникают серьезные трудности, которые связаны с отсутствием необходимой для этой цели информации. Прогнозировать, например, активность градовых процессов, а тем более характеристики градовых осадков в предстоящем году не представляется возможным. Имеющаяся для решения данной задачи информация в основном ограничивается многолетними данными о частоте и площади выпадения града на рассматриваемой территории, радиолокационными характеристиками градовых облаков, а в некоторых случаях характеристиками градин на земле. Кроме этого, можно сказать, что практически полностью отсутствует информация об уязвимости сельскохозяйственных культур градовыми частицами в зависимости от фазы их развития и от характеристик градовых осадков. Очевидно, что этой информации недостаточно для разработки методов снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями.

Таким образом можно сказать, что трудности, возникающие на пути практической реализации "пассивных" методов в основном обусловлены отсутствием информации, необходимой для разработки соответствующих методов и моделей. Как было отмечено, это делает более перспективным рассмотрение данной проблемы в рамках теории принятия решений [17, 18]. Ниже приводится модель снижения связанных с градобитиями потерь сельского хозяйства в рамках данной теории.

С учетом особенностей влияния изменения климата на характеристики экстремальных погодных явлений (увеличение частоты и их разрушительной силы, расширение пространственного их распространения) нельзя не отметить важное требование, которому должны удовлетворять методы снижения связанных с ними рисков в различных сферах деятельности. Таким требованием является экономич-

ность практического их использования. Возможности использования даже высокоэффективных методов могут оказаться ограниченными в условиях изменения климата. Причина заключается в том, что противостояние последствиям данного глобального фактора может потребовать значительных затрат ресурсов, включая и финансовые. Это может привести к существенному снижению обеспеченности общества ресурсами всех видов и, как следствие, к снижению возможности практического использования тех или иных методов снижения рисков.

**2. Постановка задачи снижения потерь сельского хозяйства, связанных с градобитиями.** Постановка и решение задачи снижения рисков в отраслях экономики, связанных с экстремальными погодными явлениями, требуют формирования множества действий (или множества мероприятий)  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ , использование каждого из которых приводит к определенному снижению рисков от рассматриваемого погодного явления, а для выбора наиболее приемлемого из данного множества мероприятий существуют различные критерии. При этом необходимо рассматривать возможные состояния, в которых может находиться рассматриваемое погодное явление на данной территории и, если это возможно, вероятности его нахождения в различных состояниях [14]. Обозначим через  $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$  множество этих состояний, а соответствующие им вероятности через  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$ .

В случае градобитий, например, в качестве таких показателей, характеризующих состояние градовых процессов на данной территории, можно использовать частоту выпадения града, величину ущерба от града, площадь выпадения града и т.д. Можно также использовать комбинации различных показателей. Очевидно, что определение этих показателей возможно с погрешностями, часто значительными. Это относится и к другим отраслям экономики. Отмеченные показатели должны удовлетворять важному требованию, а именно, они должны позволять ставить в соответствие каждой паре  $(A_i, U_j)$  некоторую величину  $S_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N$ ), которая называется исходом. Она равна величине риска, соответствующего действию  $A_i$  и состоянию экстремального погодного явления  $U_j$ .

В случае задачи снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями, в качестве исхода может быть использован один из показателей: валовой объем производства продукции, величина потерь урожая от града, величина спасенного урожая и др.

Для выбора из  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$  наиболее приемлемого составляется табл. 1, которую можно считать моделью принятия решения по снижению потерь отрасли экономики от рассматриваемого погодного явления. В рассматриваемом случае, то есть когда известны  $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$  и соответствующие им вероятности, получается задача принятия решений в условиях риска. Для выбора наиболее приемлемого действия в этом случае составляется таблица 1, которую можно считать моделью принятия решения по снижению потерь отрасли от рассматриваемого погодного явления, также существуют некоторые критерии, которые используются для этой цели [17, 18].

Таблица 1

**Исход  $S_{ij}$ , соответствующий мероприятию  $A_i$  и состоянию  $U_j$  градовых процессов на рассматриваемой территории ( $i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$ )**

	$U_1$	$U_2$	$U_3$	---	$U_N$
$A_1$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	---	$S_{1N}$
$A_2$	$S_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$	---	$S_{2N}$
$A_3$	$S_{31}$	$S_{32}$	$S_{33}$	---	$S_{3N}$
---	---	---	---	---	---
$A_M$	$S_{M1}$	$S_{M2}$	$S_{M3}$	---	$S_{MN}$

Ниже в качестве такого критерия используется ожидаемый объем производства продукции, соответствующий каждому элементу из множества действий  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ . При этом задачу предпочтительнее рассматривать как однокритериальную задачу принятия решений, что в существенной степени облегчает ее решение. При использовании двух и более критериев на пути решения задачи могут возникнуть серьезные трудности [17].

В случае рассматриваемой в работе задачи элементами множества  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$  являются допустимые структуры производства сельхозкультур. Они подбираются с учетом ограничений, наложенных на объемы производства культур и используемых для этой цели ограниченных ресурсов [19-21]. Важно еще отметить, что формирование данного множества может оказаться трудоемким, а полученное множество существенно ограниченным.

**3. Результаты расчетов.** С целью исследования эффективности изложенного метода снижения потерь сельского хозяйства от градобитий для природно-климатических и производственно-экономических условий степной климатической зоны Кабардино-Балкарской республики были проведены модельные расчеты. При этом для определения возможных состояний градовых процессов  $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$ , была использована частота выпадения града (число дней с градом на данной территории за год). Тогда, пользуясь данными об этом показателе за 60-летний период (1958-2018 гг.), частота выпадения града по годам в рассматриваемой климатической зоне региона была представлена в виде случайной величины. Расчетные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Число дней с градом и соответствующие различным его значениям вероятности, полученные по данным за 1958-2018 гг.

$n$	0	1	2	3
$p_i$	0,59	0,31	0,08	0,02

В этой таблице  $n$  – частота выпадения града,  $p_i$  – соответствующая вероятность. Случаи выпадения града рассматривались как независимые события. Из таблицы видно, что максимальное количество градобитий в рассматриваемой климатической зоне не превышает 3-х за год, то есть множество состояний градовых процессов состоит из элементов:  $U_0$  (град не выпадает в течение сезона),  $U_1$  (град выпадает один раз),  $U_2$  (град выпадет два раза),  $U_3$  (град выпадет три раза). Соответствующие им вероятности, как можно заметить, получились равными:  $p_0=0,59$ ;  $p_1=0,31$ ;  $p_2=0,08$ ;  $p_3=0,02$ .

Расчеты проводились для основных культур, производимых в данной климатической зоне: пшеница, кукуруза, овес, картофель. Для определения повреждаемости сельскохозяйственных культур градом были использованы результаты проведенных в Высокогорном геофизическом институте полевых и лабораторных исследований степени повреждения пшеницы и кукурузы градом в зависимости от фазы развития культур и характеристик выпавшего града [22, 23]. По результатам этих исследований повреждаемость сельскохозяйственных культур сложным образом зависит от фазы их развития и характеристик градовых осадков. В случае, когда кинетическая энергия градин равнялась  $100 \text{ Дж/м}^2$ , например, коэффициенты повреждаемости кукурузы и пшеницы получились равными  $k_1=0,37$  (или 37%) и  $k_2=0,7$  (или 70%) соответственно. Для остальных культур из-за отсутствия результатов таких исследований значения этих коэффициентов были определены экспертным методом. Для коэффициентов повреждаемости овса и картофеля, было предположено, что  $k_3=0,6$  (60%) и  $k_4=0,4$  (40%) соответственно. Таким образом, для отмеченных культур использовались следующие коэффициенты повреждаемости: 1. пшеницы  $k_1=0,7$ ,

2. кукурузы  $k_2=0,37$ , 3. овса  $k_3=0,6$ , 4. картофеля  $k_4=0,4$ . Расчеты проводились для случая, когда град выпадает три раза в течение года. При этом было предположено, что площадь выпадения града в первом случае равна  $S_1=600$  га, во втором  $S_2=1000$  га и в третьем  $S_3=700$  га. Рассматриваемые в качестве действий структуры производства отмеченных сельхозкультур на этих участках приводятся в табл. 3.

Таблица 3

**Структуры производства сельскохозяйственных культур ( $n=1,2,3,4$ ) на участках ( $S_i$ ), на которых наблюдалось выпадение града**

$n$	Участок 1, $S_1= 600$ га				Участок 2, $S_2= 1000$ га				Участок 3, $S_3= 700$ га			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	300	100	100	100	500	200	200	100	300	200	100	100
2	300	100	100	100	500	200	200	100	300	200	100	100
3	240	160	100	100	400	300	200	100	240	260	100	100
4	210	190	100	100	350	350	200	100	210	290	100	100
5	150	250	100	100	250	450	200	100	150	350	100	100
6	240	100	160	100	400	200	300	100	240	200	160	100
7	150	100	250	100	250	200	450	100	150	200	250	100
8	240	100	100	160	400	200	200	200	300	200	100	100
9	150	100	100	250	250	200	200	350	150	200	100	250
10	300	100	80	120	500	200	160	140	300	200	80	120

Использование нескольких участков позволяет исследовать различные варианты взаимодействия градовых осадков с сельскохозяйственными культурами, различные показатели производства сельскохозяйственных культур и т.д. Ожидаемый валовой объем производства сельскохозяйственных культур (млн. руб.) на  $i$ -ом участке определялся для каждого действия при отсутствии града ( $VO$ ) и при его выпадении ( $VT$ ) с помощью выражений:

$$VO_i = \sum_{j=1}^4 x_{ij} Y_{ij} (C_{ij} - s_j), \quad (i=1) \quad (1)$$

$$VT_i = \sum_{j=1}^4 (1-k_{ij}) x_{ij} Y_{ij} (C_{ij} - s_j), \quad (i=1, 2, 3), \quad (2)$$

где  $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}$  – площади, занимаемые культурами  $j=1,2,3,4$  на  $i$  – ом участке,  $Y_{i1}, Y_{i2}, Y_{i3}, Y_{i4}$  – урожайности,  $C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}, C_{i4}$  – цены реализации;  $s_j$  – себестоимость производства  $i$  -ой культуры и  $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}$  – повреждаемости градом этих же культур на  $i$  -ом участке ( $i=1, 2, 3$ ). В табл. 4 приводятся исходные данные, использованные для проведения расчетов. Как видно из таблицы, сделано допущение, что производственно-экономические показатели и коэффициенты повреждаемости культур одинаковы на всех участках.

Таблица 4

**Исходные данные для проведения расчетов**

$mn$	С/х культура	Урожайность, $Y_j$ , ц/га	Коэффициент повреждаемости $k_j$	Себестоимость*, $s_j$ , руб/ц	Цена* реализации, $C_{ij}$ , руб/ц
$j=1$	пшеница	40	0,7	700	1350
$j=2$	кукуруза	50	0,37	550	1100
$j=3$	овес	35	0,6	420	700
$j=4$	картофель	150	0,4	820	1000

\*Данные сайта Госкомстата КБР [18]

Вычисленные для каждого участка значения прибыли  $V0_i$ ,  $VT_1$ ,  $VT_2$  и  $VT_3$ , а также значения суммарной для всех участков прибыли  $V_{Bi}$ , соответствующие различным случаям выпадения града, приводятся в табл. 5.

Таблица 5

**Значения прибыли, соответствующие различным случаям выпадения града, а также значения суммарной для всех участков прибыли  $V_B^*$**

№	$V0_i$	$VT_1$	$VT_2$	$VT_3$	$V_{Bi}$
	$p_0=0,59$	$p_{z1}=0,31$	$p_{z2}=0,08$	$p_{z3}=0,02$	
1	54, 370	46, 224	32, 833	23, 670	49, 507
2	54, 370	46, 224	32, 833	23, 670	49, 507
3	54, 700	47, 036	34, 447	25, 766	50, 125
4	54, 865	47, 441	35, 254	26, 813	50, 433
<b>5</b>	<b>55, 195</b>	<b>48, 253</b>	<b>36, 868</b>	<b>28, 909</b>	<b>51, 051(max)</b>
6	50, 806	43, 399	31, 240	22, 816	46, 385
<b>7</b>	<b>45, 460</b>	<b>39, 162</b>	<b>28, 851</b>	<b>21, 536</b>	<b>41, 700 (min)</b>
8	54, 530	46, 828	34, 177	25, 014	49, 924
9	54, 920	47, 884	36, 343	28, 290	50, 720
10	55, 746	47, 502	33, 914	24, 652	50, 821

\*при отсутствии града ( $V0_i$ ) и при его выпадении 1 раз ( $VT_1$ ) на  $S_1$ , 2 раза ( $VT_2$ ) на  $S_2$  и 3 раза ( $VT_3$ ) на  $S_3$ , ожидаемые значения суммарной прибыли ( $V_{Bi}$ ), соответствующие различным действиям, (млн. руб.).

Можно заметить, что суммарные прибыли  $V_{Bi}$  существенно зависят от структуры производства сельскохозяйственных культур. В случае действий 5 и 7, например, разброс между значениями данного показателя составляет около 10 млн. руб. (табл. 4).

Для выбора более эффективной структуры производства сельскохозяйственных культур был использован критерий ожидаемого значения суммарной прибыли  $V_{Bi}$  [17]. Согласно данному критерию, наилучшей из структур считается та, которой соответствует максимум данного показателя. Из таблицы видно, что действием, приводящим к наилучшему исходу, является пятое ( $V_{B5}= 51,05$  млн. руб. (max)), а наихудшим является седьмое действие  $V_{B7}= 41,70$  млн. руб. (min). Разброс между этими значениями  $V_{Bi}$ , как видно из таблицы, составляет около 10 млн. руб.

Таким образом, для снижения потерь от града в предстоящем году следует использовать структуру, соответствующую мероприятию 5.

Модель позволяет исследовать влияние различных факторов на значения прибыли на различных участках и на суммарную прибыль  $V_B$ . В таблице 6 приведены результаты расчетов, когда урожайности культур увеличены на 10% по сравнению с предыдущим вариантом (табл. 5).

Таблица 6

**Значения прибыли, соответствующие различным случаям выпадения града, при повышении урожайности на 10%**

№	$V0_i$	$VT_1$	$VT_2$	$VT_3$	$V_{Bi}$
	$p_0=0,59$	$p_{z1}=0,31$	$p_{z2}=0,08$	$p_{z3}=0,02$	
1	59, 807	50, 846	36, 116	26, 037	54, 458
2	59, 807	50, 846	36, 116	26, 037	54, 458
3	60, 170	51, 739	37, 892	28, 342	55, 137
4	60, 351	52, 185	38, 779	29, 495	55, 477
<b>5</b>	<b>60, 714</b>	<b>53, 078</b>	<b>40, 555</b>	<b>31, 800</b>	<b>56,156 (max)</b>
6	55, 886	47, 739	34, 364	25, 098	51, 023

Окончание табл. 6

	$VO_i$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$V_{Bi}$
№	$p_0=0,59$	$p_{z1}=0,31$	$p_{z2}=0,08$	$p_{z3}=0,02$	
7	50,006	43,078	31,736	23,690	<b>45,870 (min)</b>
8	59,983	51,511	37,595	27,515	54,91
9	60,412	52,672	39,977	31,119	55,792
10	61,320	52,252	37,305	27,118	55,904

Можно заметить, что повышение урожайности культур привело к некоторому увеличению значений  $VO_i$ ,  $VG_1$ ,  $VG_2$ ,  $VG_3$ , оно привело к увеличению и максимального значения суммарной прибыли.

Результаты решения модельных задач показывают, что предложенный подход к снижению потерь сельского хозяйства, связанных с градобитиями, является эффективным и его можно использовать для решения практических задач. Следует еще отметить, что с точки зрения экономичности практического использования предложенный метод имеет значительное преимущество.

**Заключение.** Предложен метод снижения потерь сельского хозяйства от градобитий. В качестве механизма снижения потерь в подходе используется тот факт, что повреждаемость градом различна для различных сельскохозяйственных культур. В рамках теории принятия решений сформулирована модель снижения потерь сельского хозяйства с помощью данного метода. Соответственно, управление потерями сельского хозяйства от данного опасного погодного явления осуществляется путем подбора наиболее эффективной с точки зрения используемого критерия структуры производства сельскохозяйственных культур.

Для анализа эффективности метода для производственно-экономических условий степной климатической зоны КБР проведены модельные расчеты. При этом для определения возможных состояний градовых процессов была использована частота выпадения града (число дней с градом на рассматриваемой территории за год). Пользуясь временным рядом данного показателя за период 1958-2018 гг., частота выпадения града в рассматриваемой климатической зоне была представлена в виде дискретной случайной величины с известным законом распределения. Это дает возможность рассматривать задачу снижения потерь сельского хозяйства как задачу принятия решений в условиях риска. Результаты модельных расчетов показали высокую эффективность метода для снижения потерь сельского хозяйства от градобитий. Важным достоинством метода является то, что практическое его использование будет связано с незначительными затратами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. IPCC, 2007: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marguis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 976 p.
2. Вильфанд Р.М., Страшная А.И. Климат, прогнозы погоды и агрометеорологическое обеспечение сельского хозяйства в условиях изменения климата. Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям // Сб. докладов международной научно-практической конференции 7–11 декабря 2010. – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. 2011. – С. 23-38.
3. Behnam Mirgol, Meisam Nazari. Possible Scenarios of Winter Wheat Yield Reduction of Dryland Qazvin Province, Iran, Based on Prediction of Temperature and Precipitation Till the End of the Century // Climate. – 2018. – 6, 78.
4. Lobell D.B., Asseng S. Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models // Environ. Res. Lett. – 2017. – 12. – 015001.



5. *Сиротенко О.Д., Павлова В.Н.* Влияние изменений климата на сельское хозяйство. Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России. – 2-е изд. – Обнинск. 2009. – С. 168-190.
6. *Asseng S. et al.* Rising temperatures reduce global wheat production // *Nature Climate Change*. – 2015. – Vol. 5. – P. 143-147.
7. *Brown M.E., de Beurs K.M., Marshall M.* Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 126. – P. 174-183.
8. *Израэль Ю.А., Сиротенко О.Д.* Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России // *Метеорология и гидрология*. – 2003. – № 6. – С. 5-17.
9. *Золотокрылин А.Н., Черенокова Е.А., Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю., Бардин М.Ю., Ширяева А.В., Виноградова В.В.* Изменения урожайности зерновых культур Европейской России, вызванные квазидвухлетней цикличностью атмосферных процессов // *Известия Российской академии наук*. – 2016. – С. 90-99.
10. *Переведенцев Ю.П., Шарипова Р.Б., Важнова Н.А.* Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур // *Вестник УдГУ. Сер. Биология. Науки о Земле*. – 2012. – № 2. – С. 120-126.
11. *Павлова В.Н., Долгий-Трач В.А., Караченкова А.А.* Региональные изменения климата: агроклиматические оценки для производства сельскохозяйственных культур и землепользования // *Метеоспектр*. – 2015. – № 4. – С. 121-128.
12. *Павлова В.Н., Карачёнова А.А.* Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия // *Метеорология и гидрология*. – 2020. – № 1. – С. 78-94.
13. *Dronin N., Kirilenko A.* Climate change and food stress in Russia: what if the market transforms as it did during the past century? // *Climatic Change*. – 2008. – Vol. 86. – P. 123-150.
14. *Thywissen K.* Core terminology of disaster reduction. Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies. – Hong Kong: United Nations University Press. 2006. – 23 p.
15. *Катцов В.М.* Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / ред. В.М. Катцов. – СПб.: Росгидромет. 2017. – 106 с.
16. *Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А.* Физика облаков и активных воздействий на них. – Нальчик: ООО «Печатный двор», 2017. – 240 с.
17. *Кини Р.Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь. 1981. – 560 с.
18. *Taha X.* Введение в исследование операций. Т. 2. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
19. *Балкизова А.Х., Ташилова А.А., Пишихачева И.Н.* Основные этапы и задачи проблемы адаптации аграрного сектора к изменениям климата // *Матер. Международного симпозиума «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели»*. Т. 1. – Нальчик: КБНЦ РАН, 2013. – С. 106-109.
20. *Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Shapovalov A.V., Khavtsukov A.Kh. and Balkarova S.B.* Modeling Risk Reduction in Agriculture Associated with Dangerous Agrometeorological Phenomena // *International scientific and practical conference “AgroSMART – Smart solutions for agriculture”*, *KnE Life Sciences*. 2019. – P. 223-231.
21. [https://stavstat.gks.ru/ofstatistics\\_kbr](https://stavstat.gks.ru/ofstatistics_kbr) (дата обращения: 06.02.2023).
22. *Глисов М.И., Таумурзаев А.Х., Федченко Л.М., Хучунаев Б.М.* Кинетические характеристики града и повреждаемость сельскохозяйственных культур // *Тр. Всесоюзного Семинара «Активные воздействия на градовые процессы и усовершенствование льдообразующих реагентов для практики активных воздействий»*. – Нальчик. 1991. – С. 75-77.
23. *Глисов М.И., Таумурзаев А.Х., Федченко Л.М., Хучунаев Б.М.* Физические характеристики града и повреждаемость сельскохозяйственных культур // *Тр. Высокотгорного геофизического института*. Вып. 74. – М.: Гидрометеиздат. 1987. – С. 37-144.

## REFERENCES

1. IPCC, 2007: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marguis M., Averyt K. B., Tignor M. and Miller H. L. (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 976 p.
2. *Vil'fand R.M., Strashnaya A.I.* Klimat, prognozy pogody i agrometeorologicheskoe obespechenie sel'skogo khozyaystva v usloviyakh izmeneniya klimata. Adaptatsiya sel'skogo khozyaystva Rossii k menyayushchimsya pogodno-klimaticheskim usloviyam [Climate,

- weather forecasts and agrometeorological support for agriculture in the face of climate change. Adaptation of Russian agriculture to changing weather and climate conditions], *Sb. докладov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 7–11 dekabrya 2010* [Collection of reports of the international scientific-practical conference December 7–11, 2010]. Moscow: RGAU-MSKhA im. K.A. Timiryazeva. 2011, pp. 23-38.
3. *Behnam Mirgol, Meisam Nazari*. Possible Scenarios of Winter Wheat Yield Reduction of Dryland Qazvin Province, Iran, Based on Prediction of Temperature and Precipitation Till the End of the Century, *Climate*, 2018, 6, 78.
  4. *Lobell D.B., Asseng S.* Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models, *Environ. Res. Lett.*, 2017, 12, 015001.
  5. *Sirotenko O.D., Pavlova V.N.* Vliyaniye izmeneniy klimata na sel'skoe khozyaystvo. Razvitiye sel'skokhozyaystvennoy meteorologii v Rossii [Impact of climate change on agriculture. Development of agricultural meteorology in Russia]. 2nd ed. Obninsk. 2009, pp. 168-190.
  6. *Asseng S. et al.* Rising temperatures reduce global wheat production, *Nature Climate Change*, 2015, Vol. 5, pp. 143-147.
  7. *Brown M.E., de Beurs K.M., Marshall M.* Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 126, pp. 174-183.
  8. *Izrael' Yu.A., Sirotenko O.D.* Modelirovaniye vliyaniya izmeneniy klimata na produktivnost' sel'skogo khozyaystva Rossii [Modeling the impact of climate change on the productivity of Russian agriculture], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2003, No. 6, pp. 5-17.
  9. *Zolotokrylin A.N., Cherenokova E.A., Titkova T.B., Mikhaylov A.Yu., Bardin M.Yu., Shiryayeva A.V., Vinogradova V.V.* Izmeneniya urozhaynosti zernovykh kul'tur Evropeyskoy Rossii, vyzvannye kvazidvukhletney tsiklichnost'yu atmosferykh protsessov [Changes in the yield of grain crops in European Russia, caused by the quasi-biennial cyclicity of atmospheric processes], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk* [News of the Russian Academy of Sciences], 2016, pp. 90-99.
  10. *Perevedentsev Yu.P., SHaripova R.B., Vazhnova N.A.* Agroklimaticheskie resursy Ulyanovskoy oblasti i ikh vliyaniye na urozhaynost' zernovykh kul'tur [Agro-climatic resources of the Ulyanovsk region and their impact on the yield of grain crops], *Vestnik UdGU. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle* [Vestnik UdGU. Ser. Biology. Earth Sciences], 2012, No. 2, pp. 120-126.
  11. *Pavlova V.N., Dolgiy-Trach V.A., Karachenkova A.A.* Regional'nye izmeneniya klimata: agroklimaticheskie otsenki dlya proizvodstva sel'skokhozyaystvennykh kul'tur i zemlepol'zovaniya [Regional climate change: agro-climatic assessments for crop production and land use], *Meteospekt* [Meteospectr], 2015, No. 4, pp. 121-128.
  12. *Pavlova V.N., Karachenkova A.A.* Produktivnost' zernovykh kul'tur na territorii Evropeyskoy Rossii pri izmenenii klimata za poslednie desyatletiya [Productivity of grain crops on the territory of European Russia under climate change over the past decades], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2020, No. 1, pp. 78-94.
  13. *Dronin N., Kirilenko A.* Climate change and food stress in Russia: what if the market transforms as it did during the past century?, *Climatic Change*, 2008, Vol. 86, pp. 123-150.
  14. *Thywissen K.* Core terminology of disaster reduction. Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies []. Hong Kong: United Nations University Press. 2006, 23 p.
  15. *Kattsov V.M.* Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [Report on climate risks in the Russian Federation], ed. by V.M. Kattsov. St. Petersburg: Rosgidromet. 2017, 106 p.
  16. *Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., SHapovalov A.V., Shapovalov V.A.* Fizika oblakov i aktivnykh vozdeystviy na nikh [Physics of clouds and active influences on them]. Nal'chik: OOO «Pechatnyy dvor», 2017, 240 p.
  17. *Kini R.L., Rayfa X.* Prinyatiye resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya [Decision making under multiple criteria: preferences and substitutions]. Moscow: Radio i svyaz'. 1981, 560 p.
  18. *Takha Kh.* Vvedeniye v issledovaniye operatsiy [Introduction to operations research]. Vol. 2. Moscow: Mir, 1985, 496 p.
  19. *Balkizova A.Kh., Tashilova A.A., Pshikhacheva I.N.* Osnovnye etapy i zadachi problemy adaptatsii agrarnogo sektora k izmeneniyam klimata [The main stages and tasks of the problem of adaptation of the agricultural sector to climate change], *Mater. Mezhdunarodnogo simpoziuma «Ustoychivoye razvitiye: problemy, kontseptsii, modeli»* [Proceedings of the International Symposium "Sustainable Development: Problems, Concepts, Models"]. Vol. 1. Nal'chik: KBNTS RAN, 2013, pp. 106-109.

20. *Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Shapovalov A.V., Khavtsukov A.Kh. and Balkarova S.B. Modeling Risk Reduction in Agriculture Associated with Dangerous Agrometeorological Phenomena, International scientific and practical conference "AgroSMART – Smart solutions for agriculture", KnE Life Sciences. 2019, pp. 223-231.*
21. Available at: [https://stavstat.gks.ru/ofstatistics\\_kbr](https://stavstat.gks.ru/ofstatistics_kbr) (accessed: 06 February 2023).
22. *Tlisov M.I., Taumurzaev A.Kh., Fedchenko L.M., Khuchunaev B.M. Kineticheskie kharakteristiki grada i povrezhdaemost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Kinetic characteristics of hail and damage to agricultural crops], Tr. Vsesoyuznogo Seminara «Aktivnye vozdeystviya na gradovye protsessy i usovershenstvovanie l'doobrazuyushchikh reagentov dlya praktiki aktivnykh vozdeystviy» [Proceedings of the All-Union Seminar "Active impacts on hail processes and improvement of ice-forming reagents for the practice of active impacts"]. Nal'chik. 1991, pp. 75-77.*
23. *Tlisov M.I., Taumurzaev A.Kh., Fedchenko L.M., Khuchunaev B.M. Fizicheskie kharakteristiki grada i povrezhdaemost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Physical characteristics of hail and crop damage], Tr. Vysokogornogo geofizicheskogo institute [Proceedings of the High Mountain Geophysical Institute]. Issue 74. Moscow: Gidrometeoizdat. 1987, pp. 37-144.*

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

**Ашабоков Борис Азреталиевич** – Высокотгорный геофизический институт; e-mail: ashabokov.boris@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 88662404841; д.ф.-м.н.; профессор; зав. отделом физики облаков; зав. отделом в «ИИПРУ КБНЦ РАН».

**Федченко Людмила Михайловна** – e-mail: fedchenkolm@mail.ru; тел.: .88662720780; д.г.н.; профессор; г.н.с.

**Ташилова Алла Амарбиевна** – e-mail: tashilovaa@mail.ru; д.ф.-м.н.; доцент; с.н.с.

**Ашабокова Марина Борисовна** – e-mail: ashabokova.marina@rambler.ru; м.н.с.

**Куповых Геннадий Владимирович** – Южный федеральный университет; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89289543642; д.ф.-м.н.; профессор; зав. кафедрой высшей математики.

**Ashabokov Boris Azretalievich** – High Mountain Geophysical Institute; e-mail: ashabokov.boris@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: 88662404841; dr. of phys. and math. sc.; professor; head of the department of cloud physics.

**Fedchenko Ludmila Mikhailovna** – e-mail: fedchenkolm@mail.ru; phone: +78662720780; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

**Tashilova Alla Amarbievna** – e-mail: tashilovaa@mail.ru; phone: +79286924629; dr. of phys. and math. sc.; associate professor; senior researcher.

**Ashabokova Marina Borisovna** – e-mail: ashabokova.marina@rambler.ru; junior researcher.

**Kupovyh Gennady Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfdu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79289543642; dr. of phys. and math. sc.; professor; head of the department of higher mathematics.

## Раздел II. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 681.586

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-111-119

**С.П. Малюков, В.Д. Мишнев**

### **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СПАЯ САПФИР – СТЕКЛОВИДНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК – КЕРАМИКА**

*Высокие требования, предъявляемые к тензометрическим преобразователям давления, а именно: надёжность, качество, точность измерения, возможность работы в экстремальных условиях и устойчивость к агрессивной среде, создают сегодня ряд проблем, решение которых является объектом исследования данной статьи. Основными проблемами при достижении целевых показателей являются: высокая стоимость исходных изделий, трудоёмкость технологического процесса в серийном производстве, а также ограничения, влияющие на точность и надёжность показателей исходных устройств, в зависимости от условий эксплуатации. Для решения данных проблем и улучшения физико-механических показателей чувствительных элементов датчиков давления в статье рассмотрены следующие задачи: разработка конструкции тензочувствительного элемента на основе структуры «кремний на сапфире» (КНС), исследование способа его соединения с керамическим корпусным элементом и отработка технологического маршрута изготовления структуры спая сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика. Датчик давления, выполненный на основе структуры КНС обладает высокой чувствительностью, стабильностью, практически не имеет механического гистерезиса и может работать в широком диапазоне температур от  $-60$  до  $+350^{\circ}\text{C}$  при воздействии радиации. В свою очередь, использование керамического основания позволяет уменьшить температурную погрешность датчика ввиду лучшего согласования коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) керамики ( $85-100 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ) и сапфировой подложки ( $60-75 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ), а также уменьшить стоимость технологического процесса из-за использования керамики вместо дорогостоящих титановых сплавов и сложной металлообработки. Таким образом, структура «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика» показывает возможность повышения чувствительности датчика и снижения погрешности при расширении его функциональных возможностей, упрощении конструкции и повышении технологичности изготовления.*

*Датчик давления; тензочувствительный элемент; кремний на сапфире; спаивание; керамика.*

**S.P. Malyukov, V.D. Mishnev**

### **MANUFACTURING TECHNOLOGY OF PRESSURE SENSOR'S SENSITIVE ELEMENTS BASED ON "SAPPHIRE – VITEROUS DIELECTRIC – CERAMIC" JUNCTION**

*Today pressure transmitters have high requirements such as reliability, quality, measurement accuracy, the ability to work in extreme conditions and resistance to aggressive environments. The main problems in achieving these target indicators are: the high cost of the original products, the laboriousness of the technological process in serial production, and the limitations that affect the accuracy of the indicators of the original devices. Solving these problems is the subject of this article. To solve these problems and improve the physical and mechanical properties of pressure sensor's sensitive elements, the following tasks are considered in the article: development of a pressure-sensing element design based on the silicon-on-sapphire (SOS) structure,*

*research on the method of its connection with a ceramic body element and development of a technological route for manufacturing the structure based on "sapphire – vitreous dielectric – ceramic" junction. As a result, the pressure sensor based on the SOS structure has high sensitivity, stability, practically no mechanical hysteresis, and can operate in a wide temperature range from -60 to +350°C when exposed to radiation. In turn, the use of a ceramic base makes it possible to reduce the temperature error of the sensor due to better matching of the coefficient of linear thermal expansion (CLTE) of ceramic ( $85-100 \times 10^{-7} K^{-1}$ ) and sapphire substrate ( $60-75 \times 10^{-7} K^{-1}$ ), as well as reduce the cost of the technological process due to the use of ceramics instead of expensive titanium alloys and complex metalworking. Thus, the structure "sapphire – vitreous dielectric – ceramic" shows the possibility of increasing the sensitivity of the sensor and reducing the error while expanding its functionality, simplifying the design and improving manufacturability.*

*Pressure sensor; pressure-sensing element; silicon on sapphire; thermal soldering; ceramics.*

**Введение.** Необходимость точного измерения давления жидкостей и газов в различных условиях представляет сложную и наукоёмкую задачу. На сегодняшний день одними из основных направлений научных исследований в области развития полупроводникового приборостроения тонкоплёночных тензорезисторных датчиков давления (ТТДД) можно выделить: оптимизацию технологического процесса производства полупроводниковых ТТДД; исследование напряжённо-деформированного состояния упругих элементов ТТДД; поиск новых методов уменьшения погрешности измерений [1].

Исследования различных типов структур тензочувствительных элементов (ТЧЭ) датчиков давления [1–8] показывают, что одним из наиболее перспективных материалов подложек в процессе формирования чувствительной мембраны является сапфир. Датчики давления, структурой ТЧЭ которых является кремний на сапфире (КНС), обладают рядом уникальных преимуществ: высокая температура эксплуатации, до 300–350°C; быстроедействие приборов, обусловленное отсутствием токов утечки через подложку; стойкость к агрессивным средам и радиации.

**1. Задачи исследования.** Для реализации тензочувствительных элементов (ТЧЭ) датчика давления на основе структуры «кремний на сапфире» (КНС) одними из основных задач являются: создание качественной кремниевой мостовой схемы (формирование тензорезисторов) на подложке из сапфира, формирование точной чувствительной мембраны из сапфировой подложки и проработка соединения ТЧЭ с корпусным изделием.

**2. Основные этапы и подготовка к исследованию.** Изготовление полупроводникового тонкоплёночного тензорезисторного датчика давления (ТТДД) осуществляется следующим способом. Полупроводниковый чувствительный элемент выполняется на основе структуры «кремний на сапфире» (КНС). Пластины сапфира с ориентацией (1 $\bar{1}$ 02), служащие подложками для изготовления чувствительного элемента, перед осаждением слоев кремния отжигаются при температуре 1400°C в течение 60 минут, что позволяет удалить с поверхности сапфира углеродные и кислородные загрязнения и обеспечить высокое качество структуры приповерхностной области слоя Si. Далее осаждается слой поликристаллического кремния методом высокочастотного распыления [9–15] с последующим проведением фотолитографии для формирования тензорезисторов. Травление слоев поликристаллического кремния методом избирательного анизотропного травления необходимо для последующего формирования контактов к резисторам [16].

Электрическая схема чувствительного элемента, имеет замкнутый измерительный мост [5, 17]. Контроль температуры в схеме ведётся по величине тока, протекающего через мостовую схему. Для подгонки измерительного моста и термокомпенсации в схему введена линейка подгоночных резисторов, включённых в противоположные плечи моста и вынесенных на одну сторону кристалла. Ввиду того, что все резисторы находятся в одинаковых условиях, это не только позволяет правильно сбалансировать схему, но также исключить возможность возникнове-

ния теплового разбаланса. Зависимость чувствительности датчика давления от отношения  $L/h$  приведена на рис. 1, где  $L$  – длина и ширина мембраны датчика давления;  $h$  – толщина мембраны датчика давления.

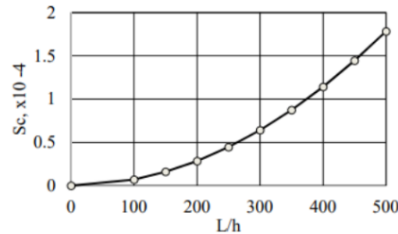


Рис. 1. Зависимость чувствительности датчика давления от отношения  $L/h$

Керамика, которая использовалась как основа при производстве датчиков давления, уменьшает температурную погрешность преобразования из-за возможности лучшего согласования коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) керамики ( $85\text{--}100 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ) и сапфировой ( $60\text{--}75 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ) подложки, позволяет уменьшить стоимость технологического процесса из-за использования керамики вместо дорогостоящих титановых сплавов и сложной металлообработки (рис. 2) [18, 19]. Исходное керамическое основание разрезается с помощью лазера (модель LIMO 100-532/1064-U) с длиной волны 1064 нм, и после резки, шлифовки и полировки подвергается очистке.

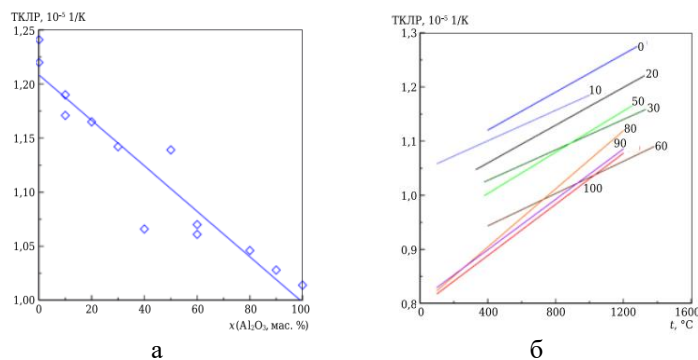


Рис. 2. а – усреднённые по температурному диапазону 300 – 1300 °С величины КЛТР (технические) керамики  $x\text{Al}_2\text{O}_3 + (100 - x)\text{ZrO}_2(Y)$ ; б – температурные зависимости истинных значений КЛТР при охлаждении образцов состава  $x\text{Al}_2\text{O}_3 + (100 - x)\text{ZrO}_2(Y)$ ; числа у линий соответствуют  $x$  – доле  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , мас. %

Полупроводниковый чувствительный элемент на основе КНС, применяя метод центрифугирования [20, 21], соединяется с основанием корпуса из керамического материала с помощью стекловидного диэлектрика системы  $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$  с коэффициентом линейного термического расширения (КЛТР), равному  $82\text{--}88 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Перед нанесением на керамическую подложку производится грануляция легкоплавкого неорганического диэлектрика системы  $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$  с удельной поверхностью  $5000 \text{ см}^2/\text{г}$  (сухой помол). Для приготовления агрегативно устойчивой рабочей суспензии в полученный порошок добавляется изобутиловый спирт, в следующем соотношении 20 гр. порошка на 25 гр. спирта. Полученный раствор помещается в вибромельницу, в яшмовый барабан с яшмовыми шарами на 48 часов. Полученная агрегативно устойчивая суспензия может использоваться для нанесения методом центрифугирования равномерно распределённой стекловидной диэлектрической плёнки на подложке [22].

На заключительном этапе в керамическом основании формируется отверстие механическим методом.

**3. Конструкция датчика и технологический маршрут.** В конструкции разработанного чувствительного элемента датчика давления контактные площадки (выполненные, например, из алюминия) вынесены из зоны измерений, при этом токоразводка до контактных площадок осуществляется в виде линий коммутации, изготавливаемых из того же материала, что и контактные площадки. На рис. 3 изображена конструкция датчика давления, разработанного в рамках структуры «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика»,

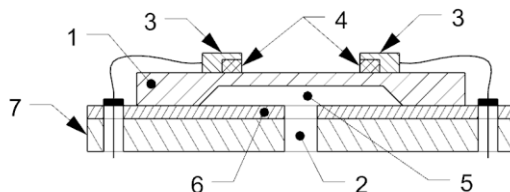


Рис. 3. Конструкция чувствительного элемента датчика давления на основе структуры КНС, размещённого на керамической подложке: 1 – сапфировая мембрана, 2 – отверстие, 3 – алюминиевые контактные площадки, 4 – поликристаллический кремний, 5 – полость, 6 – паяное соединение (стекловидный неорганический диэлектрик), 7 – керамическое основание

На рис. 4 представлен пример полного технологического маршрута создания датчика давления на основе структуры «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика».

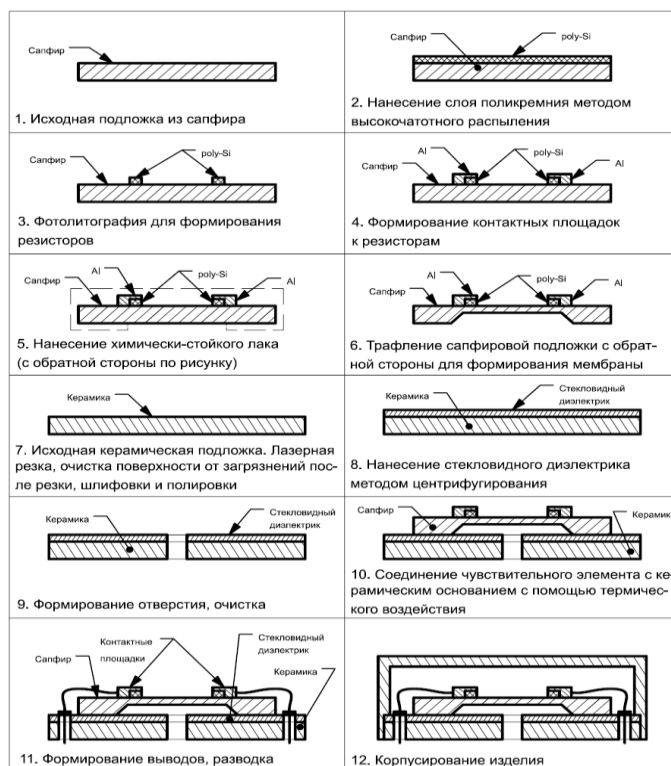


Рис. 4. Технологический маршрут создания датчика давления на основе структуры «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика»

**3.1. Формирование тензочувствительного элемента на основе структуры «кремний на сапфире» (КНС).** На сапфировую подложку диаметром ~80 мм, тщательно обработанную механической и химической полировкой, ориентированной в плоскости (1 $\bar{1}$ 02) осаждается слой поликристаллического кремния высокочастотным магнетронным распылением. Толщина нанесенного слоя составляет не более 5 мкм.

Следующим этапом проводилась фотолитография для формирования резисторов. Травление слоев поликристаллического кремния проводилась методом избирательного анизотропного травления.

Последующей операцией является формирование контактов к резисторам. Напыление алюминия и фотолитография для формирования контактной металлизации и контактных площадок необходимо для присоединения тензорезистивной схемы к внешним выводам корпуса.

Для вытравливания необходимых размеров «канавки», использовался химически стойкий лак, которым изолировался нанесенный слой кремния и сформированные контакты. Формирование сапфировой канавки осуществлялось с использованием метода химического травления. Для профилирования сапфир травился в смеси кислот H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 96% и H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 85% с использованием SiO<sub>2</sub> маски, сформированной травлением в стандартном буферном травителе. Скорость травления сапфира составляла (0,6–0,8) м/ч. Температура подложки варьировалась от 240 до 280°C.

**3.2. Термическое спаивание тензочувствительного элемента и керамической подложки.** На очищенную после резки, шлифовки и полировки керамическую подложку производилось нанесение методом центрифугирования рабочей суспензии легкоплавкого неорганического диэлектрика системы PbO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZnO в течение 3–5 минут при скорости вращения ротора на центрифуге 7000 об/мин.

Далее производилась сушка равномерно нанесенной стекловидной диэлектрической пленки в термошкафу при температуре 50–60°C в течение 3–5 мин.

После сушки осуществлялся высокотемпературный отжиг в муфельной печи при T<580°C. Для уменьшения механических напряжений была введена изотермическая выдержка продолжительностью 10 мин. при T=320°C.

Некристаллизующиеся стекловидные плёнки легкоплавкого неорганического диэлектрика обладают хорошей адгезией к материалам подложек, согласованностью по коэффициенту линейно-термического расширения (КЛТР=82–88×10<sup>-7</sup> K<sup>-1</sup>) между компонентами структуры и температурами их формирования, позволяющими получить наиболее равномерное по толщине и однородности стекловидное диэлектрическое покрытие.

Формирование отверстия в структуре «стекловидный диэлектрик – керамика» производится механическим методом с дальнейшим проведением процесса очистки сформированных отверстий.

Следующим этапом сборки датчика давления является соединение чувствительного элемента с керамическим корпусом. Предварительно получив структуру «стекловидный диэлектрик – сапфир» системы PbO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZnO методом центрифугирования при скорости вращения ротора центрифуги 7000 об/мин в течение 3–5 мин. и при высокотемпературном отжиге в муфельной печи при T<560–580°C продолжительностью 5–7 мин. сапфировый чувствительный элемент соединяется с основанием корпуса из керамического материала, посредством стекловидного диэлектрика системы PbO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZnO с помощью груза (массой 200 гр.), при T<580 °C и с выдержкой 5–7 минут.

В заключении производится формирование электрических выводов к контактным площадкам тензопреобразователя давления, выводам корпуса, а также герметизация и корпусирование датчика давления.



**Заключение.** В результате, датчик давления, выполненный на основе структуры КНС обладает высокой чувствительностью и стабильностью. В свою очередь, использование керамического основания позволяет уменьшить температурную погрешность датчика ввиду лучшего согласования коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) керамики ( $85-100 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ) и сапфировой подложки ( $60-75 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ), а также уменьшить стоимость технологического процесса из-за использования керамики вместо дорогостоящих титановых сплавов и сложной металлообработки.

Таким образом, структура «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика» показывает возможность повышения чувствительности датчика и снижения погрешности при расширении его функциональных возможностей, упрощении конструкции и повышении технологичности изготовления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Скворцов П.А.* Разработка методики расчёта и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре «кремний на сапфире»: дисс. ... канд. тех. наук: 01.02.06. – М.: Московский политехнический университет, 2019.
2. *Хошев А.В.* Тензорезистивные плёнки и их применение в датчиках давления // Современная техника и технологии. – 2014. – № 10.
3. *Михайлов П.Г., Мокров Е.А., Сергеев Д.А., Скотников В.В., Петрин В.А., Чернецов М.А.* Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 204-213.
4. *Устинов А.А., Нагорнов Ю.С., Козлов А.И.* Сравнительные характеристики однослойных и двухслойных тензопреобразователей давления на основе структур кремний–на–сапфире // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2012. – № 1. – С. 66-67.
5. *Коновалов Р.С., Львов А.А.* Высокотемпературные датчики давления // Тр. международного симпозиума "Надежность и качество". – 2014. – Т. 2. – С. 48-50.
6. *Гурин С.А., Печерская Е.А., Зинченко Т.О., Фимин А.В., Николаев К.О.* Конструкции и технологические режимы формирования чувствительных элементов микроэлектронных датчиков быстропеременного и статического давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 111-118.
7. *Михайлов П.Г., Смогунов В.В., Вольников М.И.* Технологии формирования гетероструктур измерительных преобразователей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 3 (55). – С. 58-67.
8. *Шокоров В.А., Смирнов И.И.* Разработка и применение высокотемпературных датчиков давления для реактивных двигателей ракетно-космической техники // Тр. международного симпозиума "Надежность и качество". – 2018. – Т. 2. – С. 60-62.
9. *Берлин Е.В., Сейдман Л.А.* Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. – 2-е изд., испр. и доп. URSS. – 2022. – 316 с. – ISBN 978-5-9710-9680-1.
10. *Васильев В.А., Хошев А.В.* Применение магнетронного распыления для получения тонких плёнок гетерогенных структур нано- и микроэлектромеханических систем // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14, № 3. – С. 144-147.
11. *Goncharov E, Saaenko A., Malyukov S., Palii A.* Formation of ITO Thin Films by MF Magnetron Sputtering for Solar Cells Application // Processing of ITNT 2021 – 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. – 2021.
12. *Данилина Т.И., Троян П.Е., Сахаров Ю.В., Жидик Ю.С.* Ионно-плазменные методы получения наноструктур // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 40-45.
13. *Колобов Н.А., Шелегеда Е.В.* Исследование поперечной проводимости пленок поликристаллического кремния, полученных методом магнетронного распыления // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2012. – № 5. – С. 28-37.
14. *Климович И.М., Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Зайков В.А., Власукова Л.А., Осин Ю.Н., Рогов А.М., Воробьев В.В., Степанов А.Л.* Особенности формирования тонких пленок кремния, осаждаемых магнетронным распылением // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 6. – С. 35-41.

15. Волочко А.Т., Зеленин В.А., Мельник Н.Ю. Сплавы системы Cr-Ni-Si для получения резистивных элементов интегральных микросхем методом магнетронного распыления // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 35-42.
16. Величко А.А., Илюшин В.А., Филимонова Н.И., Крупин А.Ю., Кацюба А.В. Тензорезисторы на структурах "кремний на сапфире" (КНС) и Si/CaF<sub>2</sub>/Si // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2018. – № 2 (39). – С. 30-39.
17. Лапин А.П., Гайфулин Н.М., Сулейманова Л.Н., Юнусова Г.Р. Методика изучения физических эффектов, используемых для измерения давления // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 160-168.
18. Комоликов Ю.И., Кащеев И.Д., Хрустов В.Р. Термическое расширение композиционной керамики системы диоксид циркония – оксид алюминия // Новые огнеупоры. – 2016. – № 9. – С. 59-62.
19. Стучебников В.М., Устинов А.А., Нагорнов Ю.С. Исследование температурного дрейфа и нелинейностей тензопреобразователей давления на основе керамики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 2 (14). – С. 62-69.
20. Соколов В.И. Центрифугирование. – М.: Химия, 1976. – 408 с.
21. Панфилова Е.В., Гришаев Н.А. Отработка и исследование процесса получения фотоннокристаллических пленок методом центрифугирования // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 4 (112).
22. Клунникова Ю.В., Бондарчук Д.А. Формирование спая стекловидного диэлектрика и сапфира для элементов микроэлектроники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – С. 67-73.

#### REFERENCES

1. Skvortsov P.A. Razrabotka metodiki rascheta i proektirovaniya uprugogo elementa tenzodatchika na strukture «kremniy na sapfire»: diss. ... kand. tekh. Nauk [Development of a method for calculating and designing an elastic element of a strain gauge on the structure "silicon on sapphire": cand. of eng. sc. diss.]: 01.02.06. Moscow: Moskovskiy politekhnicheskii universitet, 2019.
2. Khoshev A.V. Tenzorezistivnye plenki i ikh primeneniye v datchikakh davleniya [Tensoresistive thin films and their use in pressure sensors], *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii* [Modern technics and technologies], 2014, No. 10.
3. Mikhaylov P.G., Mokrov E.A., Sergeev D.A., Skotnikov V.V., Petrin V.A., Chernetsov M.A. Chuvstvitel'nye elementy vysokotemperaturnykh datchikov davleniya. Materialy i tekhnologii izgotovleniya [Sensitive elements of high- pressure sensors. Materials and technologies izgotovleniya], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 4 (153), pp. 204-213.
4. Ustinov A.A., Nagornov Yu.S., Kozlov A.I. Sravnitel'nye kharakteristiki odnosloynnykh i dvukhsloynnykh tenzopreobrazovateley davleniya na osnove struktur kremniy-na-sapfire [Comparative characteristics of single-layer and double-layer pressure transducers based on silicon-on-sapphire structures], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki* [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki], 2012, No. 1, pp. 66-67.
5. Konovalov R.S., L'vov A.A. Vysokotemperaturnyye datchiki davleniya [High temperature pressure sensors], *Tr. mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [International Symposium "Reliability and quality"], 2014, Vol. 2, pp. 48-50.
6. Gurin S.A., Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O., Fimin A.V., Nikolaev K.O. Konstruktsii i tekhnologicheskie rezhimy formirovaniya chuvstvitel'nykh elementov mikroelektronnykh datchikov bystroperemennogo i staticheskogo davleniya [Structures and technological regimes of forming sensitive elements of microelectronic sensors of fast alternating and static pressure], *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measuring. Monitoring. Management. Control], 2019, No. 3 (29), pp. 111-118.
7. Mikhaylov P.G., Smogunov V.V., Vol'nikov M.I. Tekhnologii formirovaniya geterostruktur izmeritel'nykh preobrazovateley [Technologies for heterostructures formation of transducer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Technical sciences], 2020, No. 3 (55), pp. 58-67.

8. *Shokorov V.A., Smirnov I.I.* Razrabotka i primeneniye vysokotemperaturnykh datchikov davleniya dlya reaktivnykh dvigateley raketno-kosmicheskoy tekhniki [Development and application of high-temperature pressure sensors for jet engines of rocket and space technology], *Tr. mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [International Symposium "Reliability and quality"], 2018, Vol. 2, pp. 60-62.
9. *Berlin E.V., Seydman L.A.* Poluchenie tonkikh plenok reaktivnym magnetronnym raspyleniem [Preparation of thin films by reactive magnetron sputtering]. 2<sup>nd</sup> ed., corr. and suppl. URSS, 2022, 316 p. ISBN 978-5-9710-9680-1.
10. *Vasil'ev V.A., Khoshev A.V.* Primeneniye magnetronnogo raspyleniya dlya polucheniya tonkikh plenok geterogennykh struktur nano- i mikroelektromekhanicheskikh sistem [Application of magnetron sputtering to obtain thin films of heterogeneous structures of nano- and microelectromechanical systems], *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya* [Fundamental problems of radio-electronic instrumentation], 2014, Vol. 14, No. 3, pp. 144-147.
11. *Goncharov E., Saaenko A., Malyukov S., Palii A.* Formation of ITO Thin Films by MF Magnetron Sputtering for Solar Cells Application, *Processing of ITNT 2021 – 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*, 2021.
12. *Danilina T.I., Troyan P.E., Sakharov Yu.V., Zhidik Yu.S.* Ionno-plazmennyye metody polucheniya nanostruktur [Ion-plasma methods to obtain nanostructures], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Proceedings of TUSUR University], 2017, Vol. 20, No. 3, pp. 40-45.
13. *Kolobov N.A., Shelegeda E.V.* Issledovaniye poperechnoy provodimosti plenok polikristallicheskogo kremniya, poluchennykh metodom magnetronnogo raspyleniya [Investigation of the transverse conductivity of polycrystalline silicon films obtained by magnetron sputtering], *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* [Bulletin of the Lebedev Physics Institute], 2012, No. 5, pp. 28-37.
14. *Klimovich I.M., Romanov I.A., Komarov F.F., Zaykov V.A., Vlasukova L.A., Osin Yu.N., Rogov A.M., Vorob'ev V.V., Stepanov A.L.* Osobennosti formirovaniya tonkikh plenok kremniya, osazhdaemykh magnetronnym raspyleniem [Features of formation of thin silicon coatings deposited by magnetron sputtering], *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, Vol. 61, No. 6, pp. 35-41.
15. *Volochko A.T., Zelenin V.A., Mel'nik N.Yu.* Splavy sistemy Cr-Ni-Si dlya polucheniya rezistivnykh elementov integral'nykh mikroskhem metodom magnetronnogo raspyleniya [Alloys of the Cr-Ni-Si system for obtaining resistive elements of integrated microcircuits by magnetron sputtering], *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 35-42.
16. *Velichko A.A., Ilyushin V.A., Filimonova N.I., Krupin A.Yu., Katsyuba A.V.* Tenzorezistory na strukturakh "kremniy na sapphire" (KNS) i Si/CaF<sub>2</sub>/Si [Tenzoresistors based on silicon and Si/CaF<sub>2</sub>/Si on sapphire structures], *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii* [Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences], 2018, No. 2 (39), pp. 30-39.
17. *Lapin A.P., Gayfulin N.M., Suleymanova L.N., Yunusova G.R.* Metodika izucheniya fizicheskikh effektov, ispol'zuemykh dlya izmereniya davleniya [Method of Studying Physical Effects and Phenomena in the Measurement of Pressure], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics], 2019, Vol. 19, No. 1, pp. 160-168.
18. *Komolikh Yu.I., Kashcheev I.D., Khrustov V.R.* Termicheskoe rasshirenie kompozitsionnoy keramiki sistemy dioksid tsirkoniya – oksid alyuminiya [Thermal expansion of composite ceramics of the system zirconium dioxide – aluminum oxide], *Novyye ognepory* [Novyye ognepory], 2016, No. 9, pp. 59-62.
19. *Stuchebnikov V.M., Ustinov A.A., Nagornov Yu.S.* Issledovaniye temperaturnogo dreyfa i nelineynostey tenzopreobrazovateley davleniya na osnove keramiki [Study of temperature drift and nonlinearities of pressure strain gauges based on ceramics], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki* [University proceedings. Volga region. Technical sciences], 2010, No. 2 (14), pp. 62-69.

20. Sokolov. V.I. Tsentrifugirovanie [Centrifugation]. Moscow: Khimiya, 1976, 408 p.
21. Panfilova E.V., Grishaev N.A. Otrabotka i issledovanie protsessa polucheniya fotonno-kristallicheskikh plenok metodom tsentrifugirovaniya [Development and study of the process of photonic-crystal film depositing by centrifugation], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, No. 4 (112).
22. Klunnikova Yu.V., Bondarchuk D.A. Formirovanie spaya steklovidnogo dielektrika i sapfira dlya elementov mikroelektroniki [Junction formation of glassy dielectric and sapphire for microelectronic elements], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, pp. 67-73.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

**Малюков Сергей Павлович** – Южный федеральный университет; e-mail: spmalyukov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; д.т.н.; профессор; член-корреспондент РАЕН.

**Мишнев Виктор Дмитриевич** – e-mail: mishnev@sfedu.ru; тел.: +79189529271; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; аспирант.

**Malyukov Sergey Pavlovich** – Southern Federal University; e-mail: spmalyukov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of radio engineering electronics and nanoelectronics; dr. of eng. sc.; professor.

**Mishnev Victor Dmitrievich** – e-mail: mishnev@sfedu.ru; phone: +79189529271; the department of radio engineering electronics and nanoelectronics; postgraduate student.

УДК. 621.396.66+06

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-119-128

**И.А. Алферова, Д.Д. Габриэльян, Б.Х. Кульбикаян, О.А. Сафарьян,  
Л.Н. Стажарова**

### **ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОГО ШУМА В КАНАЛЕ СВЯЗИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БИТОВОЙ ОШИБКИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ КАМ СИГНАЛОВ**

*Целью статьи является анализ совместного влияния амплитудного белого гауссовского шума (АБГШ), присутствующего в канале связи, и частотного шума (ЧШ), возникающего вследствие флуктуации частоты сигнала в канале связи, на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов. Решаемые задачи исследования: 1. Разработка математической модели обработки КАМ-сигнала с учетом совместного воздействия АБГШ и ЧШ в канале связи. 2. Численное исследование совместного влияния АБГШ и ЧШ на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ сигналов. Предложена математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между отношением сигнал/шум в канале и средним квадратическим отклонением частоты сигнала, с одной стороны, и вероятностью битовой ошибки при демодуляции КАМ-сигнала, с другой. Приведена визуализация эффектов, связанных с наличием АБГШ и ЧШ в канале на сигнальное созвездие принимаемого КАМ-сигнала. Выявлены основные закономерности, связанные с совместным воздействием АБГШ и ЧШ в канале связи, к которым относятся: - появление ЧШ в канале связи приводит к снижению уровня сигнала в канале при корреляционной обработке принимаемого сигнала и соответствующему снижению ОСШ; - снижение ОСШ вызывает дополнительно к размытию сигнального созвездия в азимутальном направлении, связанному с появлением интегральной флуктуации фазы из-за флуктуации частоты в течение импульса, увеличение размытия сигнального созвездия в радиальном направлении. На основе полученных результатов сделан вывод о необходимости более полного учета отклонений параметров сигналов в канале, обусловленных как наличием АБГШ, так и ЧШ.*

*Амплитудный белый гауссовский шум; флуктуация частоты сигнала; частотный шум; вероятность битовой ошибки.*

**I.A. Alferova, D.D Gabrielyan, B.H. Kulbikayan, O.A. Safaryan, L.N. Stazharova**  
**INFLUENCE OF FREQUENCY NOISE IN A COMMUNICATION CHANNEL**  
**ON THE PROBABILITY OF A BIT ERROR DURING TRANSMISSION**  
**OF SIGNALS**

*The purpose of the article is to analyze the combined effect of amplitude white Gaussian noise (AWGN) present in the communication channel and frequency noise (FN) resulting from fluctuations in the frequency of the signal in the communication channel on the probability of bit error when processing QAM signals. Research tasks to be solved: 1. Development of a mathematical model for processing the QAM signal, taking into account the combined effects of AWGN and FN in the communication channel. 2. Numerical study of the combined effect of AWGN and FN on the probability of bit error when processing QAM signals. A mathematical model is proposed that establishes the relationship between the signal-to-noise ratio in the channel and the mean square deviation of the signal frequency, on the one hand, and the probability of bit error during QAM signal demodulation, on the other. The visualization of the effects associated with the presence of AWGN and FN in the channel on the signal constellation of the received QAM signal is given. The main patterns associated with joint action AWGN and FN in the communication channel are: - the appearance of FN in the communication channel leads to a decrease in the signal level in the channel during the correlation processing of the received signal and a corresponding decrease in SNR; - In addition to the blurring of the signal constellation in the azimuthal direction, associated with the appearance of an integral phase fluctuation due to frequency fluctuations during the pulse, an increase in the blurring of the signal constellation in the radial direction causes a decrease in the SNR. Based on the results obtained, it is concluded that it is necessary to take into account more fully the deviations of the signal parameters in the channel due to both the presence of AWGN and FN.*

*Amplitude white Gaussian noise; signal frequency fluctuation; frequency noise; bit error probability.*

**Введение.** Необходимость обеспечения передачи все большего объема данных в системах связи определяет использование сложных сигналов, позволяющих реализовать данное требование при ограничении на используемую полосу частот. Одним из классов таких сигналов являются сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ). Теория и практика применения таких сигналов рассмотрена в большом числе работ, например, [1–20]. В указанном перечне работ можно выделить публикации, связанные как с применением таких сигналов в области радиосвязи [6–11], так и области радионавигации [12–19].

В частности, рассмотрены вопросы вероятности битовой ошибки при воздействии аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) от отношения сигнал/шум (ОСШ) при различных значениях основания кода КАМ-сигнала. В работах [5–8] анализируется совместное влияние АБГШ и фазового шума (ФШ) на вероятность битовой ошибки при передаче КАМ-сигналов. Однако ФШ при более подробном анализе следует рассматривать как проявление флуктуаций частоты несущей сигнала в канале связи. Описание флуктуаций частоты может рассматриваться как наличие частотного шума (ЧШ).

Необходимо отметить, что анализ ЧШ дает более полное представление о влиянии флуктуаций частоты, несущей на вероятность битовой ошибки при передаче КАМ-сигналов. Это связано с тем, что появление ФШ представляет собой только одно из проявлений флуктуации несущей частоты сигнала. Вторым фактором, влияющим на вероятность битовой ошибки при передаче КАМ-сигналов, является уменьшение уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки, совместное с АБГШ влияние которого было отмечено выше. Однако выполненный в [5–8] анализ учитывает только первый фактор, связанный с влиянием частотного шума на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов. Физическая интерпретация указанного вывода является достаточно простой. В

силу случайного изменения частоты в течение импульса интегральное отклонение фазы сигнала, может быть близко к нулю. Это в соответствии с результатами работы [9] не приводит к увеличению вероятности битовой ошибки. Однако, несмотря на сохранение значения фазы сигнала за длительность импульса, при корреляционной обработке будет наблюдаться уменьшение уровня выходного сигнала. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость перехода при рассмотрении процессов демодуляции КАМ-сигналов от рассмотрения ФШ к рассмотрению ЧШ.

**Математическая модель обработки КАМ-сигнала с учетом совместного воздействия АБГШ и ЧШ в канале связи.** Обработка КАМ-сигналов в современных устройствах демодуляции проводится путем выделения синфазной и квадратурной составляющих на основе корреляционной обработки принимаемого сигнала с опорными сигналами, фазы которых сдвинуты на  $\pi/2$ . Будем считать, что флуктуация частоты сигнала  $\Delta\omega(t)$ , подчиняющаяся нормальному закону распределения с дисперсией  $\sigma_\omega^2$ , обуславливает два фактора, определяющих увеличение вероятности битовой ошибки при демодуляции КАМ-сигналов:

- ◆ искажение сигнального созвездия, связанного с появлением фазового джиттера на выходе устройства корреляционной обработки;
- ◆ уменьшение уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки.

Представим, как предложено в [8] получаемые синфазную и квадратурные составляющие принимаемого сигнала на выходе устройства корреляционной обработки в виде

$$\begin{aligned} v_I &= v_I^{(0)} \cdot \cos \Delta\varphi - v_Q^{(0)} \cdot \sin \Delta\varphi + \zeta_I, \\ v_Q &= v_Q^{(0)} \cdot \cos \Delta\varphi + v_I^{(0)} \cdot \sin \Delta\varphi + \zeta_Q, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi = \int_0^T \Delta\omega(\tau) d\tau$  – фазовый джиттер, обусловленный флуктуациями частоты сигнала;  $\zeta_I$  и  $\zeta_Q$  – аддитивный белый гауссовский шум в синфазном и квадратурном каналах соответственно.

Наличие фазового джиттера приводит, как следует из соотношения (1), к повороту сигнального созвездия на угол  $\Delta\varphi$ . Это позволяет рассматривать влияние первого фактора, связанного с флуктуацией частоты, в рамках работы [8].

Вторым фактором, как отмечено выше, является уменьшение уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки, что эквивалентно снижению отношения сигнал/шум (ОСШ) в канале связи. Зависимость уменьшения уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} v_I^{(0)} &= V_I^{(0)} \cdot \int_0^T \cos \Delta\omega(\tau) d\tau, \\ v_Q^{(0)} &= V_Q^{(0)} \cdot \int_0^T \cos \Delta\omega(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V_I^{(0)}$  и  $V_Q^{(0)}$  – соответственно уровни синфазной и квадратурной составляющих сигнала в отсутствие флуктуации частоты;  $T$  – длительность импульса для передачи одного информационного символа.

С учетом приведенных в [8] соотношений выражения для вероятности битовой ошибки, учитывающие влияние обоих факторов, связанных с флуктуацией частоты, могут быть записаны в виде

$$P_{M-KAM} = J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2), \quad (3)$$

где  $\gamma$  – отношение мощности несущей сигнала к мощности шума в канале связи.

Выражение для функции  $J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2)$  имеет вид

$$J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\omega^2}} \times \int_0^{T+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(A \cdot D(\tau) \cdot \cos \Delta\varphi + B \cdot D(\tau) \cdot \sin \Delta\varphi + C \cdot D(\tau)) \exp\left[-\frac{(\Delta\omega)^2}{2\sigma_\omega^2}\right] d(\Delta\omega) d\tau, \quad (4)$$

где  $F(x)$  – интеграл вероятности [9]

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-t^2/2) dt. \quad (5)$$

Обоснование входящих в представление функции  $J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2)$  коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  рассмотрено в работе [8].

В ряде случаев можно считать, что в течение длительности импульса значение  $\Delta\omega(t)$  является постоянным. Это позволяет преобразовать выражение (4) к виду

$$J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2) = \frac{T}{\sqrt{2\pi\sigma_\omega^2}} \times \int_{-\infty}^{+\infty} F(A \cdot D(\tau) \cdot \cos \Delta\varphi + B \cdot D(\tau) \cdot \sin \Delta\varphi + C \cdot D(\tau)) \exp\left[-\frac{(\Delta\omega)^2}{2\sigma_\omega^2}\right] d(\Delta\omega), \quad (6)$$

Полученное представление (6) дает возможность выделить влияние обоих факторов, связанных с ЧШ, на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов.

Использование явных выражений для функций  $J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2)$  в случаях КАМ-сигналов с различным основанием  $M$  определяет следующие вероятности битовых ошибок:

- для  $M = 2$

$$P_{2-KAM} = J(1, 0, 0, \sqrt{2}\gamma \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2), \quad (7)$$

- для  $M = 4$

$$P_{4-KAM} = 0,5 \left[ J(1, -1, 0, \gamma \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2) + J(1, 1, 0, \gamma \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2) \right], \quad (8)$$

- для  $M = 16$

$$P_{16-KAM} = \frac{1}{16} \sum_m \left\{ J\left(1, m, 0, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(3, m, 0, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(1, -m, 2, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(-1, m, 2, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(3, m, -2, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(3, m, 2, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) \right\}, \quad (9)$$

где индекс  $m$  принимает значения  $-3, -1, 1, 3$ .

Приведенные соотношения определяют математическую модель обработки КАМ-сигнала с учетом воздействия АБГШ и ЧШ в канале связи и позволяют, с одной стороны, определить совместное влияние АБГШ и ЧШ, а с другой стороны, определить вклад каждого из факторов, связанных с ЧШ, на вероятность битовой ошибки при демодуляции КАМ-сигнала.

**Исследование совместного влияния АБГШ и ЧШ на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов.** С использованием соотношений (6)-(8) проведено численное исследование вероятности битовой ошибки в зависимости от ОСШ и дисперсии частоты в канале связи при использовании КАМ сигналов. При проведении исследований длительность импульса принималась равной  $T = 10^{-6}$  с, частота несущей  $\omega = 2\pi \cdot 10^{10}$  рад/с.

Результаты исследований соответственно приведены на рис. 1-3. В частности, на рис. 1 приведены графики, характеризующие зависимости вероятности битовой ошибки для 2-КАМ-сигнала:

- ◆ от величины среднеквадратического отклонения (СКО) частоты при различных значениях ОСШ;
- ◆ от ОСШ при различных значениях СКО частоты.

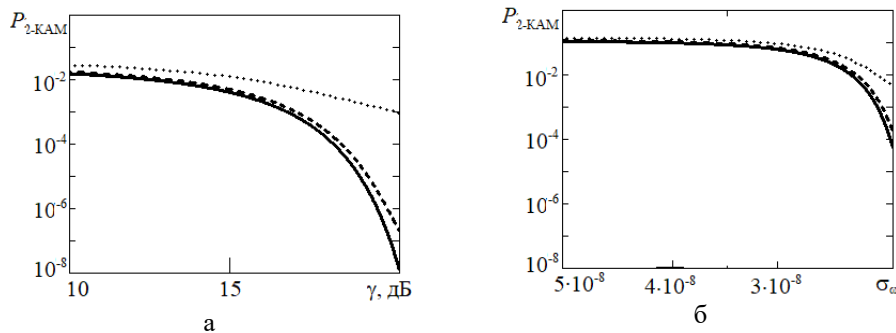


Рис. 1. Вероятность битовой ошибки для сигнала 2-КАМ: а – в зависимости от ОСШ при постоянном значении СКО частоты  $\sigma_{\omega} = 10^{-10}$  (сплошная линия),  $\sigma_{\omega} = 10^{-8}$  (штриховая линия),  $\sigma_{\omega} = 5 \cdot 10^{-8}$  (точечная линия); б – в зависимости от СКО частоты при постоянном значении ОСШ  $\gamma = 20$  дБ (сплошная линия),  $\gamma = 15$  дБ (штриховая линия),  $\gamma = 10$  дБ (точечная линия)

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Появление ЧШ в канале связи может рассматриваться как эквивалентное снижение ОСШ. Сравнение сплошной и точечной кривых показывает, что в отсутствие ЧШ ( $\sigma_{\omega} = 10^{-10}$ ) для значений  $\gamma = 30$  дБ значение  $P_{2-KAM}$  составляет  $10^{-8}$ , в то время как при наличии ЧШ ( $\sigma_{\omega} = 5 \cdot 10^{-8}$ ) значение  $P_{2-KAM}$  повышается до  $10^{-3}$ . Указанное значение  $P_{2-KAM}$  соответствует  $\gamma = 23$  дБ.

2. Влияние ЧШ на  $P_{2-KAM}$ , как следует из рис. 1,а проявляется наиболее сильно при больших значениях  $\gamma$ . Так при малых значениях ОСШ значения вероятности  $P_{2-KAM}$ , соответствующие различным значениям  $\sigma_{\omega}$ , незначительно отличаются между собой. Однако по мере увеличения ОСШ и соответствующем уменьшении  $P_{2-KAM}$  влияние ЧШ возрастает.



3. Как следует из графиков, приведенных на рис. 1,б, при увеличении  $\sigma_\omega$  значение  $P_{2-KAM}$  стремится к одному значению независимо от ОСШ (левая часть графиков на рис. 1,б). Различие влияния ЧШ на вероятность  $P_{2-KAM}$  проявляется только при малых значениях  $\sigma_\omega$  (правая часть графика на рис. 1,б).

На рис. 2 приведены аналогичные зависимости для 4-KAM сигналов.

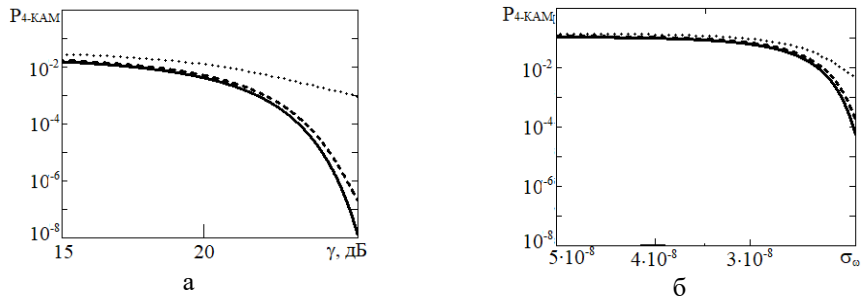


Рис. 2. Вероятность битовой ошибки для сигнала 4-KAM: а – в зависимости от ОСШ при постоянном значении СКО частоты  $\sigma_\omega = 10^{-10}$  (сплошная линия),  $\sigma_\omega = 10^{-8}$  (штриховая линия),  $\sigma_\omega = 5 \cdot 10^{-8}$  (точечная линия); б – в зависимости от СКО частоты при постоянном значении ОСШ  $\gamma = 20$  дБ (сплошная линия),  $\gamma = 15$  дБ (штриховая линия),  $\gamma = 10$  дБ (точечная линия)

Анализ приведенных на рис. 2 результатов подтверждает сделанные выше выводы.

На рис. 3 приведена визуализация эффектов, демонстрирующих изменение созвездия принимаемого 16-KAM сигнала с учетом влияния АБГШ и флуктуации частоты несущей.

Для наглядности при проведении исследований значения СКО, соответствующие АБГШ и ЧШ, принимались равными 0,01, что соответствует ОСШ  $\gamma = 20$  дБ.

Приведенные результаты трансформирования сигнальных созвездий допускают простую физическую интерпретацию. В частности, АБГШ приводит к размытию сигнального созвездия в радиальном направлении (рис. 3,б). В свою очередь, появление ЧШ приводит к размытию сигнального созвездия в азимутальном направлении (рис. 3,в).

При совместном воздействии АБГШ и ЧШ в канале связи размытие фазового созвездия происходит уже в обоих направлениях, как показано на рис. 3,г. Кроме того, как следует из приведенных зависимостей, наличие ЧШ приводит к дополнительному размытию сигнального созвездия. Последнее обусловлено как снижением ОСШ в канале связи и соответственно увеличением размытия сигнального созвездия в радиальном направлении, так и увеличением размытия в азимутальном направлении из-за интегральной флуктуации фазы, связанной с флуктуацией частоты в течение импульса.

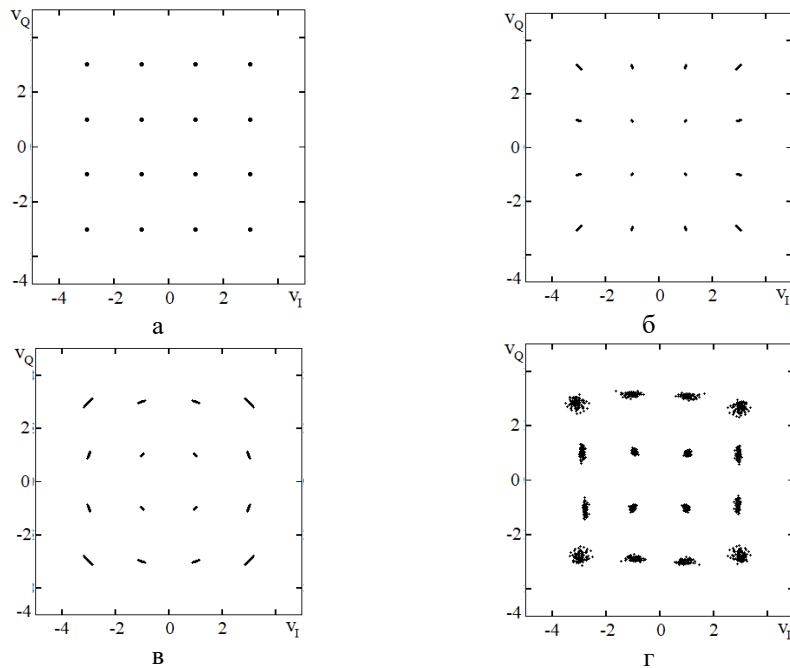


Рис. 3. Сигнальные созвездия 16-QAM сигналов: а – передаваемого сигнала; б – принимаемого сигнала при доминирующем воздействии АБГШ; в – принимаемого сигнала при доминирующем воздействии ЧШ; г – принимаемого сигнала при равных значениях СКО АБГШ и ЧШ

**Выводы.** Результаты выполненных исследований показывают, что ЧШ в канале связи обуславливает появление двух факторов, влияющих на вероятность битовой ошибки при передаче КАМ-сигналов:

- ◆ появление ЧШ в канале связи приводит к снижению уровня сигнала в канале при корреляционной обработке принимаемого сигнала и соответствующему снижению ОСШ;
- ◆ снижение ОСШ вызывает дополнительно к размытию сигнального созвездия в азимутальном направлении, связанному с появлением интегральной флуктуации фазы из-за флуктуации частоты в течение импульса, увеличение размытия сигнального созвездия в радиальном направлении.

Таким образом, можно отметить, вопросы уменьшения помех в канале связи и повышение стабильности частоты сигнала являются одинаково важными при передаче КАМ сигналов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дятлов А.П., Дятлов П.А., Кульбикаян Б.Х. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами. – М.: Радио и связь, 2004. – 226 с.
2. Дятлов А.П., Кульбикаян Б.Х. Радиомониторинг излучений спутниковых радионавигационных систем: монография. – М.: Радио и связь, 2006. – 270 с.
3. Дятлов А.П., Кульбикаян Б.Х. Корреляционная обработка широкополосных сигналов в автоматизированных комплексах радиомониторинга. – М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 332 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – Изд. дом «Вильямс», 2007. – 1104 с.

5. Габриэлян Д.Д., Кульбикаян Б.Х., Сафарьян О.А. Разработка численно-аналитического метода оценивания параметров случайных процессов // Вестник РГУПС. – 2019. – № 3 (75). – С. 151-157.
6. Hanzo L. Quadrature Amplitude Modulation: Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems. – Wiley-IEEE Press, 2004.
7. Bakulin M.G., Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B., Mironov Yu.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. Modulation for cellular 5G/IMT-2020 and 6G networks // T-Comm. – 2022. – Vol. 16, 3. – P. 11-17.
8. Wang Y.C., Milstein L.B. Rejection of multiple narrow-band interference in both BPSK and QPSK DS spread-spectrum systems // IEEE Trans. Commun. – 1988. – 36. – P. 195-204.
9. Krishnamurthy V., Logothetis A. Adaptive nonlinear filters for narrow-band interference suppression in spread-spectrum CDMA systems // IEEE Trans. Commun. – 1999. – 47. – P. 742-753.
10. Soderstrand M.A., Johnson L.G., Phillips S.R. New technique for attenuation of narrow-band interference with applications in control and communications systems // In Proceedings of the 2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 29 October–1 November 2006. – P. 1027-1031.
11. Borio D., Cano E. Optimal global navigation satellite system pulse blanking in the presence of signal quantization // IET Signal Process. – 2013. – 7. – P. 400-410.
12. Gamba M.T., Falletti E. Performance analysis of FLL schemes to track swept jammers in an adaptive notch filter // In Proceedings of the 2018 9th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands, 5–7 December 2018. – P. 1-8.
13. Gamba M.T., Falletti E. Performance comparison of FLL adaptive notch filters to counter GNSS jamming // In Proceedings of the 2019 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Nuremberg, Germany, 4–6 June 2019. – P. 1-6.
14. Kamath V., Lai Y.-C., Zhu L., Urval S. Empirical mode decomposition and blind source separation methods for anti-jamming with GPS signals // In Proceedings of the 2006 IEEE/ION Position Location, and Navigation Symposium, Coronado, CA, USA, 25–27 April 2006. – P. 335-341.
15. Fante R.L., Vaccaro J.J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2000. – 36. – P. 549-564.
16. Myrick W.L., Goldstein J.S., Zoltowski M.D. Low complexity anti-jam space-time processing for GPS // In Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221), Salt Lake City, UT, USA, 7–11 May 2001. – P. 2233-2236.
17. Musumeci L., Dosis F. Use of the wavelet transform for interference detection and mitigation in global navigation satellite systems // Int. J. Navig. Obs. – 2014. – P. 1-14.
18. Musumeci L., Dosis F. Performance assessment of wavelet based techniques in mitigating narrow-band interference // In Proceedings of the 2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Turin, Italy, 25–27 June 2013. – P. 1-6.
19. Daniele B., Pau C. Complex signum non-linearity for robust GNSS interference mitigation // IET Radar Sonar Navig. – 2018. – 12. – P. 900-909.
20. Prasad R., van Nee R. OFDM Wireless Multimedia Communications. – L: Artech House, 2000. – 275 p.
21. Прокис Дж. Цифровая связь: пер с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
22. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-КАМ системах передачи данных // Вест. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 2. – С. 81-87.

## REFERENCES

1. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Kul'bikayan B.Kh. Radioelektronnaya bor'ba so sputnikovymi radionavigatsionnymi sistemami [Electronic warfare with satellite radio navigation systems]. Moscow: Radio i svyaz', 2004, 226 p.
2. Dyatlov A.P., Kul'bikayan B.Kh. Radiomonitoring izlucheniyy sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem: monografiya [Radio monitoring of emissions from satellite radio navigation systems: monograph]. Moscow: Radio i svyaz', 2006, 270 p.

3. Dyatlov A.P., Kul'bikayan B.Kh. Korrelyatsionnaya obrabotka shirokopolosnykh signalov v avtomatizirovannykh kompleksakh radiomonirovninga [Correlation processing of broadband signals in automated radio monitoring complexes]. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom, 2013, 332 p.
4. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. Izd. dom «Vil'yams», 2007, 1104 p.
5. Gabriel'yan D.D., Kul'bikayan B.Kh., Safar'yan O.A. Razrabotka chislenno-analiticheskogo metoda otsenivaniya parametrov sluchaynykh protsessov [Development of a numerical-analytical method for estimating the parameters of random processes], *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS], 2019, No. 3 (75), pp. 151-157.
6. Hanzo L. Quadrature Amplitude Modulation: Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems. Wiley-IEEE Press, 2004.
7. Bakulin M.G., Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B., Mironov Yu.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. Modulation for cellular 5G/IMT-2020 and 6G networks, *T-Comm.*, 2022, Vol. 16, 3, pp. 11-17.
8. Wang Y.C., Milstein L.B. Rejection of multiple narrow-band interference in both BPSK and QPSK DS spread-spectrum systems, *IEEE Trans. Commun.*, 1988, 36, pp. 195-204.
9. Krishnamurthy V., Logothetis A. Adaptive nonlinear filters for narrow-band interference suppression in spread-spectrum CDMA systems, *IEEE Trans. Commun.*, 1999, 47, pp. 742-753.
10. Soderstrand M.A., Johnson L.G., Phillips S.R. New technique for attenuation of narrow-band interference with applications in control and communications systems, *In Proceedings of the 2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 29 October–1 November 2006*, pp. 1027-1031.
11. Borio D., Cano E. Optimal global navigation satellite system pulse blanking in the presence of signal quantization, *IET Signal Process.*, 2013, 7, pp. 400-410.
12. Gamba M.T., Falletti E. Performance analysis of FLL schemes to track swept jammers in an adaptive notch filter, *In Proceedings of the 2018 9th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands, 5–7 December 2018*, pp. 1-8.
13. Gamba M.T., Falletti E. Performance comparison of FLL adaptive notch filters to counter GNSS jamming, *In Proceedings of the 2019 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Nuremberg, Germany, 4–6 June 2019*, pp. 1-6.
14. Kamath V., Lai Y.-C., Zhu L., Urval S. Empirical mode decomposition and blind source separation methods for antijamming with GPS signals, *In Proceedings of the 2006 IEEE/ION Position Location, And Navigation Symposium, Coronado, CA, USA, 25–27 April 2006*, pp. 335-341.
15. Fante R.L., Vaccaro J.J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2000, 36, pp. 549-564.
16. Myrick W.L., Goldstein J.S., Zoltowski M.D. Low complexity anti-jam space-time processing for GPS, *In Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221), Salt Lake City, UT, USA, 7–11 May 2001*, pp. 2233-2236.
17. Musumeci L., Dosis F. Use of the wavelet transform for interference detection and mitigation in global navigation satellite systems, *Int. J. Navig. Obs.*, 2014, pp. 1-14.
18. Musumeci L., Dosis F. Performance assessment of wavelet based techniques in mitigating narrow-band interference, *In Proceedings of the 2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Turin, Italy, 25–27 June 2013*, pp. 1-6.
19. Daniele B., Pau C. Complex signum non-linearity for robust GNSS interference mitigation, *IET Radar Sonar Navig.*, 2018, 12, pp. 900-909.
20. Prasad R., van Nee R. OFDM Wireless Multime-dia Communications. L: Artech House, 2000, 275 p.
21. Prokis Dzh. Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]: transl. from engl., ed. by D.D. Klovsogo. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p.
22. Artemenko A.A., Mal'tsev A.A., Rubtsov A.E. Vliyanie netochnosti otsenivaniya fazy nesushchey na veroyatnost' bitovykh oshibok v M-KAM sistemakh peredachi dannykh [Effect of Carrier Phase Estimation Inaccuracy on Bit Error Probability in M-QAM Data Communication Systems], *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky], 2007, No. 2, pp. 81-87.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.М. Бородинский.

**Алферова Ирина Александровна** – Донской государственный технический университет; e-mail: ia.alferova.donstu@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра кибербезопасности информационных систем; ст. преподаватель.

**Сафарьян Ольга Александровна** – e-mail: safari\_2006@mail.ru; кафедра кибербезопасности информационных систем; к.т.н.; доцент.

**Габриэлян Дмитрий Давидович** – Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи; e-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиоэлектроники; д.т.н.; профессор.

**Кульбикаян Баграт Хачересович** – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: bagrat@rgups.ru; Ростов-на-Дону, Россия; кафедра связи на железнодорожном транспорте; к.ф.-м.н.; доцент.

**Стажарова Любовь Николаевна** – e-mail: sln.67@mail.ru; кафедра автоматике и телемеханики на железнодорожном транспорте; к.ф.-м.н.; доцент.

**Alferova Irina Alexandrovna** – Don State Technical University; e-mail: ia.alferova.donstu@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of cybersecurity of information systems; senior lecturer.

**Safaryan Olga Alexandrovna** – e-mail: safari\_2006@mail.ru; the department of cybersecurity of information systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Gabrielyan Dmitry Davidovich** – Rostov Scientific Institute of Radio Communication; e-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio electronics; dr. of eng. sc.; professor.

**Kulbikayan Bagrat Hacheresoviche** – Rostov State Transport University; e-mail: bagrat@rgups.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of communication on railway transport; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

**Stazharova Lyubov Nikolaevna** – e-mail: sln.67@mail.ru; the department of communication on railway transport; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 621.382.3

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-128-137

**П.Г. Грицаенко****ИНЖЕКЦИОННО-ПОЛЕВАЯ СТРУКТУРА, ВЫПОЛНЕННАЯ ДВОЙНОЙ ДИФфуЗИЕЙ ПРИМЕСЕЙ**

*В 80-е годы прошлого столетия в качестве элементной базы широко применялась интегральная инжекционная логика (И<sup>2</sup>Л). Несколько позднее в развитие И<sup>2</sup>Л для построения СБИС появилась инжекционно-полевая логика (ИПЛ). Оба элементных базиса близки по степени интеграции на кристалле. Увеличения степени интеграции в СБИС можно достигнуть с использованием самосовмещения областей, при котором введение примесей разного типа осуществляется с использованием одной границы маскирующего материала. В данной работе этот принцип используется для создания вертикального канала ключевого полевого транзистора ИПЛ-логики. В эпитаксиальной пленке р-типа, нанесенной на подложку n<sup>+</sup>-типа, последовательно создаются сначала область n-типа с глубиной большей толщины эпитаксиальной пленки, а затем в то же окно выполняется диффузия примеси с созданием области р-типа. Промежуток между этими областями n-типа является каналом формируемого полевого транзистора. Далее создается мелкая область n<sup>+</sup>-типа, перекрывающая канал, которая является областью стока ключевого полевого транзистора с вертикальным каналом, диффузионная область р-типа является затвором, а однородно легированная область эпитаксиальной пленки выполняет функцию инжектора. Разветвление по выходу в данной*

*ИПЛ-структуре обеспечивается путем размещения нескольких стоков по периметру канала. Благодаря такой геометрии, структура обладает большей воспроизводимостью параметров по сравнению с основной конструкцией ИПЛ. Рассмотрены топологические варианты выполнения ИПЛ-ячейки и схем на ее основе: схемы 6 ИЛИ-НЕ и  $D_T$ -триггера. Предлагаемый конструктивно-технологический вариант ИПЛ-ячейки может быть рекомендован для создания СБИС высокой степени интеграции.*

*Инжекционно-полевая логика; профиль распределения примеси; самосовмещение областей; воспроизводимость; плотность компоновки.*

**P.G. Gritsaenko**

### **INJECTION-FIELD STRUCTURE MADE BY DOUBLE DIFFUSION OF IMPURITIES**

*In the 80s of the last century, integrated injection logic ( $I^2L$ ) was widely used as an element base. Somewhat later, in the development of  $I^2L$ , injection-field logic (IPL) appeared for the construction of VLSI. Both element bases are close in the degree of integration on a chip. An increase in the degree of integration into VLSI can be achieved using self-displacement of regions, in which the introduction of impurities of different types is carried out using a single boundary of the masking material. In this paper, this principle is used to create a vertical channel of a key field-effect transistor of IPL logic. In a p-type epitaxial film deposited on an  $n^+$ -type substrate, an n-type region with a depth greater than the thickness of the epitaxial film is sequentially created first, and then impurity diffusion is performed in the same window with the creation of a region p-type. The gap between these n-type regions is the channel of the field-effect transistor being formed. Next, a shallow  $n^+$ -type region is created that overlaps the channel, which is the drain region of a key field-effect transistor with a vertical channel, the p-type diffusion region is a gate, and the uniformly alloyed region of the epitaxial film performs the function of an injector. Branching along the outlet in this IPL structure is provided by placing several drains along the perimeter of the channel. Due to this geometry, the structure has a greater reproducibility of parameters compared to the basic design of the IPL. Topological variants of the implementation of the IPL cell and schemes based on it are considered: schemes 6 OR-NOT and  $D_T$ -trigger. The proposed design and technological version of the IPL cell can be recommended for creating VLSI of a high degree of integration.*

*Injection-field logic; impurity distribution profile; the very combination of areas; reproducibility; layout density.*

**Введение.** Инжекционно-полевая логика (ИПЛ) [1–8] наряду с интегральной инжекционной логикой ( $I^2L$ ) [9–13] имела широкое распространение для изготовления БИС и СБИС в 80-е годы прошлого столетия. Работы в данном направлении последнее время не проводились, тем не менее они могут представлять определенный интерес. В [6] автором предложена конструкция ИПЛ-структуры, выполненная с использованием технологии самосовмещения областей, сравнимая с КМОП-базисом по быстродействию, и превосходящая его по степени интеграции и выходу годных. В [13] показано, что инжекционные структуры могут иметь очень низкий, порядка нескольких пиковатт, уровень энергопотребления, что является преимуществом по сравнению с КМОП.

В типовой ИПЛ-структуре область стока «вписывается» в область затвора, что обуславливает значительные габариты структуры и наличие большой паразитной емкости из-за перекрытия данных областей.

**Постановка задачи.** Вариант оригинальной конструкции ИПЛ-структуры, позволяющей уменьшить перекрытие областей стока и затвора и, кроме того, обладающей повышенной воспроизводимостью параметров, плотностью компоновки и функциональной гибкостью, предложен автором, в [14]. Разрез данной структуры и ее топология приведены на рис. 1.

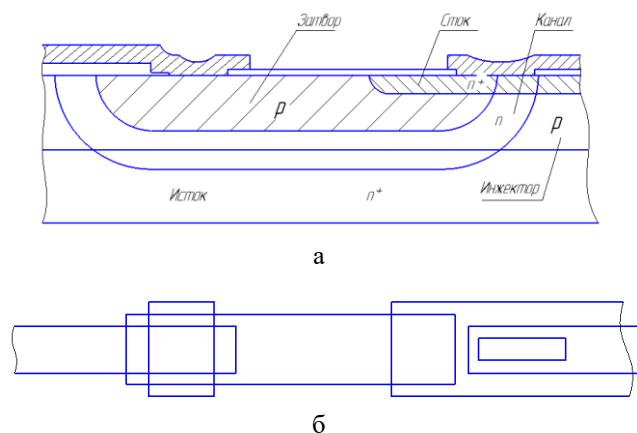


Рис. 1. Инжекционно-полевая структура, выполненная двойной диффузией примесей: а – разрез; б – топология

**Формулировка задачи.** В предлагаемой конструкции канал  $n$ -типа полевого транзистора заключен между двумя диффузионными областями, выполненными в одно окно. Боковая сторона  $p$ - $n$ -перехода, образованного диффузионной  $n$ -областью и эпитаксиальной пленкой, представляет собой инжектор. Диффузионная область  $p$ -типа выполняет роль затвора, мелкая диффузионная область  $n^+$ -типа служит стоком.

Уменьшение размеров данной структуры, в дальнейшем называемой двухдиффузионной, достигается, благодаря тому, что сток не должен вписываться в область затвора. Кроме того, в связи с исключением влияния разброса размеров «островка», формирующего канал в типовой ИПЛ-структуре, увеличивается воспроизводимость при изготовлении.

**Техпроцесс изготовления.** Последовательность операций при изготовлении двухдиффузионной ИПЛ-структуры является типовой [15–20] и представлена на рис. 2. При изготовлении используется свойство селективности травителей по отношению к нитриду и окислу кремния. После первой фотогравировки и вскрытия окон в  $Si_3N_4$  формируются области  $n$ -типа. Закрываются фоторезистом области формирования промежутков между затворами, формируемыми в одном общем кармане  $n$ -типа, выполняется ионная имплантация бора. Выполняется снятие фоторезиста и разгонка бора с окислением. При фотолитографии для формирования областей стока применяется травитель, действующий только на  $Si_3N_4$ . После ионной имплантации фосфора выполняется окисление. Выполняется фотолитография окон под контакты травителем, действующим только на  $SiO_2$ , при этом окна на фотошаблоне выполнены большими, перекрывающими ранее изготовленные окна для проведения двойной диффузии.

При этом размер ИПЛ-структуры равен минимальной ширине линий при фотолитографии для данного уровня технологии.

Ввиду того, что размер канала в данной ИПЛ-структуре определяется медленными и хорошо управляемыми процессами диффузии и не зависит от точности выполнения размеров и совмещения слоев при фотолитографии, структура обладает большей воспроизводимостью параметров по сравнению с основной конструкцией ИПЛ.

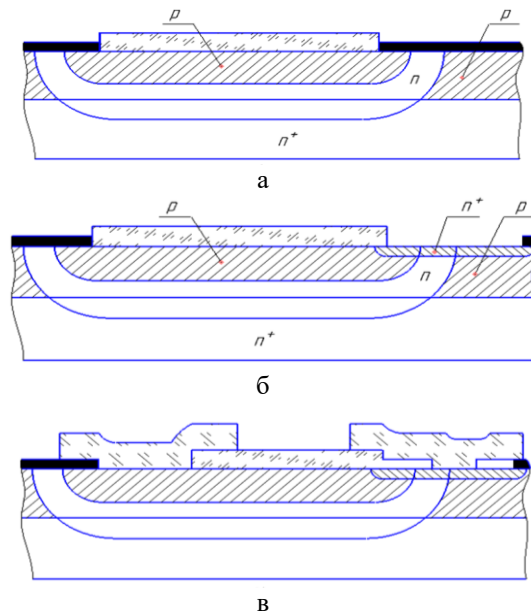


Рис. 2. Техпроцесс, изготовления двухдиффузионной ИПЛ-структуры:  
 а – фотогравировка, травление нитрида, диффузия фосфора, диффузия бора, окисление; б – фотогравировка, травление нитрида, диффузия фосфора, окисление; в – фотогравировка, травление окисла, напыление металла, фотогравировка, формирование межсоединений

**Применение в СБИС.** Разветвление по выходу в данной ИПЛ-структуре обеспечивается путем размещения нескольких стоков по периметру затвора.

Особенностью полевого транзистора данной ИПЛ-структуры является то, что один из объемных зарядов, перекрывающих канал, прилегает к постоянно находящемуся под прямым смещением инжекторному переходу и имеет, вследствие этого, небольшую толщину. При нулевом напряжении на затворе (диффузионная область  $p$ -типа) канал перекрывается его объемным зарядом и частью объемного заряда  $p$ -области (инжектора), сосредоточенной в канале.

Для уменьшения паразитной емкости затвор-исток желательно, чтобы область затвора  $p$ -типа не перекрывалась с высоколегированной подложкой  $n^+$ -типа.

При конструировании ИС на основе двухдиффузионной ИПЛ-структуры возможно совмещение границ рядом расположенных структур и совмещение нескольких стоковых областей в одну при условии, что совмещаемые структуры образуют схемы И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Пример реализации трехходовой схемы ИЛИ-НЕ представлен на рис. 3. Как видно, в данном случае функции затворов и одновременно входов логической схемы выполняют и диффузионная область  $p$ -типа и части эпитаксиальной пленки, отсеченные со всех сторон диффузионной областью  $n$ -типа. Технология изготовления такой микросхемы имеет некоторые особенности.

После первой фотогравировки закрытыми нитридом остаются области затвора 1 и затвора 3. Производится диффузия фосфора без окисления с образованием области  $n$ -типа. Выполняется следующая фотогравировка, в результате которой на поверхности остаются узкие полоски фоторезиста (показаны на рис. 3 двойной штриховкой). Их задачей является защитить неокисленную часть микросхемы от проводимой затем ионной имплантации и сформировать промежуток между затвором 2 и инжектором. Далее осуществляется разгонка бора в окислительной среде, причем



расстояние между фронтами диффузии областей  $p$  и  $n$ -типа должно быть несколько больше, чем в обычном варианте двухдиффузионной структуры (см. рис. 1), так как канал должен быть нормально перекрыт при нулевых напряжениях на обеих образующих его  $p$ -областях затворов (в структуре рис. 1,  $p$ - $n$ -переход, образованный эпитаксиальной пленкой и  $n$ -областью, постоянно находится под прямым смещением, являясь инжектором, и его объемный заряд минимален).

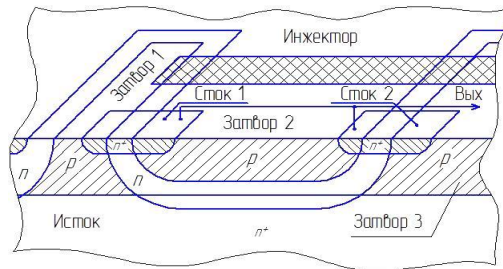


Рис. 3. Логическое устройство 3 ИЛИ-НЕ

При условии, что напряжение на всех трех затворах равно нулю, пространство под обоими стоками перекрыто объемным зарядом, и ток в выходной цепи не протекает. На выходе при этом сформирован высокий уровень потенциала.

При наличии прямого смещения хотя бы на одном из затворов объемный заряд, создаваемый его  $p$ - $n$ -переходом, сужается и под ним образуется квазинейтральная область, проводящая основные носители. В выходной цепи появляется ток, и потенциал выходной шины снижается до нуля.

Применение данного метода функциональной интеграции областей на основе двухдиффузионной структуры позволяет реализовать схемы ИЛИ-НЕ практически с любым числом входов. Пример возможного варианта конструкции многовходовой схемы ИЛИ-НЕ приведен на рис. 4. Каждая многовходовая схема ИЛИ-НЕ представляется в виде ряда прямоугольников, количество которых равно числу входов данной схемы. Светлые прямоугольники соответствуют  $p$ -областям затворов, а перекрывающие их затемненные прямоугольники –  $n^+$ -областям стоков. Области фоторезиста, показанными двойной штриховкой, ограничиваются размеры структур по вертикали. При компоновке следует учитывать, что однородно легированные  $p$ -области должны чередоваться с диффузионными  $p$ -областями.

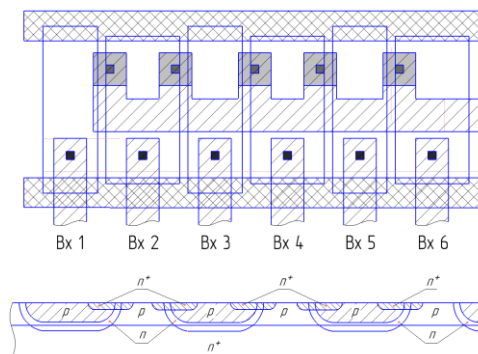


Рис. 4. Вариант конструкции многовходовой схемы ИЛИ-НЕ

Иллюстрацией конструирования более сложных схем с применением нового метода является разработка топологии  $D_T$ -триггера, функциональная схема которого приведена на рис. 5. На рис. 6 приведен упрощенный эскиз топологии триггера.



определяются размерами областей толстого окисла, расположенного над ними, а размеры диффузионных  $p$ -областей – областями толстого окисла и перемычками из фоторезиста, перекрывающего их; в случае если число  $p$ -областей в ряду нечетное, то ряд начинается и заканчивается однородно легированной областью, если четное, то для ограничения замыкающей диффузионной области применяется полоска из фоторезиста, окружающая область с трех сторон.

Пример возможного распределения примесей в различных областях структуры для исходной концентрации примеси  $N_{\text{эл}} = 7,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  приведен на рис. 7.

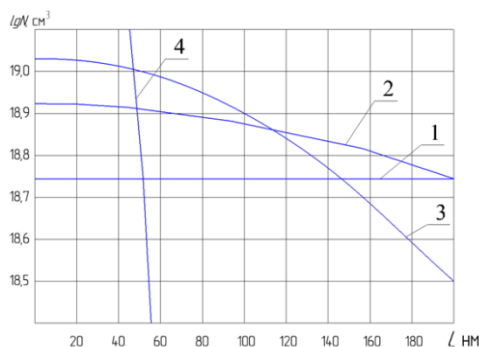


Рис. 7. Распределение примесей в областях двухдиффузионной структуры:  
1 – в эпитаксиальной пленке; 2 – в диффузионной области  $n$ -типа;  
3 – в диффузионной области  $p$ -типа; 4 – в области стока

**Заключение.** В работе рассмотрен оригинальный вариант выполнения ИПЛ-структуры, называемой двухдиффузионной, обладающей повышенной воспроизводимостью параметров, плотностью компоновки и функциональной гибкостью. Уменьшение габаритов структуры обеспечивается за счет самосовмещения областей: диффузия примесей  $p$  и  $n$ -типа, формирующих канал, выполняются в одно окно в окисле, при этом размер маски для этих областей больше этого окна.

Приведен техпроцесс изготовления СБИС на основе предлагаемой двухдиффузионной структуры, обеспечивающий ее минимальные размеры по сравнению с типовой ИПЛ-структурой за счет применения технологии самосовмещения. При этом размер ИПЛ-структуры равен минимальной ширине линий при фотолитографии для данного уровня технологии.

Приведены варианты топологии многоходовых схем ИЛИ-НЕ и Dt-триггера на основе двухдиффузионной структуры, приведена методика конструирования логических ИС с использованием данной структуры, основанная на самосовмещении областей, иллюстрирующая функциональную гибкость за счет различных вариантов объединения областей. Показано, что применение данной структуры и методики конструирования на ее основе позволит существенно сократить габариты СБИС.

Описана технология изготовления двухдиффузионной структуры, и приведено распределение примесей в различных областях структуры, обеспечивающее ее характеристики.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов Л.И. О коэффициенте усиления полевого транзистора со смещением затвора в прямом направлении // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20, № 6. – С. 1323-1325.
2. Грицаенко П.Г. Конструктивно-технологический вариант для СБИС на основе инжекционно-полевой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5 (207). – С. 175-183.

3. *Баталов Б.В., Кремлев В.Я., Дьяконов В.М.* Моделирование работы полевого транзистора как элемента инжекционно-полевой логики // *Микроэлектроника*. – 1979. – Т. 8. – Вып. 1. – С. 34-43.
4. *Дьяконов В.М., Кремлев В.Я.* Моделирование элементов инжекционно-полевых логических микросхем // *Электронная промышленность*. – 1979. – Вып. 4 (76). – С. 286-288.
5. *Кремлев В.Я.* Статические характеристики элементов СБИС инжекционно-полевой логики // Сб. «Технология, проектирование и надежность интегральных полупроводниковых схем». – М.: МИЭТ, 1988. – С. 122.
6. *Гарицын А.Г., Грицаенко П.Г., Левин А.Ю., Тарасов А.О.* Полевой транзистор с самосмещенным вертикальным каналом // *Электронная техника. Серия 2 «Полупроводниковые приборы»*. – 1981. – Вып. 6 (148).
7. *Грицаенко П.Г., Кремлев В.Я., Гадков С.М.* Исследование статических параметров ИПП-инвертора. Деп. в межведомств. рефер. // Сб. «Техника, технология и экономика». Серия ЭР. – № 27. – Таганрог, 1981. – 5 с.
8. *Кремлев В.Я., Грицаенко П.Г.* Достижение пиковаттной мощности в инжекционно-полевой логике // *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. – 1981. – Т. XXIV, № 8. – С. 96-97.
9. *Аваев Н.А., Дулин В.Н., Наумов Ю.Е.* Большие интегральные схемы с инжекционным питанием. – М.: Сов.радио, 1977. – 248 с.
10. *Баринев В.В., Кремлев В.Я., Мошкин В.И., Орликовский А.А.* Интегральные схемы с инжекционным питанием // *Зарубежная электронная техника*. – 1973. – № 19. – С. 3.
11. *Шагурин И.И., Петросянец К.О.* Проектирование цифровых микросхем на элементах инжекционной логики. – М.: Радио и связь, 1984. – 231 с.
12. *Кремлев В.Я., Мошкин В.И.* Функционально-интегрированные элементы БИС // *Электронная промышленность*. – 1976. – № 5. – С. 50-61.
13. *Кремлев В.Я., Грицаенко П.Г.* Исследование структуры на взаимодополняющих биполярных транзисторах // *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. – 1988. – № 3.
14. Инжекционно-полевая структура для логических интегральных схем: Авт. свидетельство № 764567 (СССР). – Оpubл. в Бюлл. № 34, 1980.
15. *Маковийчук М.И., Паршин Е.О., Рекинский В.А.* Физические основы технологии КНИ-структур, формируемых методом ионно-лучевого синтеза // *Известия вузов. Электроника*. – 1998. – № 5. – С. 10-16.
16. *Пирс К., Адамс А., Кац Л., Цай Дж., Сейдел Т., Макгиллис Д.* Технология СБИС: В 2-х книгах / под ред. С.Зи. Перевод с английского. – М.: Мир: Редакция литературы по новой технике, 1986.
17. *Рудаков В.И., Денисенко Ю.И., Мочалов Б.В.* Низкотемпературный отжиг SIMOX-структур в неоднородном температурном поле // *Микроэлектроника*. – 2000. – Т. 29, № 5. – С. 367-373.
18. *Кривилевич С.А., Маковийчук М.И., Паршин Е.О.* Ионный синтез структур кремний-на изоляторе. Современное состояние, новые подходы и перспективы // *Микроэлектроника*. – 1999. – Т. 28, № 5. – С. 363-369.
19. *Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А.* Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных схем / под общей ред. чл.-корр. РАН проф. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. – 400 с.
20. *Светличный А.М., Наумченко А.С., Светличная Л.А., Житяев И.Л.* «Методы изоляции элементов микро- и наноструктур»: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 56 с.

#### REFERENCES

1. *Baranov L.I.* O koeffitsente usileniya polevogo tranzistora so smeshcheniem zatvora v pryamom napravlenii [On the gain factor of the field transistor with forward shift of the gate], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1975. – Vol. 20. – No. 6. – P. 1323-1325.
2. *Gritsaenko P.G.* Konstruktivno-tekhnologicheskii variant dlya SBIS na osnove inzhekcionno-polevoy logiki [Constructive and technological variant for VLSI based on injection-field logic], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5 (207), pp. 175-183.

3. *Batalov B.V., Kremlev V.J., D'yakonov V.M.* Modelirovanie raboty polevogo tranzistora kak elementa inzhektionsionno-polevoy logiki [Simulation of field transistor operation as an element of injection-field logic], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 1979, Vol. 8, Issue 1, pp. 4-43.
4. *D'yakonov V.M., Kremlev V.J.* Modelirovanie elementov inzhektionsionno-polevykh logicheskikh mikroskhem [Modeling of Elements of Injection Field Logic Chips], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic Industry], 1979, Issue 4 (76), pp. 286-288.
5. *Kremlev V.Y.* Sticheskie kharakteristiki elementov SBIS inzhektionsionno-polevoy logiki [Static characteristics of VLSI elements of injection-field logic], *Sb. «Tekhnologiya, proektirovanie i nadezhnost' integral'nykh poluprovodnikovyykh skhem»* [Coll. «Technology, design and reliability of integrated semiconductor circuits»]. Moscow: MIET, 1988, 122 p.
6. *Garitsyn A.G., Gritsaenko P.G., Levin A.Yu., Tarasov A.O.* Polevoy tranzistor s samosovmeshchennym vertikal'nym kanalom [Field-effect transistor with self-displaced vertical channel], *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2 "Poluprovodnikovye pribory"* [Electron Technics. Series 2 "Semiconductor devices"], 1981, Vol. 6 (148).
7. *Gritsaenko P.G., Kremlev V.J., Gadkov S.M.* Issledovanie staticheskikh parametrov IPL-invertora [Study of static parameters of IPL inverter], Deposited in the interagency abstract collection Technique, «Technology and Economics». Series ER, No. 27. Taganrog, 1981, 5 p.
8. *Kremlev V.Ya. Gritsaenko P.G.* Dostizhenie pikovattnoy moshchnosti v inzhektionsionno-polevoy logike [Achievement of peak power in injection-field logic], *Izvestiya VUZov. Radioelektronika* [News of Higher Educational USSR. Radioelectronics], 1981, Vol. XXIV, No. 8, pp. 96-97.
9. *Avayev N.A., Dulin V.N., Naumov Yu.E.* Bol'shie integral'nye skhemy s inzhektionsionnym pitaniem [Large injection-powered integrated circuits]. Moscow: Sov. radio, 1977, 248 p.
10. *Barinov V.V., Kremlev V.Ya., Moshkin V.I., Orlikovsky A.A.* Integral'nye skhemy s inzhektionsionnym pitaniem [Integrated circuits with injection power supply], *Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika* [Foreign electronic equipment], 1973, No. 19, pp. 3.
11. *Shagurin I.I., Petrosyants K.O.* Proektirovanie tsifrovyykh mikroskhem na elementakh inzhektionsionnoy logiki [Design of digital microcircuits based on injection logic elements]. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 231 p.
12. *Kremlev V.Yu., Moshkin V.I.* Funktsional'no-integrirovannyye elementy BIS [Functionally integrated elements of LSI], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic industry], 1976, No. 5, pp. 50-61.
13. *Kremlev V.Ya., Gritsaenko P.G.* Issledovanie struktury na vzaimodopolnyayushchikh bipolyarnyykh tranzistorakh [Study of the structure of complementary bipolar transistors], *Izvestiya VUZov. Radioelektronika* [Proceedings of the Universities. Radioelectronics], 1988, No. 3.
14. Inzhektionsionno-polevaya struktura dlya logicheskikh integral'nykh skhem [Injection field structure for logic integrated circuits]: Avtorskoe svidetel'stvo [Author 's certificate] No. 764567 (USSR). – Published in Bulletin No. 34, 1980.
15. *Makoviychuk M.I., Parshin E.O., Rekshinskij V.A.* Fizicheskie osnovy tekhnologii KNI-struktur, formiruemykh metodom ionno-lucheвого sinteza [The physical basis of the technology of COI structures formed by the method of ion-beam synthesis], *Izvestiya VUZov. Elektronika* [News of Higher Educational USSR. Electronics], 1998, No. 5, pp. 10-16.
16. *Pierce K., Adams A., Katz L., Tsai J., Seidel T., McGillis D.* Tekhnologiya SBIS: V 2-h knigakh. [VLSI technology: In 2 books], ed. by S. Zi: Transl. from Engl. Moscow: Mir: Redaktsiya literatury po novoy tekhnike [Redaktsiya literatury po novoy tekhnike], 1986.
17. *Rudakov V.I., Denisenko Yu.I., Mochalov B.V.* Nizkotemperaturnyy otzhig SIMOX-struktur v neodnorodnom temperaturnom pole [Low-temperature annealing of SIMOX structures in an inhomogeneous temperature field], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2000, Vol. 29, No. 5, pp. 367-373.
18. *Krivilevich S.A., Makoviychuk M.I., Parshin E.O.* Ionnyy sintez struktur kremniy-na-izolyatore. Sovremennoe sostoyanie, novye podkhody i perspektivy [Ion synthesis of silicon-on-insulator structures. Current state, new approaches and prospects], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 1999, Vol. 28, No. 5, pp. 363-369.
19. *Korolev M.A., Krupkina T.Yu., Reveleva M.A.* Tekhnologiya, konstruktzii i metody modelirovaniya kremnievykh integral'nykh skhem [Technology, designs and methods of modeling silicon integrated circuits], under the general ed. chl.-corr. RAS Prof. Yu.A. Chaplygina. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2015, 400 p.

20. Svetlichny A.M., Naumchenko A.S., Svetlichnaya L.A., Zhityaev I.L. Metody izolyatsii elementov mikro- i nanostruktur: ucheb. posobie [Methods of isolation of elements of micro- and nanostructures: textbook]. Rostov-on-Don: Izd. YuFU, 2014, 56 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., член-корреспондент РАЕН А.В. Ковалев.

**Грицаенко Павел Григорьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: dsp@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел. 88634393075; к.т.н.; с.н.с.; гл. специалист научно конструкторского бюро цифровой обработки сигналов.

**Gritzaenko Pavel Gregory** – Southern Federal University; e-mail: dsp@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634393075; cand. of eng. sc., senior researcher; chief specialist of the scientific design bureau of digital signal processing.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-137-148

**И.В. Пискулин**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РТК ВН В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО НАВЕДЕНИЯ**

*Эффективность применения автономных мобильных роботов во многом зависит от системы управления движением. Для экипажной машины вопрос подбора оптимальной скорости движения решает механик-водитель. Скорость движения автономных роботов, особенно по сильно пересечённой местности, существенно ниже и вызвано это работой автономной системы управления. В гусеничных шасси одной из составляющих быстроходности известно такое свойство, как поворотливость, которая характеризует управляемость транспортным средством в заданных условиях. Целью исследования является повышение эффективности функционирования систем автоматического управления (САУ) движением наземных робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) по курсу на основе применения метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным. Использование систем автоматического управления, эквивалентных комбинированным системам позволяет добиться повышения точности систем автоматического управления за счет уменьшения значения динамической ошибки, то есть достижение инвариантности ошибки без нарушения устойчивости системы. Задачей исследования является экспериментальное определение зависимостей установившегося значения ошибки воспроизведения угла курса при постоянном и линейном входных воздействиях в одноконтурных и двухконтурных системах автоматического управления движением РТК. В ходе работы предложено составить структурные схемы систем автоматического управления движением РТК ВН по углу курса, на основании структурных схем разработать модели для проведения экспериментальных исследований предложенного подхода методами компьютерного моделирования. В ходе исследования предлагается провести анализ точности воспроизведения угла курса на основе полученных в результате моделирования данных. В рамках проводимых работ рассмотрена задача построения систем управления движением автономных мобильных гусеничных машин и роботов. Предложена модель системы автоматического управления движением гусеничных РТК на основе применения метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что удастся получить улучшенные показатели функционирования системы управления по точности и оперативности. Предложенный в статье метод позволяет решать задачу повышения эффективности работы системы управления движением РТК по углу курса в автономном режиме.*

*Робототехнический комплекс; система управления движением; угол курса; метод двухконтурных систем; модель; моделирование.*

I.V. Piskulin

## INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF MODELS OF THE TRACKING SYSTEM OF THE RTK VN MOTION CONTROL IN THE AUTONOMOUS GUIDANCE MODE

*The effectiveness of the use of autonomous mobile robots largely depends on the motion control system. For a crew car, the question of selecting the optimal driving speed is decided by the driver. The speed of movement of autonomous robots, especially over very rough terrain, is significantly lower and this is caused by the operation of an autonomous control system. In tracked chassis, one of the components of speed is known to have such a property as agility, which characterizes the controllability of a vehicle under specified conditions. The aim of the study is to increase the efficiency of automatic control systems (ACS) for the movement of ground-based robotic systems for military purposes (RTK VN) on the course based on the application of the method of two-circuit systems equivalent to combined. The use of automatic control systems equivalent to combined systems makes it possible to increase the accuracy of automatic control systems by reducing the value of the dynamic error, that is, achieving error invariance without violating the stability of the system. The objective of the study is to experimentally determine the dependences of the steady-state value of the error of reproducing the angle of the course with constant and linear input influences in single-circuit and double-circuit automatic motion control systems of the RTK. In the course of the work, it was proposed to draw up structural diagrams of automatic traffic control systems of the RTK VN along the course angle, based on structural diagrams to develop models for conducting experimental studies of the proposed approach by computer modeling methods. In the course of the study, it is proposed to analyze the accuracy of reproducing the angle of the course based on the data obtained as a result of modeling. As part of the ongoing work, the task of building motion control systems for autonomous mobile tracked vehicles and robots is considered. A model of the automatic motion control system of tracked RTCs is proposed based on the application of the method of two-circuit systems equivalent to combined ones. The simulation results confirm the efficiency of the proposed approach and show that it is possible to obtain improved indicators of the functioning of the control system in terms of accuracy and efficiency. The method proposed in the article allows us to solve the problem of improving the efficiency of the RTK motion control system along the course angle in offline mode.*

*Robotic complex; motion control system; course angle; method of two-circuit systems; model; simulation.*

**Введение.** На протяжении последних двадцати лет мирового развития вооружения и военной техники (ВВТ) проблема их роботизации приобрела не только роль ключевого научно-технологического направления, но и стала одним из центральных звеньев в новых концептуальных подходах к формированию вооруженных сил, способам их боевого применения, развитию средств вооруженной борьбы и средств обеспечения. Как показывает отечественный и зарубежный опыт создания перспективных образцов ВВТ, непременным и обязательным условием успешного развития средств военной и специальной робототехники является своевременное создание научно-технического задела, являющегося базой для новых разработок и производства – как совокупность потенциальных инноваций, которые могут обеспечить создание перспективных робототехнических комплексов. Внедрение подобных инноваций позволяет обеспечить решение принципиально новых военно-технических и специальных задач и существенный прирост тактико-технических характеристик робототехнических комплексов. Научно-технический задел в области военной и специальной робототехники можно трактовать как совокупность потенциальных инноваций, которые при определенных условиях (наличие соответствующих решений органов государственного и военного управления, производственные и экономические возможности как государства в целом, так и отдельных предприятий и др.) могут обеспечить создание перспективных робототехнических комплексов (РТК) военного и специального назначения [19–24].

Целями исследования по созданию робототехнических комплексов на базе гусеничных бронированных машин являются:

- ◆ разработка предложений и научно-технического задела по созданию ряда робототехнических комплексов на основе перспективных технических и информационных технологий;

- ◆ разработка научно-технического задела и технических решений по созданию многофункционального робототехнического комплекса боевого, разведывательного, технического и тылового обеспечения среднего класса.

В результате обобщения накопленного опыта при создании описываемых выше робототехнических комплексов, а также с учетом выбранного направления роботизации существующих образцов военной техники, создана концепция создания унифицированной системы управления (СУ) робототехническими комплексами.

В состав данной системы управления предлагается включить следующие подсистемы:

- ◆ центральная вычислительная система;
- ◆ система связи и передачи данных;
- ◆ система электропитания;
- ◆ система управления движением;
- ◆ система технического зрения;
- ◆ система навигации;
- ◆ полезная нагрузка, в которую может входить боевой модуль, модуль разведки, модуль минирования/разминирования и др. [22, 24].

В данной работе проводится исследование одной из указанных подсистем, а именно системы автоматического управления движением РТК ВН в автономном режиме. Необходимость данного исследования вызвана возможным применением РТК в целях выполнения охранных функций для обеспечения безопасности объектов ракетных войск стратегического назначения (РВСН) от воздействия диверсионно-разведывательных и террористических групп противника [2–5, 23].

Основными задачами, решаемыми РТК в условиях боевых действий, могут являться:

- ◆ охрана особо важных объектов;
- ◆ разведка всех видов;
- ◆ боевое, огневое и ударное противодействие огневым средствам, живой силе и атакующей технике противника, в том числе и борьба со снайперами;
- ◆ выполнение операций без непосредственного участия человека (военнослужащего), например, преодоление участков радиационного, химического и бактериологического заражения местности и выполнение операций в контакте с агрессивными средами [5].

**Формальная постановка задачи.** Допустим, что параметры структурных схем систем автоматического управления движением РТК по углу курса в автономном режиме, в которых возможно достижение нулевой ошибки воспроизведения угла курса, определены с использованием метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным. На основании структурных схем необходимо осуществить построение моделей систем автоматического управления для проведения экспериментальных исследований предложенного подхода методами компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования точности моделей систем автоматического управления предлагается осуществить в 2 этапа.

На первом этапе исследованию подлежит модель одноконтурной САУ движением РТК по курсу, в ходе моделирования необходимо определить связь ошибок в условиях изменяющихся параметров входного воздействия.

На втором этапе исследованию подлежит модель двухконтурной САУ движением РТК по курсу, эквивалентной комбинированной системе, в ходе моделирования необходимо определить связь ошибок в условиях изменяющихся параметров входного воздействия.



На основе результатов моделирования требуется оценить возможность применения моделей САУ движением РТК, работоспособность предложенного подхода в целях получения улучшенных показателей функционирования системы управления.

В ходе выполнения охранных мероприятий РТК должен осуществлять задачи обнаружения, распознавания и измерения координат и параметров движения объектов вторжения в охраняемую зону. Как показано в [2, 3] высококачественное обнаружение и распознавание объекта вторжения производится в процессе сближения с ним. При этом, уменьшение дальности до искомого объекта улучшает линейное разрешение на его поверхности и увеличивает отношение сигнал/шум. Также увеличивается наблюдаемая площадь, так как уменьшается степень загромождаемости искомого объекта другими объектами и рельефом местности.

С учетом, того что объекты РВСН могут размещаться в труднодоступных для движения РТК рельефах местности (лесистая местность, неровности поверхности и др.) для исследования управляемого движения робота выбран РТК гусеничного типа, так как он способен преодолевать большие препятствия и имеет значительную площадь контакта с поверхностью перемещения [5, 6]. Вариант исполнения РТК ВН гусеничного типа представлен на рис. 1.



Рис. 1. Гусеничный мобильный робот

Мобильная часть робота представлена гусеничным модулем с независимыми приводами, которые позволяют получать требуемые скорости движения. Двигатели правой, левой гусениц могут быть электрическими или гидравлическими. Выполнение технологических операций в автоматическом режиме осуществляется при помощи манипуляционного механизма. Обмен информацией осуществляется специальной аппаратурой передачи данных.

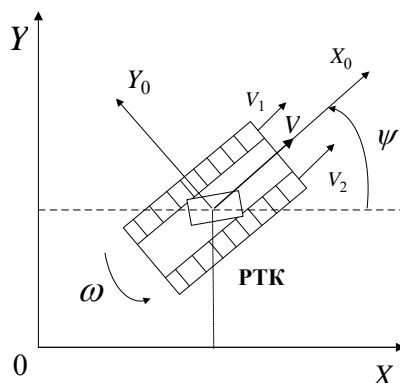


Рис. 2. Схема движения мобильного гусеничного РТК на плоскости

На указанной схеме:  $v_2$  – скорость внешней гусеницы;  $v_1$  – скорость внутренней гусеницы;  $V$  – поступательная скорость;  $\omega$  – угловая скорость поворота относительно центра масс;  $\psi$  – угол поворота.

Использование РТК гусеничного типа приводит к необходимости применения метода управления углом курса РТК по разности скоростей [5, 6]. Особенностью САУ, реализующей метод разности скоростей является то, что в разомкнутой части системы управления должны быть два канала передачи управляющего воздействия (на одну ленту и на другую). Один из вариантов такой САУ углом курса показан на рис. 3.

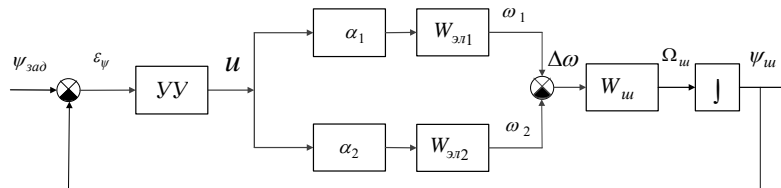


Рис. 3. Структурная схема двухканальной замкнутой САУ углом курса по методу разностей скоростей

На данном рисунке  $\varepsilon_\psi$  – ошибка воспроизведения заданного угла курса  $\psi_{зад}$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты усиления усилительных звеньев первого и второго каналов управления соответственно (коэффициенты подвижности, которые определяются отношением угловых скоростей  $\omega_1, \omega_2$ );  $\Omega_{ш}$  – угловая скорость гусеничного мобильного робота (рысканья), интегрирование которой дает угол курса шасси робота  $\psi_{ш}$ .

Кроме того, на данном рисунке УУ – устройство управления (регулятор),  $u$  – управляющее воздействие,  $W_{эл1}, W_{эл2}$  – динамические операторы электроприводов первого и второго каналов управления,  $W_{ш}$  – динамический оператор шасси.

Для решения задачи автономного управления модулем движения мобильного робота предлагается использовать систему управления, содержащую аппаратные средства захвата и анализа изображений, а также управления движением. Для захвата изображения рабочей зоны используется цифровая видеокамера, связанная с системой анализа изображений, представляющей собой комплекс программных и аппаратных средств. Система анализа изображений обрабатывает поток, поступающий с цифровой видеокамеры, и преобразует его в набор параметров, на основе которых система управления движением формирует управляющие воздействия исполнительным механизмам робота.

**1. Исследование точности модели одноконтурной САУ движением РТК в автономном режиме при изменении параметров входного воздействия.** В целях исследования точности модели САУ движением РТК произведено составление схемы, соответствующей указанной модели на рисунке 3 в программе «Simulink».

Задание параметров систем автоматического управления углом курса и входных воздействий.

Передачные функции электромашинного усилителя  $W_3(P)$ , электродвигателя  $W_0(P)$  и шасси  $W_{ш}(P)$  имеют вид [1, 8, 9]:

$$W_3(P) = \frac{1,5}{0,02P + 1}; W_0(P) = \frac{1}{0,2P + 1}; W_{ш}(P) = \frac{1,5}{P + 1}. \quad (1)$$

В системе заданы следующие коэффициенты подвижности  $\alpha$  и коэффициенты инверсии  $K(\alpha)$ :

$$\alpha = 3, K(\alpha) = \frac{1}{(\alpha - 1)} = 0,5. \quad (2)$$

В ходе работы по исследованию модели приняты следующие допущения: параметры с аппаратных средств захвата и анализа изображений поступают в виде следующих данных:

♦ угол курса является величиной постоянной (цель неподвижна), при этом выбраны следующие значения  $\psi_{ц} = 2;3;5 \text{ град}$ ;

♦ угол курса является величиной, изменяющейся по линейному закону (цель перемещается), при этом выбраны следующие значения  $\dot{\psi}_{ц} = 0,5;1;2 \text{ рад/с}$ .

Результаты исследования получены при сравнении графиков значения ошибки управления движением по углу курса в автономном режиме управления, которые отражаются в программе на осциллограмме и представлены на рис. 4, 5.

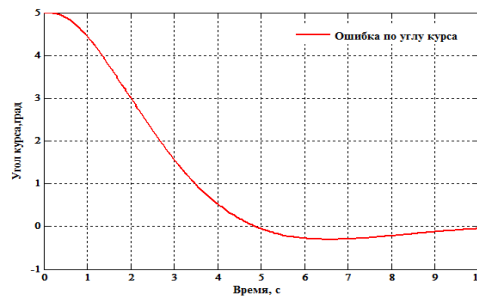


Рис. 4. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса одноконтурной САУ РТК при постоянном входном воздействии

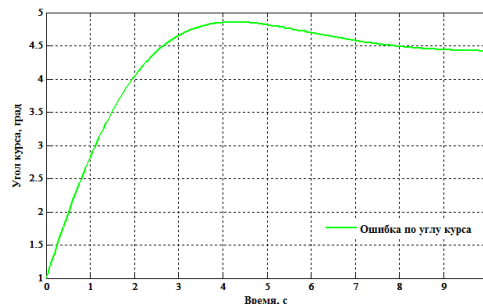


Рис. 5. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса одноконтурной САУ РТК при линейном входном воздействии

В соответствии с представленными графиками выявлено следующее:

♦ при исследовании модели одноконтурной САУ движение РТК значение установившейся ошибки воспроизведения угла курса в условиях различных значений постоянного входного воздействия получается равным нулю.

♦ при увеличении значения угловой скорости, т.е. линейного входного воздействия, возрастает значение установившейся ошибки. Так, например при значении входного воздействия  $\dot{\psi}_{ц} = 0,5 \text{ рад/с}$  значение установившейся ошибки со-

ставляет  $\varepsilon_{\psi} = 1,1 \text{ град}$ , а при значении входного воздействия  $\dot{\psi}_u = 2 \text{ рад/с}$  в соответствии с графиком рис. 5 значение установившейся ошибки составляет  $\varepsilon_{\psi} = 4,4 \text{ град}$ .

Из анализа полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать выводы:

1. В одноконтурных САУ движением РТК по углу курса при постоянном входном воздействии возможно достижение нулевой ошибки воспроизведения угла курса, таким образом, точность системы управления в установившемся режиме является высокой. Высокие показатели точности системы объясняется выражениями в соответствии с [1, 12–14] для определения ошибок:

$$\varepsilon_{\psi} = D_0 \psi_u + D_1 \frac{d\psi_u}{dt}, \quad (3)$$

где  $D_0 = W_{\varepsilon}(P) \Big|_{P=0}$  – коэффициент ошибки по положению;

$$D_1 = \frac{dW_{\varepsilon}(P)}{dP} \Big|_{P=0} \text{ – коэффициент ошибки по скорости.}$$

2. Изменение параметров линейного входного воздействия одноконтурной САУ движением РТК по углу курса (увеличение значений) приводит к увеличению ошибки, а значит и уменьшению точности системы управления.

В связи с указанными обстоятельствами можно сказать, что модель одноконтурной САУ движением РТК в автономном режиме позволяет достигать инвариантности ошибки воспроизведения угла курса при постоянном входном воздействии.

**2. Исследование точности модели двухконтурной САУ движением РТК, эквивалентной комбинированной системе, в автономном режиме при изменении параметров входного воздействия.** В целях исследования точности модели САУ движением РТК произведено составление схемы, основанной на методе построения двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным системам [12–14, 16, 17]. Структурная схема двухконтурной САУ движением РТК представлена на рис. 6.

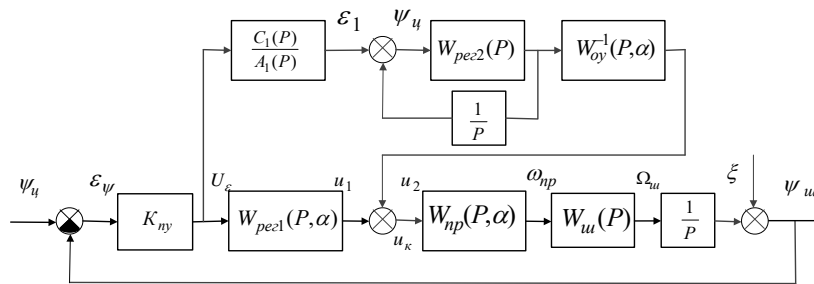


Рис. 6. Структурная схема двухконтурной САУ, эквивалентная комбинированной системе

На указанной схеме  $\psi_u$  – угол курса РТК относительно цели;  $\varepsilon_{\psi}$  – ошибка воспроизведения угла курса;  $U_{\varepsilon}$  – сигнал от идентификационного устройства;  $u_1, u_2, u_k$  – управление первого контура, управление второго контура, комбинированное управление соответственно;  $\omega_{np}$  – угловая скорость вала привода;  $\Omega_{ш}$  – скорость поворота шасси;  $\xi$  – воздействие от возмущения;  $\psi_{ш}$  – угол курса

движения РТК;  $W_{pez1}(P, \alpha), W_{pez2}(P), W_{np}(P, \alpha), W_{ш}(P)$  – передаточные функции регуляторов 1,2, привода, шасси РТК. Блок с ПФ  $W_{OY}^{-1}(P, \alpha)$  осуществляет инверсию ПФ  $W_{OY}(P)$ . На основании структурной схемы рис.6 произведено составление схемы в программе «Simulink» для исследования точности модели САУ движением РТК.

Параметры системы автоматического управления углом курса и входных воздействий остаются такими же, что при исследовании одноконтурной системы, за исключением структуры второго контура двухконтурной САУ. Отношение полиномов  $C_1(P)/A_1(P)$  и передаточные функции регулятора второго контура  $W_{pez2}(P)$ , а также блока, осуществляющего инверсию ПФ объекта управления  $W^{-1}_{OY}(P, \alpha)$ , имеют вид [13, 14]:

$$\frac{C_1(P)}{A_1(P)} = \frac{0,02P^3 + 0,3P^2 + 3P + 1}{0,02P^3 + 0,3P^2 + 3P}; W_{pez2}(P) = \frac{P}{0,1P + 1}; W^{-1}_{OY}(P) = \frac{0,2P + 1}{0,02P + 1}. \quad (4)$$

Результаты исследования получены при сравнении графиков значения ошибки управления движением по углу курса в автономном режиме управления, которые отражаются в программе на осциллограмме и представлены на рис. 7, 8.

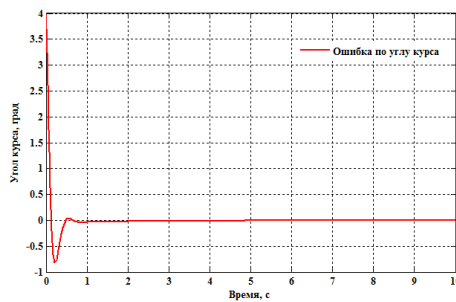


Рис. 7. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса двухконтурной САУ РТК, эквивалентной комбинированной при постоянном входном воздействии

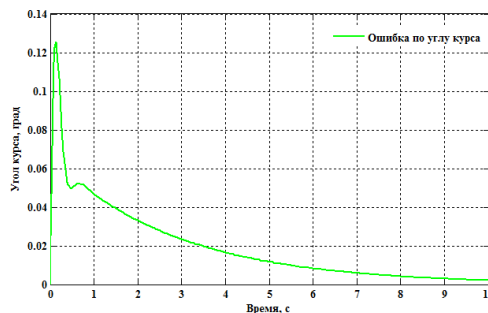


Рис. 8. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса двухконтурной САУ РТК, эквивалентной комбинированной при линейном входном воздействии

В соответствии с представленными графиками выявлено следующее:

♦ при исследовании модели двухконтурной САУ движения РТК по углу курса, эквивалентной комбинированной системе, значение установившейся ошибки воспроизведения угла курса в условиях постоянного и линейного входных воздействий равно нулю.

Кроме этого проведен сравнительный анализ графиков установившейся ошибки воспроизведения угла курса одноконтурной САУ и двухконтурной САУ движением РТК, эквивалентной комбинированной системе. Графики исследования моделей указанных САУ при одинаковых исходных данных представлены на рис. 9.

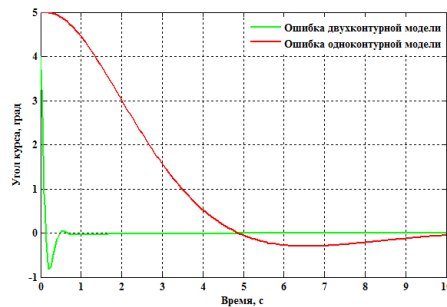


Рис. 9. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса при постоянном входном воздействии

Из графических зависимостей рис. 9 видно, что для модели двухконтурной САУ движением РТК по углу курса, эквивалентной комбинированной системе, в целях достижения установившегося значения нулевой ошибки требуется значительно меньше времени относительно одноконтурной модели, т.е. создается возможность повышения быстродействия отработки угла курса. В связи с вышеописанными обстоятельствами использование модели САУ движением РТК ВН по курсу, для построения которых применяется метод двухконтурных систем автоматического управления, эквивалентных комбинированным системам, позволяет кроме достижения инвариантности ошибки с соблюдением требования к устойчивости системы повысить быстродействие. Таким образом осуществляется выполнения критерия вида «точность плюс оперативность». Применение системы автоматического управления движением РТК на основе указанных моделей как подсистемы может повысить точность и оперативность работы всей системы управления РТК ВН.

**Заключение.** На основании выполненных исследований показана целесообразность и эффективность использования для управления автономными мобильными гусеничными машинами и роботами в условиях постоянного и линейного входных воздействий моделей систем автоматического управления движением РТК по курсу, построенных на основе метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным, обеспечивающих автономное управление.

Результаты моделирования и экспериментальные исследования показали работоспособность и надежность использования указанного метода построения САУ. Предложен метод построения управляющих систем, которые являются основой создания систем управления автономными мобильными машинами и роботами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пушкарев Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Теория автоматического управления: учебник. – Серпухов, ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. – 476 с.
2. Свиридов В.В., Пушкарев Ю.А. Модель оценки качества характеристик робототехнического комплекса для обнаружения нарушителей в лесистой местности // Математическое моделирование и численные методы. – 2021. – № 29. – С. 77-90.
3. Пушкарев Ю.А., Свиридов В.В. Метод распознавания объектов на основе их сигнально-геометрических признаков средствами робототехнического комплекса охраны // Математическое моделирование и численные методы. – 2022. – Т. 34, № 9. – С. 88-106.
4. Вишняков Л.В., Ким В.Я. Моделирование поиска-обнаружения-распознавания по тепловизионному изображению с изменяющимся качеством // Известия РАН ТиСУ. – 2020. – № 6. – С. 96-108.

5. Свиридов В.В. Применение робототехнических комплексов охраны и обороны критически важных объектов Ракетных войск стратегического назначения // Военная мысль. 2021. – № 6. – С. 57-64.
6. Пушкарев Ю.А., Пушкарева Е.Ю., Пискулин И.В. Управление робототехническим комплексом по углу курса на основе метода разности скоростей // Известия ИИФ. – 2022. – № 4. – С. 45-51.
7. Давыдов О.И., Платонов А.И. Метод определения параметров управления траекторией движения мобильного робота // Известия РАН ТИСУ. – 2017. – № 1. – С. 168-176.
8. Пушкарев Ю.А., Пушкарева Е.Ю., Пискулин И.В. Методика определения областей устойчивого движения робота по курсу при управлении по методу разностей скоростей. 4 ЦНИИ Минобороны России, г. Королев, 2022. – № 168. – Т. 1. – С. 45-54.
9. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems. – Fourth Edition. – Addison – Wesley, 1998. – 832 p.
10. Ramon Gonzalez, Mirko Fiacchini, Teodoro Alamo, Jose Luis Guzman, Francisco Rodrigue. Adaptive Control for a Mobile Robot under slip conditions. Department of Systems Engineering and Automatic, University of Seville, Seville, Spain, 2011.
11. Anh Tuan Le. Modeling and Control of Tracked Vehicle», Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, University of Sydney, Australia, 1999.
12. Пушкарев Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Системы автоматического управления в ракетно-космической технике. Задачи слежения и терминального управления: монография. – Серпухов, ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. – 379 с.
13. Пушкарев Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Задачи и методы синтеза следящих и терминальных систем автоматического управления в ракетно-космической технике: монография. – Машиностроение – Полет, 2022. – 647 с.
14. Пушкарев Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Методы синтеза следящих и терминальных автоматических систем высокой точности: монография. – Серпухов, ФВА РВСН им. Петра Великого, 2016. – 435 с.
15. Пушкарев Ю.А., Родыгин В.А. Терминальный метод достижения инвариантности системы управления движением объекта // Известия РАН ТИСУ. – 2009. – № 6. – С. 12-18.
16. Пушкарев Ю.А., Родыгин В.А. Критерий достижения инвариантности в детерминированных системах управления движением объектов // Известия РАН ТИСУ. – 2011. – № 4. – С. 37-47.
17. Крудько П.Д., Чхеидзе Г.А. Синтез алгоритмов управления следящих систем высокой динамической точности // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1992. – № 2. – С. 145-178.
18. Rao A.V. Survey of Numerikal method for Optimal Control // Advances Astronautical Selences. – 2010. – Vol. 135. – P. 497-528.
19. Корсунский В.А. Перспективы развития военных мобильных робототехнических комплексов наземного базирования в России. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – 379 с.
20. Скиба В.А. и др. Робототехнические комплексы военного назначения: учеб. пособие. – Балашиха: ВА РВСН им. Петра Великого, 2021. – 168 с.
21. Лопота А.В. Наземные робототехнические комплексы военного и специального назначения. – СПб: ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2016. – 29 с.
22. Лапинов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт создания автономных мобильных робототехнических комплексов специального назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. «Специальная робототехника и мехатроника». – 2011. – С. 7-24.
23. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Избранные Труды Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2015. – Т. II. – С. 64-70.

## REFERENCES

1. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik [Theory of automatic control: textbook]. Serpukhov: FVA RVSNS im. Petra Velikogo, 2020, 476 p.
2. Sviridov V.V., Pushkarev Yu.A. Model' otsenki kachestva kharakteristik robototekhnicheskogo kompleksa dlya obnaruzheniya narushiteley v lesistoy mestnosti [A model for assessing the quality of characteristics of a robotic complex for detecting intruders in a wooded area], *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 2021, No. 29, pp. 77-90.

3. *Pushkarev Yu.A., Sviridov V.V.* Metod raspoznavaniya ob"ektov na osnove ikh signal'no-geometricheskikh priznakov sredstvami robototekhnicheskogo kompleksa okhrany [Method of object recognition based on their signal-geometric features by means of a robotic security complex], *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 2022, Vol. 34, No. 9, pp. 88-106.
4. *Vishnyakov L.V., Kim V.Ya.* Modelirovanie poiska-obnaruzheniya-raspoznavaniya po teplovizionnomu izobrazheniyu s izmenyayushchimsya kachestvom [Modeling of search-detection-recognition based on a thermal image with varying quality], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2020, No. 6, pp. 96-108.
5. *Sviridov V.V.* Primenenie robototekhnicheskikh kompleksov okhrany i oborony kriticheski vaznykh ob"ektov Raketnykh voysk strategicheskogo naznacheniya [Application of robotic complexes for the protection and defense of critical objects of Strategic Missile Forces], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2021, No. 6, pp. 57-64.
6. *Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu., Piskulin I.V.* Upravlenie robototekhnicheskim kompleksom po uglu kursa na osnove metoda raznosti skorostey [Control of a robotic complex by course angle based on the speed difference method], *Izvestiya IIF* [Izvestiya IIF], 2022, No. 4, pp. 45-51.
7. *Davydov O.I., Platonov A.I.* Metod opredeleniya parametrov upravleniya traektoriiy dvizheniya mobil'nogo robota [Method of determining parameters of control of the trajectory of movement of a mobile robot], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2017, No. 1, pp. 168-176.
8. *Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu., Piskulin I.V.* Metodika opredeleniya oblastey ustoychivogo dvizheniya robota po kursu pri upravlenii po metodu raznostey skorostey [Methodology for determining the areas of stable movement of the robot along the course when controlled by the method of speed differences]. 4 TSNII Minoborony Rossii, g. Korolev, 2022, No. 168, Vol. 1, pp. 45-54.
9. *Richard C. Dorf, Robert H. Bishop.* Modern Control Systems. Fourth Edition. Addison – Wesley, 1998, 832 p.
10. *Ramon Gonzalez, Mirko Fiacchini, Teodoro Alamo, Jose Luis Guzman, Francisco Rodrigue.* Adaptive Control for a Mobile Robot under slip conditions. Department of Systems Engineering and Automatic, University of Seville, Seville, Spain, 2011.
11. *Anh Tuan Le.* Modeling and Control of Tracked Vehicle», Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, University of Sydney, Australia, 1999.
12. *Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu.* Sistemy avtomaticheskogo upravleniya v raketno-kosmicheskoy tekhnike. Zadachi slezheniya i terminal'nogo upravleniya: monografiya [Automatic control systems in rocket and space technology. Tasks of tracking and terminal management: monograph]. Serpukhov, FVA RVSU im. Petra Velikogo, 2020, 379 p.
13. *Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu.* Zadachi i metody sinteza sledyashchikh i terminal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v raketno-kosmicheskoy tekhnike: monografiya [Tasks and methods of synthesis of tracking and terminal automatic control systems in rocket and space technology: monograph]. Mashinostroenie – Polet, 2022, 647 p.
14. *Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu.* Metody sinteza sledyashchikh i terminal'nykh avtomaticheskikh sistem vysokoy tochnosti: monografiya [Methods of synthesis of tracking and terminal automatic systems of high accuracy: monograph]. Serpukhov, FVA RVSU im. Petra Veli-kogo, 2016, 435 p.
15. *Pushkarev Yu.A., Rodygin V.A.* Terminal'nyy metod dostizheniya invariantnosti sistemy upravleniya dvizheniem ob"ekta [Terminal method of achieving invariance of the object motion control system], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2009, No. 6, pp. 12-18.
16. *Pushkarev Yu.A., Rodygin V.A.* Kriteriy dostizheniya invariantnosti v determinirovannykh sistemakh upravleniya dvizheniem ob"ektov [Criterion for achieving invariance in deterministic systems for controlling the movement of objects], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2011, No. 4, pp. 37-47.
17. *Krud'ko P.D., Chkheidze G.A.* Sintez algoritmov upravleniya sledyashchikh sistem vysokoy dinamicheskoy tochnosti [Synthesis of control algorithms for tracking systems of high dynamic accuracy], *Izvestiya RAN. Tekhnicheskaya kibernetika* [Izvestiya of the RAS. Technical cybernetics], 1992, No. 2, pp. 145-178.
18. *Rao A.V.* Survey of Numerical method for Optimal Control, *Advances Astronautical Selences*, 2010, Vol. 135, pp. 497-528.



19. *Korsunskiy V.A.* Perspektivy razvitiya voennykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov nazemnogo bazirovaniya v Rossii [Prospects for the development of military mobile robotic complexes of ground-based in Russia]. Moscow: MGTU im. Baumana, 2013, 379 p.
20. *Skiba V.A. i dr.* Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya: ucheb. posobie [Robotic complexes for military purposes: studies. stipend]. Balashikha: VA RVSN im. Petra Velikogo, 2021, 168 p.
21. *Lopota A.V.* Nazemnye robototekhnicheskie komplekсы voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Ground-based robotic complexes for military and special purposes]. St. Petersburg: TSNI robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki, 2016, 29 p.
22. *Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V.* Opyt sozdaniya avtonomnykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya [Experience in creating autonomous mobile robotic-technical complexes for special purposes], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. «Spetsial'naya robototekhnika i mekhatronika»* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. "Special robotics and mechatronics"], 2011, pp. 7-24.
23. *Rubtsov I.V.* Voprosy sostoyaniya i perspektivy razvitiya otechestvennoy nazemnoy robototekhniki voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Issues of the state and prospects of development of domestic ground-based robotics for military and special purposes], *Izbrannye Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Selected Works of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks"], 2015, Vol. II, pp. 64-70.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор Ю.А. Пушкарев.

**Пискулин Игорь Викторович** – Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого; e-mail: pikselzte@gmail.com; г. Серпухов, Россия; тел.: 89257250636; преподаватель.

**Piskulin Igor Viktorovich** – Branch of the Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces; e-mail: pikselzte@gmail.com; Serpukhov, Russia; phone: +79257250636; lecturer.

УДК 621.375.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-148-156

**Н.Н. Прокопенко, Д.В. Клейменкин, М.А. Сергеенко**

### **СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ «ПЕРЕГНУТОГО» КАСКАДА\***

*Предлагаются три схемотехнических приема, обеспечивающих (при одновременном использовании) повышение более чем на два порядка максимальной скорости нарастания выходного напряжения (SR) микроэлектронных операционных усилителей (ОУ) на биполярных транзисторах с классической архитектурой, предназначенных для работы в системах автоматического управления, радиотехники и связи, например, в качестве драйверов сверхбыстродействующих аналого-цифровых преобразователей (ЕVIOAS150, ЕVIOAS350, AD9208, AD9691, 1273ПВ14 и др.). Рассматриваемые ОУ содержат каскадный входной каскад с нелинейной коррекцией проходной характеристики и цепью следящей связи, повышающей коэффициент ослабления входных синфазных сигналов и коэффициент подавления помех по шинам питания, а также промежуточный каскад на основе «перегнутого» каскада. Применение «перегнутого» каскада позволяет повысить эффективность использования напряжений источников питания, а также увеличить частоту единичного усиления скорректированного ОУ. Однако, такой промежуточный каскад является существенным нелинейным звеном, ограничивающим максимальные выходные токи, перезаряжающие корректирующий конденсатор ОУ. Приводятся результаты компьютерного моделирования двух модификаций ОУ AmpSR1, AmpSR2, отличающихся друг от друга структурой нелинейного параллельного канала, устраняющего динамическую перегрузку «перегнутого»*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00637).

каскада. Актуальность выполненных исследований связана с проблемами импортозамещения в классе быстродействующих ОУ и отсутствием у дизайнеров аналоговых схем новых и перспективных идей повышения SR ОУ, базирующихся на одновременном использовании нелинейных и дифференцирующих цепей коррекции переходного процесса в режиме большого сигнала. Рассмотренные схемотехнические приемы эффективны и при использовании CMOS технологических процессов.

*Операционный усилитель; максимальная скорость нарастания выходного напряжения; «перегнутый» каскод; нелинейная коррекция; нелинейные параллельные каналы; дифференцирующие цепи коррекции.*

**N.N. Prokopenko, D.V. Kleimenkin, M.A. Sergeenko**

### **CIRCUITRY METHODS FOR INCREASING THE SPEED OF OPERATIONAL AMPLIFIERS BASED ON A "FOLDED" CASCODE**

*Three circuit techniques are proposed that provide (with simultaneous use) an increase by more than two orders of magnitude of the maximum output voltage slew rate (SR) of microelectronic operational amplifiers (op-amps) based on bipolar transistors with a classical architecture, designed to operate in automatic control systems, radio engineering and communications, for example, as drivers for ultra-high-speed analog-to-digital converters (EVIOAS150, EVIOAS350, AD9208, AD9691, 1273PV14, etc.). The considered op-amps contain a cascode input stage with a non-linear correction of the pass-through characteristic and a tracking circuit that increases the attenuation coefficient of the input common-mode signals and the noise suppression coefficient on the power buses, as well as an intermediate stage based on a "folded" cascode. The use of a "folded" cascode makes it possible to increase the efficiency of using power supply voltages, as well as to increase the unity gain frequency of the corrected op-amp. However, such an intermediate stage is an essential non-linear link that limits the maximum output currents that recharge the op-amp correction capacitor. The results of computer simulation of two modifications of the AmpSR1, AmpSR2 op amps, which differ from each other in the structure of a nonlinear parallel channel, which eliminates the dynamic overload of a "folded" cascode, are presented. The relevance of the research performed is related to the problems of import substitution in the class of high-speed op-amps and the lack of new and promising ideas for increasing the SR of the op-amp based on the simultaneous use of non-linear and differentiating transient correction circuits in the large signal mode among analog circuit designers. The considered circuit techniques are also effective when using CMOS technological processes.*

*Operational amplifier; maximum output voltage slew rate; "folded" cascode; nonlinear correction; nonlinear parallel channels; differentiating correction circuits.*

**Введение.** В системах автоматического управления (САУ) радиотехники и связи различного функционального назначения широко применяются операционные усилители (ОУ), динамические параметры которых в режиме большого сигнала оказывают существенное влияние на параметры САУ [1]. В этой связи методам повышения быстродействия микросэлектронных ОУ всегда уделялось существенное внимание [2–14]. При этом использовались как схемотехнические [2–14], так и технологические [15] приемы.

Цель и новизна настоящей статьи состоит в рассмотрении новых схемотехнических методов повышения быстродействия достаточно распространенного подкласса ОУ, которые используют «перегнутые» каскоды в качестве промежуточного каскада [16, 17]. Такой «перегнутый» каскод является существенным нелинейным звеном в структуре ОУ и оказывает отрицательное влияние на максимальную скорость нарастания выходного напряжения (SR) в режиме большого сигнала.

1. Многоканальный операционный усилитель AmpSR1 с квазилинейным входным каскадом и дифференцирующими цепями коррекции переходного процесса. На рис. 1 приведена схема предлагаемого ОУ AmpSR1 [18], который содержит каскодный входной дифференциальный каскод VT1, VT2, VT3, VT4 с цепью

нелинейной коррекции на транзисторах VT8, VT9 [11, 12]. Промежуточный каскад (VT5, VT6, ПТ4) обеспечивает эффективное использование напряжений питания ОУ, а также способствует повышению частоты его единичного усиления.

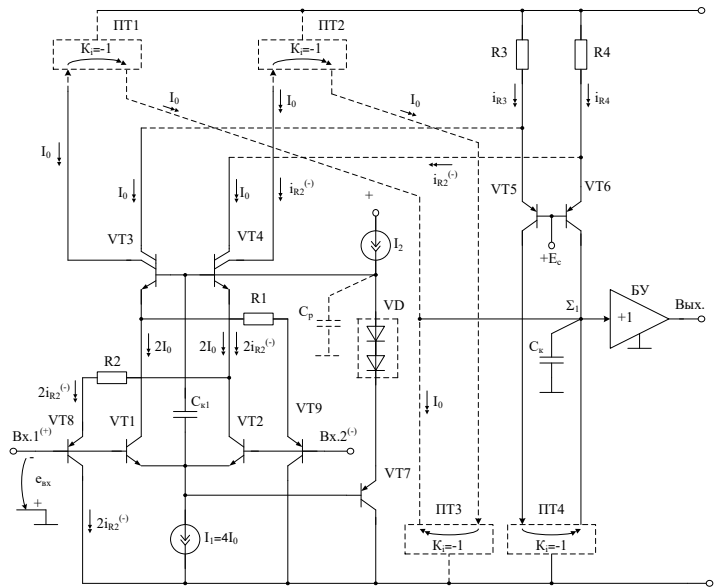


Рис. 1. Быстродействующий ОУ на основе «перегрутого» каскода (VT5, VT6) AmpSR1

Интегрирующий корректирующий конденсатор  $C_k$  формирует амплитудно-частотную характеристику ОУ и заданный запас устойчивости по фазе. В схеме на рис. 1 используются, в частном случае, биполярные транзисторы, хотя данные схемотехнические решения успешно работают и с CMOS транзисторами. Для повышения коэффициента ослабления входного синфазного сигнала в ОУ на рис. 1 используется каскодный дифференциальный усилитель (ДУ) с цепью следящей связи по синфазному сигналу [10, 11, 19], которая реализована на эмиттерном повторителе VT7 и цепи смещения потенциалов VD.

Для получения предельного быстродействия в рассматриваемой схеме ОУ во входной каскад введен дифференцирующий конденсатор  $C_{к1}$  [18], который форсирует переходные процессы в ОУ при положительном импульсном сигнале на входе Вх.1, соизмеримым с напряжением питания.

Следует отметить, что при отсутствии VT8, VT9, ПТ1, ПТ2 и ПТ3 максимальная скорость нарастания выходного напряжения такого ОУ крайне мала и имеет следующие значения:  $SR^{(+)}=62,3$  В/мкс, а  $SR^{(-)}=84,2$  В/мкс.

В схеме на рис. 2 используется три классических повторителя напряжения ПТ1, ПТ2 и ПТ3 [1], которые обеспечивают передачу во время фронта переходного процесса выходных токов входного ДУ (VT1-VT4, VT8, VT9) в интегрирующую емкость коррекции  $C_k$ . При этом промежуточный каскад (VT5, VT6) входит в режим ограничения выходных токов.

Особенность предлагаемого метода построения ОУ заключается в том, что в режиме малого сигнала транзисторы VT8, VT9 могут находиться в выключенном состоянии и практически не влияют на малосигнальную АЧХ схемы [13]. Их основное назначение – форсировать (совместно с ПТ1, ПТ2 и ПТ3) процесс перезаряда интегрирующего конденсатора  $C_k$  в режиме большого сигнала, что существенно повышает SR.

На рис. 2 приведен статический режим ОУ в среде LTSpice на моделях транзисторов базовых матричных кристаллов МН2ХА031\_25.01.21 [20] при 27°C, резисторах  $R1=R2=100$  Ом,  $R3=R4=5$  кОм, источниках опорного тока  $I1=400$ мкА,  $I2=100$ мкА, источнике опорного напряжения  $V6=3$ В.

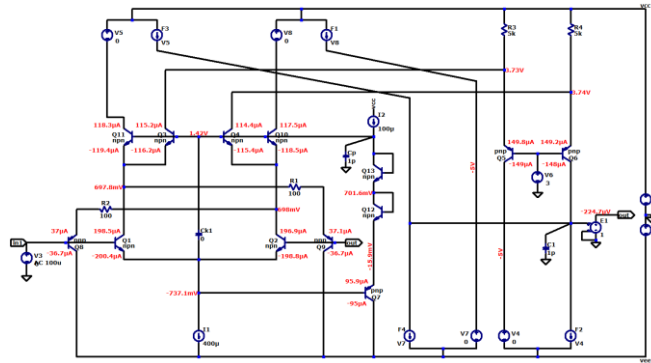


Рис. 2. Статический режим схемы ОУ на рис. 1 в среде LTSpice

На рис. 3 показаны результаты моделирования логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) ОУ на рис. 2.

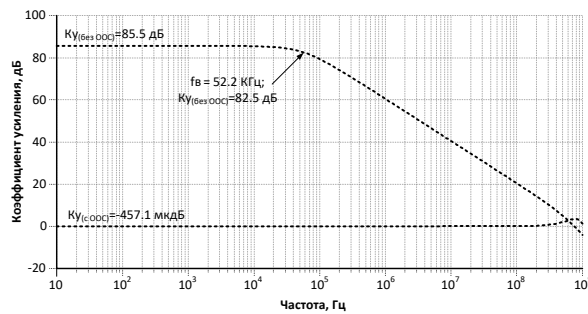


Рис. 3. ЛАЧХ коэффициента усиления ОУ на рис. 2

Передний и задний фронты переходного процесса в ОУ на рис. 2 при разных значениях емкости дифференцирующего конденсатора  $Ck1$  показаны на рисунках 4 и 5 соответственно.

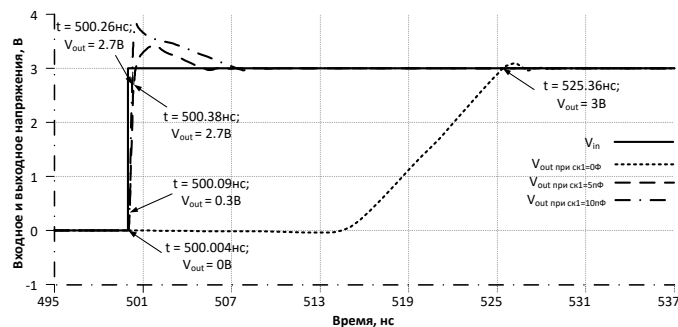


Рис. 4. Передний фронт переходного процесса в ОУ на Рис. 2 при разных значениях емкости дифференцирующего конденсатора ( $Ck1=0\div 10$  пФ)

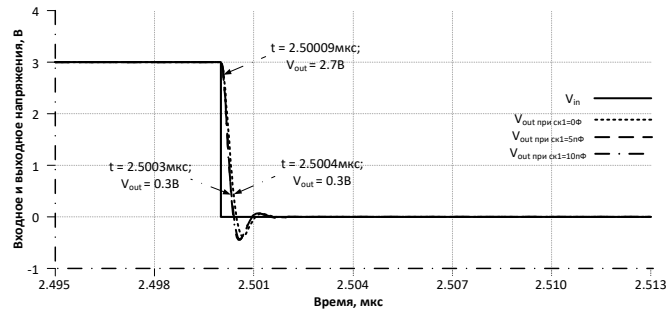


Рис. 5. Задний фронт переходного процесса в ОУ на Рис. 2 при  $C_{k1}=0\div 10$  пФ

При отсутствии дифференцирующего конденсатора  $C_{k1}$  переходным процессам на рис. 4 и 5 соответствуют следующие значения  $SR$ : для переднего фронта  $SR^{(+)} = 115$  В/мкс, для заднего фронта  $SR^{(-)} = 6153$  В/мкс. Таким образом, при  $C_{k1}=0$  операционный усилитель имеет существенно отличающиеся значения  $SR^{(+)}$  и  $SR^{(-)}$ . Этот эффект объясняется задержкой сигнала в цепи следящей связи из-за влияния паразитной емкости  $C_p$  в цепях базы транзисторов  $VT3$ ,  $VT4$  [18].

Введение дифференцирующего конденсатора  $C_{k1}=10$  пФ обеспечивает повышение предельных значений максимальной скорости нарастания выходного напряжения до уровней:  $SR^{(+)} = 14117,0$  В/мкс,  $SR^{(-)} = 11428,0$  В/мкс. Данные значения  $SR$  получены при идеальных токовых зеркалах ПТ1, ПТ3 и буферном усилителе БУ. В качестве этих функциональных узлов могут применяться сотни известных схемотехнических решений [1], что позволяет за счет оптимизации схем приблизить практические значения  $SR$  к предельным значениям  $SR_{max} \approx 11,5\text{-}14,1$  тыс. В/мкс.

**2. Быстродействующий операционный усилитель AmpSR2 с модифицированным нелинейным параллельным каналом.** Отличие схемы ОУ AmpSR2 на рис. 6 состоит в использовании транзисторов  $VT8$ ,  $VT9$  для управления токовыми зеркалами ПТ1 и ПТ2 и передачи больших импульсных токов во время переходного процесса в интегрирующую корректирующую емкость  $C_k$ . При этом малосигнальная ЛАЧХ ОУ определяется каскодным входным каскадом  $VT1$ ,  $VT4$  и промежуточным «перегнутым» каскадом  $VT5$ ,  $VT6$ .

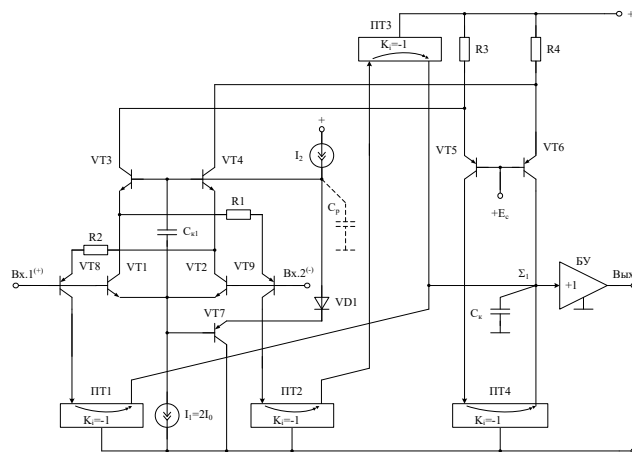


Рис. 6. Быстродействующий операционный усилитель AmpSR2 с модифицированным нелинейным параллельным каналом

На рис. 7 приведен статический режим ОУ на рис. 6 в среде LTSpice на моделях транзисторов M2XHA031\_25.01.21 [20] при 27°C, резисторах R1=R2=100 Ом, R3=R4=5 кОм, источниках опорного тока I1=I2=400мкА, конденсаторах C1=4пФ, Cк1=0Ф, Ср=1пФ напряжениях питания V1=V2=±5В.

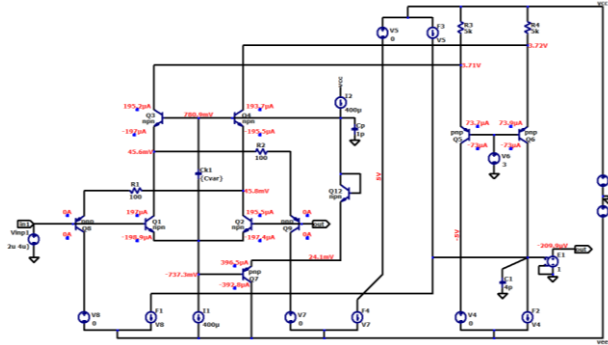


Рис. 7. Статический режим схемы ОУ рис. 6 в среде LTSpice

На рис. 8 показаны результаты моделирования логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) схемы ОУ (рис. 6).

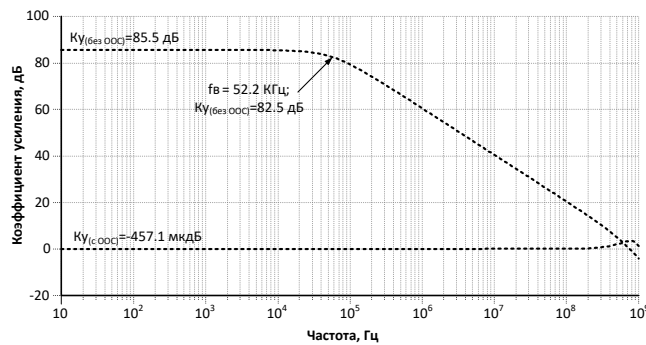


Рис. 8. ЛАЧХ коэффициента усиления схемы ОУ на рис. 7

Передний и задний фронты переходного процесса в ОУ на рис. 7 показаны на рис. 9 и 10 соответственно.

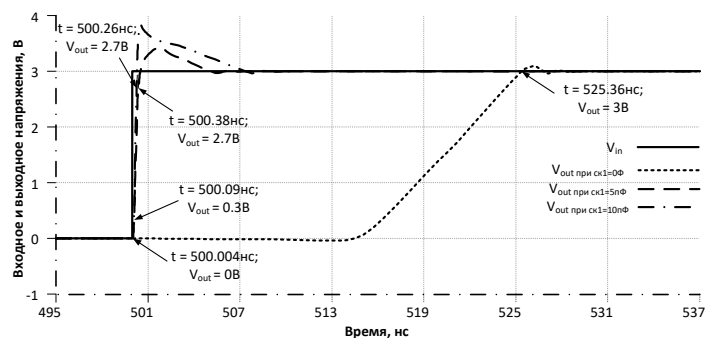


Рис. 9. Передний фронт переходного процесса ОУ на рис. 7 при разных значениях емкости дифференцирующего конденсатора Cк1 = 0 ÷ 10 пФ

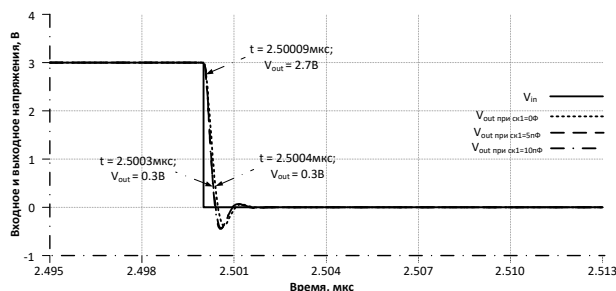


Рис. 10. Задний фронт переходного процесса рис. 7

Переходным процессам на рис. 9 и 10, полученным при  $C_k=10$  пФ, соответствуют следующие предельные значения SR:  $SR_{\max}^{(+)}=14176.0$  В/мкс,  $SR_{\max}^{(-)}=11428.0$  В/мкс. При этом дифференцирующий конденсатор уменьшает динамическую асимметрию в переходных процессах, обеспечивая равенство  $SR_{\max}^{(+)} \approx SR_{\max}^{(-)}$ .

**Заключение.** Рассмотрены схемотехнические приемы повышения максимальной скорости нарастания выходного напряжения в классических операционных усилителях на биполярных транзисторах, содержащих в своей структуре «перегнутые» каскоды. Существенное повышение SR обеспечивается за счет использования во входном каскодном дифференциальном усилителе цепи нелинейной коррекции и дифференцирующей цепи коррекции переходного процесса, а также введения параллельного канала на трех токовых зеркалах для передачи больших импульсных токов входного каскада в интегрирующую емкость коррекции.

Предлагаемые схемотехнические приемы повышения SR могут использоваться не только в ОУ на биполярных транзисторах, но и в схемах, реализуемых по CMOS технологиям, в т.ч на широкозонных полупроводниках.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Carter B., Mancini R. Op Amps for Everyone. – 5th ed. – Newnes, 2017. – 484 p.
2. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С. Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей: монография. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 231 с.
3. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Zhuk A.A. High-Speed Operational Amplifier with Differentiating Transient Correction Circuits // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002969.
4. Johnson Jeffrey David. Slew rate enhancement circuit / US Patent 6831515 (B2), 2004. 1-11.
5. Sauer Don R. Rail to rail operational amplifier input stage / US Patent 5414388 (A), 1995. 1-7.
6. Rajesh A. Thakkerv, Mayank Shrivastava, Maryam Shojaei Baghini, Dinesh Kumar Sharma, Ramgopal V. Rao, Mahesh B. Patil. Operational amplifier having improved slew rate / US Patent 8089314 (B2), 2012. 1-11.
7. Steven Obed Smith. Enhanced slew rate in amplifier circuits / US Patent 6456161(B2), 2002. 1-9.
8. Frank Murden, Carl W Moreland. n-bit analog-to-digital converter with n-1 magnitude amplifiers and n comparators / US Patent 5684419 (A), 1997. 1-23.
9. Yasuo Yamada, Kenji Yokoyama. Operational Amplifier / US Patent Appl. 2007069815, Mar. 29, 2007.
10. Рысин В.С., Ткаченко В.А. Операционный усилитель, А. св. СССР 970638, 30.10.1982.
11. Патент № 2282303 Российская Федерация, МПК8 H03F 3/45. Дифференциальный усилитель с нелинейным параллельным каналом: № 2005102144; заявл. 28.01.2005; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23 / Прокопенко Н.Н., Крюков В.В., Сергеев А.И.; заявитель ЮРГУЭС.
12. Прокопенко Н.Н. Дифференциальный усилитель с повышенным быстродействием // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 2. – С. 153-154.
13. Анисимов В.И., Капитонов М.В., Прокопенко Н.Н., Соколов Ю.М. Операционные усилители с непосредственной связью каскадов: монография. – Л.: Энергия, 1979. – 148 с.

14. Полонников Д.Е. Операционные усилители. Принципы построения, теория, схемотехника: монография. – М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1983. – 216 с.
15. Close J. High speed op amps: Performance, process and topologies // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Portland, OR, USA, 2012. – P. 1-8. – DOI: 10.1109/BCTM.2012.6352648.
16. Prokopenko N. N., Bugakova A.V., Titov A.E., Budyakov P.S. Features of Increasing the Fast Response of Differential Operational Amplifiers on the Basis of a "Folded" Cascode // 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 1978. – P. 1-3. – DOI: 10.1109/ICSICT.2018.8565782.
17. Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Bugakova A.V., Butyrlagin N.V. The method of speeding of the operational amplifiers based on the folded cascode // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, Armenia, 2016. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807722.
18. Прокопенко Н.Н., Чумаков В.Е., Клейменкин Д.В., Сергеенко М.А. Каскодный входной каскад быстродействующего операционного усилителя с нелинейной коррекцией переходного процесса: заявка на патент РФ № 2023104265; заявл. 27.02.23.
19. Patent US 4151483, 1979-04-24, Radiation-hardened transistor amplifiers / Thomas J Robe. fig. 3.
20. Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Бугакова А.В. Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков: монография, серия «Библиотека студента». – М.: СОЛОН-Пресс, 2021. – 200 с.

#### REFERENCES

1. Carter B., Mancini R. Op Amps for Everyone. 5th ed. Newnes, 2017, 484 p.
2. Prokopenko N.N., Budyakov A.S. Arkhitektura i skhemotekhnika bystrodeystvuyushchikh operatsionnykh usiliteley: monografiya [Architecture and circuitry of high-speed operational amplifiers: monograph]. Shakhty: Izd-vo YuRGUES, 2006, 231 p.
3. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Zhuk A.A. High-Speed Operational Amplifier with Differentiating Transient Correction Circuits, 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002969.
4. Johnson Jeffrey David. Slew rate enhancement circuit, US Patent 6831515 (B2), 2004. 1-11.
5. Sauer Don R. Rail to rail operational amplifier input stage, US Patent 5414388 (A), 1995. 1-7.
6. Rajesh A. Thakkerv, Mayank Shrivastava, Maryam Shojaei Baghini, Dinesh Kumar Sharma, Ramgopal V. Rao, Mahesh B. Patil. Operational amplifier having improved slew rate, US Patent 8089314 (B2), 2012. 1-11.
7. Steven Obed Smith. Enhanced slew rate in amplifier circuits, US Patent 6456161(B2), 2002. 1-9.
8. Frank Murden, Carl W Moreland. n-bit analog-to-digital converter with n-1 magnitude amplifiers and n comparators, US Patent 5684419 (A), 1997. 1-23.
9. Yasuo Yamada, Kenji Yokoyama. Operational Amplifier, US Patent Appl. 2007069815, Mar. 29, 2007.
10. Rysin V.S., Tkachenko V.A. Operatsionnyy usilitel', A. sv. SSSR 970638, 30.10.1982 [Operational amplifier, A. St. USSR 970638, 30.10.1982].
11. Prokopenko N.N., Kryukov V.V., Sergeenko A.I. Patent № 2282303 Rossiyskaya Federatsiya, MPK8 H03F 3/45. Differentsial'nyy usilitel' s nelineynym parallel'nym kanalom: № 2005102144 [Patent No. 2282303 Russian Federation, MPK8 H03F 3/45. Differential amplifier with non-linear parallel channel: No. 2005102144]; dec. 01/28/2005; publ. 20.08.2006, Bull. No. 23; applicant SRSUEAs.
12. Prokopenko N.N. Differentsial'nyy usilitel' s povyshennym bystrodeystviem [Differential amplifier with increased speed], Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and experimental technique], 1978, No. 2, pp. 153-154.
13. Anisimov V.I., Kapitonov M.V., Prokopenko N.N., Sokolov Yu.M. Operatsionnye usiliteli s neposredstvennoy svyaz'yu kaskadov: monografiya [Operational amplifiers with direct connection of cascades: monograph]. Leningrad: Energiya, 1979, 148 p.
14. Polonnikov D.E. Operatsionnye usiliteli. Printsipy postroeniya, teoriya, skhemotekhnika: monografiya [Operational amplifiers. Construction principles, theory, circuitry: monograph]. Moscow: Izd-vo «Energoatomizdat», 1983, 216 p.
15. Close J. High speed op amps: Performance, process and topologies, IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Portland, OR, USA, 2012, pp. 1-8. DOI: 10.1109/BCTM.2012.6352648.



16. Prokopenko N. N., Bugakova A.V., Titov A.E., Budyakov P.S. Features of Increasing the Fast Response of Differential Operational Amplifiers on the Basis of a "Folded" Cascode, *14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, 1978, pp. 1-3. DOI: 10.1109/ICSICT.2018.8565782.
17. Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Bugakova A.V., Butyrlagin N.V. The method of speeding of the operational amplifiers based on the folded cascade, *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, Armenia, 2016*, pp. 1-4. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807722.
18. Prokopenko N.N., Chumakov V.E., Kleymenkin D.V., Sergeenko M.A. Kaskodnyy vkhodnoy kaskad bystrodeystviyushchego operatsionnogo usilitelya s nelineynoy korrektsiey perekhodnogo protsessa: zayavka na patent RF № 2023104265; zayavl. 27.02.23 [Cascode input stage of a high-speed operational amplifier with non-linear transient correction: RF patent application No. 2023104265; dec. 27.02.23].
19. Thomas J Robe. Patent US 4151483, 1979-04-24, Radiation-hardened transistor amplifiers, fig. 3.
20. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Bugakova A.V. Proektirovanie nizkoterperaturnykh i radiatsionno-stoykikh analogovykh mikroskhem dlya obrabotki signalov datchikov: monografiya, seriya «Biblioteka studenta» [Design of low-temperature and radiation-resistant analog microcircuits for processing sensor signals: monograph, series "Student's Library"]. Moscow: SOLON-Press, 2021, 200 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

**Прокопенко Николай Николаевич** – Донской государственный технический университет; e-mail: prokopenko@sssu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79281201984; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой информационных систем и радиотехники.

**Клейменкин Дмитрий Владимирович** – e-mail: k-dima-01@mail.ru; тел.: +79281970049; магистрант.

**Сергеенко Марсель Алексеевич** – e-mail: mars1327el@gmail.com; тел.: +79185704519; студент.

**Prokopenko Nikolay Nikolayevich** – Don State Technical University; e-mail: prokopenko@sssu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79281201984; dr. of eng. sc.; professor; head of the department of information systems and radio engineering.

**Kleimenkin Dmitriy Vladimirovich** – e-mail: k-dima-01@mail.ru; phone: +79281970049; master's student.

**Sergeenko Marsel Alexeyevich** – e-mail: mars1327el@gmail.com; phone: +79185704519; student.

УДК 621.38

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-156-165

**В.В. Бахчевников, В.А. Деркачев, А.Н. Бакуменко**

## РЕАЛИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАННОГО ФИЛЬТРА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ НА ПЛИС

*Применение фильтров, согласованных с радиосигналами, достаточно распространено в радиолокации, что способствует улучшению разрешающей способности по дальности, а также в системах связи и многих других радиотехнических системах, позволяя увеличить выходного отношение сигнал-шум (ОСШ) по сравнению с входным. Проектирование цифровых устройств на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) типа FPGA (Field Programmable Gate Array) позволяет достаточно гибко их конфигурировать и создавать прототипы радиотехнических систем для дальнейшей реализации алгоритмов ЦОС на интегральных схемах специального назначения (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC), GPU, CPU и т.д. Цифровые устройства на ПЛИС находят широкое применение в мобильных системах низкой мощности, в то время как ASIC показывают наибольшую производительность, имея недостаток в виде высокой стоимости разработки. В работе особое внимание уделено проектированию и реализации фильтра, согласованного с комплексным ЛЧМ-сигналом, в частотной области на ПЛИС с помощью библиотеки для Matlab / Simulink Xilinx*

*System Generator for DSP. В статье приведены результаты работы программно-аппаратной модели как для одиночного точечного объекта, так и для трех точечных объектов с разными задержками. Показана зависимость выходного ОСШ от входного для линейного и квадратичного детектора огибающей, являющегося оконечным блоком согласованного фильтра. Проведено сравнение аналитической кривой  $OS_{\text{ВЫХ}}(OS_{\text{ВХ}})$  с кривой, полученной с помощью разработанной программно-аппаратной модели, реализуемой на ПЛИС. В работе показаны преимущества применения Xilinx System Generator для быстрого прототипирования ЦОС на ПЛИС, также приведен анализ используемых ресурсов ПЛИС для разработанного согласованного фильтра и его составляющих.*

*Согласованный фильтр; ПЛИС; Xilinx System Generator; HDL; цифровая обработка сигналов.*

**V.V. Bakhchevnikov, V.A. Derkachev, A.N. Bakumenko**

### **IMPLEMENTATION OF A MATCHED FILTER IN THE FREQUENCY DOMAIN ON FPGA**

*The use of filters matched to radio signals is quite common in radar, which helps to improve range resolution, as well as in communication systems and many other radio engineering systems, allowing you to increase the output signal-to-noise ratio (SNR). Designing digital devices on field programmable gate array (FPGA) allows us to configure them quite flexibly and create prototypes of radio engineering systems for further implementation of DSP algorithms, on application-specific integrated circuits (ASIC), GPU, CPU, etc. FPGA digital devices are most used in low power mobile systems, while ASICs show the highest performance with high development costs. In this work, special attention is paid to the design and implementation of a filter matched to a complex chirp signal in the frequency domain on an FPGA using the Xilinx System Generator for DSP library of Matlab/Simulink. The results of the hardware-software model operation are presented in paper both for a single point object and for three point objects with different sampled delays. The dependence of the output on the input SNR for a linear and quadratic envelope detector is shown. The analytical curve  $SNR_{\text{OUT}}(SNR_{\text{IN}})$  is compared with the curve obtained using the developed hardware-software model implemented on the FPGA. The paper shows the benefits of using Xilinx System Generator for rapid prototyping of DSPs on FPGAs, and it provides an analysis of the used FPGA resources for the developed matched filter.*

*Matched filter; FPGA; Xilinx System Generator; HDL; DSP.*

**Введение.** На практике, в принимаемом радиосигнале всегда присутствует аддитивная помеха. Следовательно, радиолокационная станция (РЛС) при приеме должна обрабатывать этот зашумленный сигнал перед отображением информации об обнаруженных объектах. Чтобы максимизировать отношение сигнал-шум (ОСШ) в РЛС с широким спектром (большой базой сигнала) в присутствии аддитивного случайного шума эффективно применять согласованный фильтр с излучаемым сигналом [1, 2]. Согласованные фильтры имеют множество применений: автомобильные радары [3], системы связи [4], оптические радиотехнические системы [5] и др.

Развитие подавляющего большинства радиотехнических систем требует проектирования и реализации этих систем на высокопроизводительных цифровых устройствах. К таким устройствам относятся ASIC, ПЛИС и т.д. [6, 7]. Проблема быстрого прототипирования проектов, основанных на использовании цифровой фильтрации, для ПЛИС классическими методами (с помощью HDL-языков, графического программирования) заключается в том, что такой проект либо сложен и длителен в отладке, либо не оптимален получающийся код. Применение ПЛИС совместно с высокоуровневыми системами автоматизированного проектирования (например, Matlab) открывает возможность быстрого прототипирования цифровых устройств обработки радиотехнических сигналов, в том числе и алгоритмы построения искусственных нейронных сетей [8, 9]. Для ПЛИС фирмы Xilinx это позволяет сделать связка Simulink Matlab с библиотеками Xilinx System Generator for DSP [10].

Существует ряд работ, посвященной разработке согласованных фильтров различного применения на ПЛИС [11–14]. Однако анализ этих работ показал, что авторы либо применяли классические подходы к разработке СФ [11, 14], либо разрабатывали СФ во временной области [13, 14]. В данной статье же показан способ быстрого прототипирования цифрового согласованного фильтра на ПЛИС с помощью Xilinx System Generator, проанализированы производительность, ресурсоемкость, а также точность работы такой схемы.

**Постановка задачи.** В работе стоит задача исследования реализации на ПЛИС согласованного фильтра с ЛЧМ-сигналом как с точки зрения производительности, так и с точки зрения ресурсоемкости.

Ниже на рис. 1 приведена функциональная схема системы согласованного фильтра в частотной области [15], подготовленная для реализации на ПЛИС.

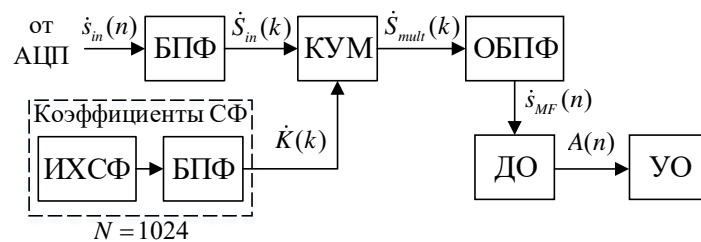


Рис. 1. Функциональная схема системы согласованного фильтра

БПФ – блок цифрового быстрого преобразования Фурье;

ИХСФ – импульсная характеристика согласованного фильтра;

КУМ – блок комплексного умножителя;

ОБПФ – блок цифрового обратного быстрого преобразования Фурье;

ДО – детектор огибающей комплексного сигнала;

УО – устройство отображения и устройство принятия решений.

Комплексный дискретный ЛЧМ-импульс математически характеризуется выражением [16]

$$\dot{s}_in(n) = \text{rect}\left[\frac{n}{T}\right] \exp\left[2\pi j\left(\frac{f_{Ц}}{F_{Д}}n + \frac{1}{2}\gamma n^2\right)\right], \quad (1)$$

где  $\text{rect}[u] = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases}$ ,  $f_{Ц}$  – центральная частота,  $f_{Д}$  – частота дискретизации,

$T$  – длительность ЛЧМ-импульса в отсчетах,  $\gamma$  – скорость модуляции,  $n$  – дискретное время.

Сигнал на выходе СФ во временной области можно представить в виде [17]

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (2)$$

где  $h(t-\tau)$  – импульсная характеристика СФ. Импульсная характеристика СФ имеет отзеркаленную форму сигнала, на который фильтр согласован:  $h(t) = x(T-t)$ .

В частотной области дискретный сигнал на выходе СФ имеет вид

$$\dot{s}_{MF}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \dot{S}_{mult}(k) \cdot \exp\left(\frac{2\pi j}{N}kn\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \dot{K}(k) \cdot \dot{S}_in(k) \cdot \exp\left(\frac{2\pi j}{N}kn\right), \quad (3)$$

где  $\dot{S}_{in}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{s}_{in}(n) \cdot \exp\left(-\frac{2\pi j}{N} kn\right)$  – дискретный спектр входного сигнала,  
 $\dot{K}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \cdot \exp\left(-\frac{2\pi j}{N} kn\right)$  – спектральные коэффициенты СФ, N – длина БПФ и ОБПФ.

В целях уменьшения потребления ресурсов ПЛИС блок ДО реализуется без применения достаточно затратной операции «корень квадратный». Таким образом на выходе ДО формируется сигнал вида

$$A(n) = \text{Re}\left[\dot{s}_{MF}(n)\right]^2 + \text{Im}\left[\dot{s}_{MF}(n)\right]^2, \quad (4)$$

По выражению (4) и анализируются основные погрешности работы программно-аппаратной модели в Xilinx System Generator for DSP по сравнению с аналитическими результатами.

**Схема согласованного фильтра для ПЛИС.** Согласно рис. 1 была спроектирована схема согласованного фильтра для реализации на ПЛИС (рис. 2), собранная на блоках библиотеки Matlab/Simulink Xilinx System Generator for DSP. Основными блоками являются: 2 блока Fast Fourier Transform 7.1 (первый – для осуществления прямого БПФ и второй – для обратного БПФ), блоки ОЗУ ROM\_reS и ROM\_imS – для хранения коэффициентов СФ  $\dot{K}(k)$ , блок комплексного множителя Complex Multiplier 3.1, а также выходные блоки обычных умножителей и сумматора для реализации ДО, строящимся согласно выражению (4).

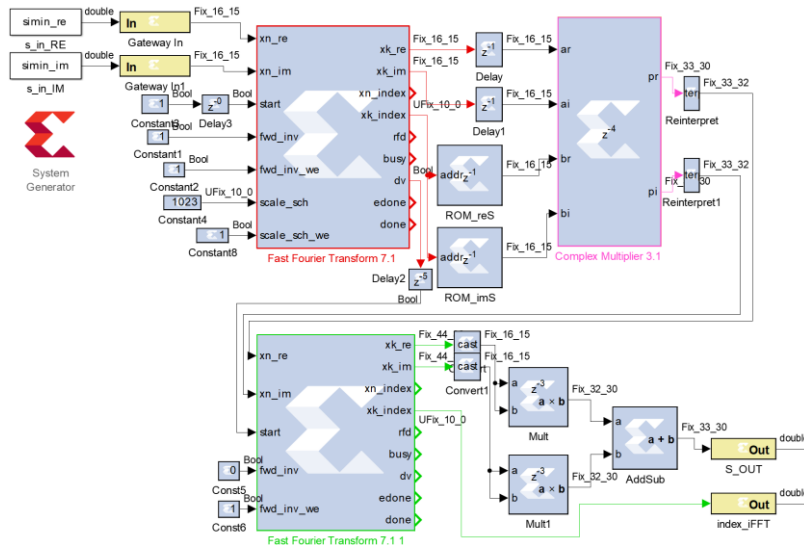


Рис. 2. Цифровая схема согласованного фильтра для реализации на ПЛИС

Принимаемый комплексный сигнал, а также входные блоки схемы работают с фиксированной точкой точностью 16 бит, выходной же сигнал имеет точность 32 бита. Входной сигнал  $\dot{s}_{in}(n)$  из выражения (1) генерируется с помощью Matlab.

В ходе модельных экспериментов был использован СФ, согласованный с комплексным ЛЧМ-импульсом со спектром, перекрывающим весь диапазон возможных частот от 0 до  $F_d$  (рис. 3).

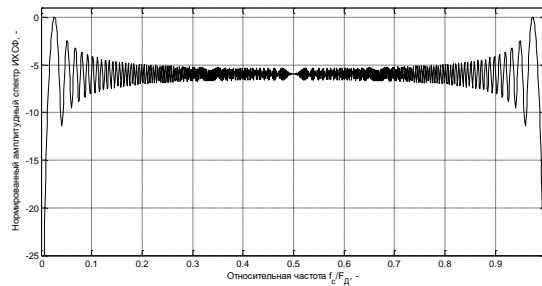


Рис. 3. Нормированный амплитудный спектр импульсной характеристики СФ, согласованного с комплексным ЛЧМ-сигналом

**Результаты моделирования.** Проведем анализ работы показанной выше схемы и рассмотрим полученные результаты моделирования. При моделировании (software co-simulation) были использованы блоки, совместимые с ПЛИС Xilinx xc4vsx35-10f866 (отладочная плата серии ML402). При этом необходимо понимать, что данная схема может быть применима также к другим ПЛИС 4-го поколения. Для более старшего поколения ПЛИС (серии Virtex7, Kintex7 и т.д.) некоторые блоки должны быть обновлены до более новых версий (например, Fast Fourier Transform 7.1, необходимо заменить на Fast Fourier Transform 8.0).

На рис. 4 показаны временные диаграммы некоторых сигналов модели СФ на блоках Xilinx System Generator for DSP, собранной в соответствии со схемой из рис. 1. Здесь «s\_in\_RE» соответствует  $\text{Re}[\dot{s}_{in}(n)]$ , «S\_RE» –  $\text{Re}[\dot{S}_{in}(k)]$ , «Smult\_RE» –  $\text{Re}[\dot{S}_{mult}(k)]$ , «S\_out\_dB» =  $20 \log_{10} A(n)$ .

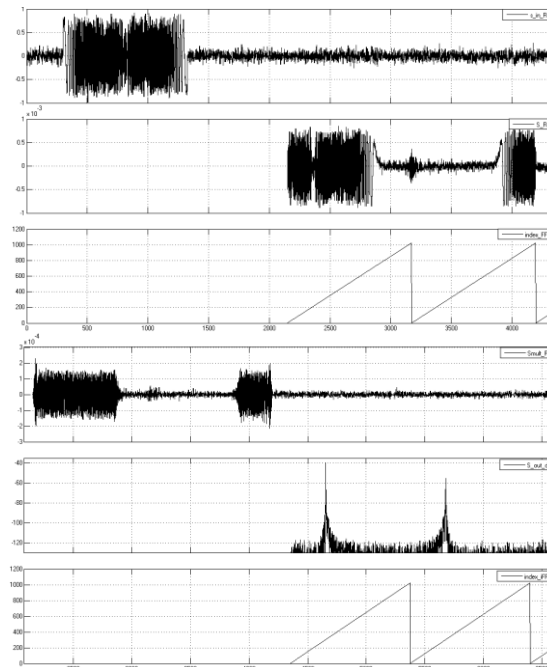


Рис. 4. Временные диаграммы работы модели СФ на блоках Xilinx System Generator for DSP

В данном случае принимаемый сигнал имел задержку 300 отсчетов, и по причине того, что размер окна БПФ соответствовал длине опорного сигнала (1024 отсчета), отклик СФ после ДО имеет одну составляющую в первом периоде БПФ и другую – во втором. Для устранения данного эффекта необходимо применять алгоритм со «скользящим» окном, либо иметь в наличии несколько СФ, работающих с разной начальной задержкой, перекрывающих полностью окно анализа.

На рис. 5 приведены результаты работы программно-аппаратной модели как для одиночного точечного объекта, так и для трех точечных объектов.

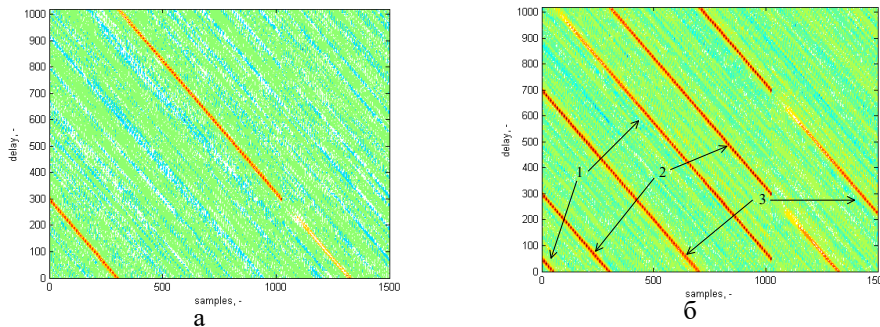


Рис. 5. Отклик СФ при ОСШ = 0 дБ: а) для одиночного точечного объекта с задержкой 300 отсчетов, б) для трех точечных объектов с задержками 50 (1), 300 (2) и 700 (3) отсчетов

Входные каскады цифрового СФ для реализации на ПЛИС были выполнены на основе вычислений 16-битной точности, что значительно уменьшает затраты, жертвуя эффективностью вычислений для частот сигнала, близких к частоте дискретизации. В табл. 1 приведено количество потребляемых ресурсов для одного блока БПФ для разрядностей: 8, 16, 32 бит.

Таблица 1

Используемые ресурсы ПЛИС для блока БПФ

Название ресурса	Регистры	4-входовые LUT	FIFO16/ RAMB16	DSP48
Разрядность, бит				
8	2433	2977	2	12
16	3245	4584	3	16
32	8573	10449	6	48

Было проведено моделирование зависимости выходного ОСШ от входного при обработке одиночного ЛЧМ-импульса. При этом были получены результаты для аналитической зависимости  $ОСШ_{ВЫХ}(ОСШ_{ВХ})$  с линейным и квадратичным ДО, а также получена функция  $ОСШ_{ВЫХ}(ОСШ_{ВХ})$  для разрабатываемой схемы СФ в System Generator с квадратичным ДО (см. рис. 6).

Относительно большие значения доверительных интервалов связаны с небольшой генеральной выборкой для каждого входного ОСШ (по 10 реализаций сигнала для каждого значения). Однако, несмотря на это, результаты из рис.6 позволяют сделать несколько выводов: 1) практически линейный характер зависимости выходного ОСШ от входного, 2) квадратичное ДО обеспечивает не только уменьшение затрат ресурсов ПЛИС, но и увеличивает  $ОСШ_{ВЫХ}$  вместе с крутизной функции  $ОСШ_{ВЫХ}(ОСШ_{ВХ})$ , 3) для достоверного приема сигнала необходимо обеспечить значения входного ОСШ как минимум -16дБ, как для схемы с линейным ДО, так и с квадратичным.

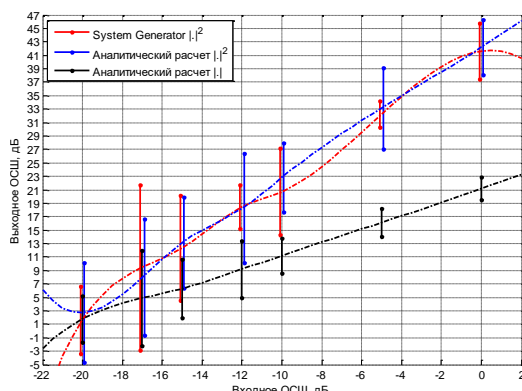


Рис. 6. Зависимость выходного ОСШ от входного

В табл. 2 приведено количество потребляемых ресурсов для всей схемы СФ, представленной на рис. 2, где вычисления выполняются с 16-битной точностью.

Таблица 2

#### Используемые ресурсы ПЛИС для полной схемы СФ

Название ресурса	Использование	Общее число	Процент от общего числа, %
Регистры	12867	30720	41
4-входовые LUT	16203	30720	52
FIFO16/RAMB16	11	192	5
DSP48	90	192	46

**Заключение.** Рассматриваемая цифровая система согласованной фильтрации была проанализирована для реализации на ПЛИС Xilinx Virtex 4 и может работать на тактовых частотах до 148 МГц. Для увеличения тактовой частоты необходимо оптимизировать реализацию блоков БПФ, комплексного умножителя и ДО, что повлечет за собой увеличение используемых ресурсов ПЛИС, а также увеличение задержки получения отклика СФ.

В результате анализа погрешностей работы разработанной модели можно заключить, что ошибка значений отклика СФ на выходе ДО не превышает 10 % по сравнению с аналитическими результатами для квадратичного ДО. Стоит также отметить, что применение квадратичного ДО в разработанной схеме обеспечивает не только уменьшение затрат ресурсов ПЛИС, но и увеличивает  $OSШ_{ВЫХ}$  вместе с крутизной функции  $OSШ_{ВЫХ}(OSШ_{ВХ})$ . Анализ зависимости  $OSШ_{ВЫХ}(OSШ_{ВХ})$  показал, что для достоверного приема сигнала необходимо обеспечить значения входного ОСШ как минимум -16дБ, как для схемы с линейным ДО, так и с квадратичным.

Для реализации конфигурируемого СФ, способного в процессе работы настраиваться на различные радиосигналы, существуют методы оптимизации структуры согласованного цифрового фильтра с изменяемыми коэффициентами [18]. Для того, чтобы реализовать схему с длительным когерентным накоплением отраженного сигнала от радиолокационных целей можно применять алгоритмы, рассмотренные в работе [19]. Способы уменьшения боковых лепестков и улучшения энергетике отклика СФ описаны в работе [20]. Таким образом при реализации алгоритмов ЦОС на ПЛИС, в том числе и представленного алгоритма согласованной фильтрации в частотной области, необходимо искать компромисс между производительностью схемы и затратами цифровых компонентов при ее реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Cook C., Bernfeld M.* Radar signals. An Introduction to Theory and Application. – London : Academic Press Inc., 2012. – 568 p.
2. Патент № 2685972 РФ. МПК H03M 1/00. № 2017142004. Способ и устройство фильтрации частотно-модулированных сигналов / *Володин И.Н.* Акционерное общество "Все-российский научно-исследовательский институт радиотехники". Заявл. 01.12.2017; Опубл. 23.04.2019.
3. *Alland S. et al.* Interference in automotive radar systems: Characteristics, mitigation techniques, and current and future research // *IEEE Signal Processing Magazine*. – 2019. – Vol. 36, No. 5. – P. 45-59.
4. *Harris F.J.* Multirate signal processing for communication systems. – 2nd ed. – Alsbjergvej (Denmark): CRC Press, 2022. – 557 p.
5. *Wang H. et al.* Adaptive channel-matched detection for C-band 64-Gbit/s optical OOK system over 100-km dispersion-uncompensated link // *Journal of Lightwave Technology*. – 2020. – Vol. 38, No. 18. – P. 5048-5055.
6. *Xin W. et al.* Several Implementation Methods of Signal Processing Algorithm Based on FPGA // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 565, No. 1. – P. 012010.
7. *Xu Y., Shuang K.* Implementation of high order matched filter on a FPGA chip // 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing. – IEEE, 2011. – Vol. 5. – P. 2526-2530.
8. *Бахчевников В.В., Деркачев В.А., Бакуменко А.Н.* Способ использования средств быстрого прототипирования для реализации сверточной нейронной сети на ПЛИС // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2020. – №. 3 (213). – P. 146-156.
9. *Бахчевников В.В., Деркачев В.А., Бакуменко А.Н.* Метод разработки искусственных нейронных сетей для прототипирования на ПЛИС с помощью средств Xilinx System Generator и Matlab // *Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении "КомТех-2020"*. – 2020. – P. 462-468.
10. *Mittal S., Gupta S., Dasgupta S.* System generator: The state-of-art FPGA design tool for dsp applications // Third International Innovative Conference on Embedded Systems, Mobile Communication And Computing (ICEMC2 2008). – 2008. – P. 187-190.
11. *Diouri O. et al.* Comparison study of hardware architectures performance between FPGA and DSP processors for implementing digital signal processing algorithms: Application of FIR digital filter // *Results in Engineering*. – 2022. – Vol. 16. – P. 100639.
12. *Baker Z.K., Gokhale M.B., Tripp J.L.* Matched filter computation on FPGA, Cell and GPU // 15th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM 2007). – IEEE, 2007. – P. 207-218.
13. *Chanda V.B., Chakravarti M., Roy K.* Range mapping of moving target by implementing matched filter in FPGA // 2011 Annual IEEE India Conference. – IEEE, 2011. – P. 1-4.
14. *Chang A. et al.* Design and analysis of single-bit ternary matched filter // *Wireless Personal Communications*. – 2019. – Vol. 106. – P. 1915-1929.
15. *Sack M., Ito M.R., Cumming I.G.* Application of efficient linear FM matched filtering algorithms to synthetic aperture radar processing // *IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing)*. – IET Digital Library, 1985. – Vol. 132, No. 1. – P. 45-57.
16. *Wu L. et al.* ISAR imaging of targets with complex motion based on discrete chirp Fourier transform for cubic chirps // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 50, No. 10. – P. 4201-4212.
17. *Othman M.A.B., Belz J., Farhang-Boroujeny B.* Performance analysis of matched filter bank for detection of linear frequency modulated chirp signals // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2017. – Vol. 53, No. 1. – P. 41-54.
18. *Артемиев В.В., Круглов А.В., Сорокин И.А.* Оптимизация структуры согласованного цифрового фильтра с изменяемыми коэффициентами при реализации на программируемых логических интегральных схемах // *Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе*. – 2021. – С. 120-123.
19. *Козлов С.В., Кыюнг Л.В.* Алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели в спектральной области // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. – 2021. – Т. 19, №. 5. – С. 35-44.
20. *Pollakowski M., Ermert H.* Chirp signal matching and signal power optimization in pulse-echo mode ultrasonic nondestructive testing // *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. – 1994. – Vol. 41, No. 5. – P. 655-659.



## REFERENCES

1. Cook C., Bernfeld M. Radar signals. An Introduction to Theory and Application. London: Academic Press Inc., 2012, 568 p.
2. Volodin I.N. Patent № 2685972 RF. MPK H03M 1/00. № 2017142004. Sposob i ustroystvo fil'tratsii chastotno-modulirovannykh signalov [Patent No. 2685972 of the Russian Federation. IPC H03M 1/00. No. 2017142004. Method and device for filtering frequency-modulated signals]. Joint-Stock Company "All-Russian Scientific Research Institute of Radio Engineering". Declared on 01.12.2017; Published on 23.04.2019.
3. Alland S. et al. Interference in automotive radar systems: Characteristics, mitigation techniques, and current and future research, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, Vol. 36, No. 5, pp. 45-59.
4. Harris F.J. Multirate signal processing for communication systems. 2nd ed. Alsbjergvej (Denmark): CRC Press, 2022, 557 p.
5. Wang H. et al. Adaptive channel-matched detection for C-band 64-Gbit/s optical OOK system over 100-km dispersion-uncompensated link, *Journal of Lightwave Technology*, 2020, Vol. 38, No. 18, pp. 5048-5055.
6. Xin W. et al. Several Implementation Methods of Signal Processing Algorithm Based on FPGA, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019, Vol. 565, No. 1, pp. 012010.
7. Xu Y., Shuang K. Implementation of high order matched filter on a FPGA chip, *2011 4th International Congress on Image and Signal Processing*. IEEE, 2011, Vol. 5, pp. 2526-2530.
8. Bakhchevnikov V.V., Derkachev V.A., Bakumenko A.N. Sposob ispol'zovaniya sredstv bystrogo prototipirovaniya dlya realizatsii svertochnoy neyronnoy seti na PLIS [A method of using rapid prototyping tools to implement a convolutional neural network on FPGA], *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Technical sciences], 2020, No. 3 (213), pp. 146-156.
9. Bakhchevnikov V.V., Derkachev V.A., Bakumenko A.N. Metod razrabotki iskusstvennykh neyronnykh setey dlya prototipirovaniya na PLIS s pomoshch'yu sredstv Xilinx System Generator i Matlab [A method for developing artificial neural networks for prototyping on FPGAs using Xilinx System Generator and Matlab ], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" KomTekh-2020"* [Computer and information technologies in science, engineering and management"Komtech-2020"], 2020, pp. 462-468.
10. Mittal S., Gupta S., Dasgupta S. System generator: The state-of-art FPGA design tool for dsp applications, *Third International Innovative Conference On Embedded Systems, Mobile Communication And Computing (ICEMC2 2008)*, 2008, pp. 187-190.
11. Diouri O. et al. Comparison study of hardware architectures performance between FPGA and DSP processors for implementing digital signal processing algorithms: Application of FIR digital filter, *Results in Engineering*, 2022, Vol. 16, pp. 100639.
12. Baker Z.K., Gokhale M.B., Tripp J.L. Matched filter computation on FPGA, Cell and GPU, *15th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM 2007)*. IEEE, 2007, pp. 207-218.
13. Chanda V.B., Chakravarti M., Roy K. Range mapping of moving target by implementing matched filter in FPGA, *2011 Annual IEEE India Conference*. IEEE, 2011, pp. 1-4.
14. Chang A. et al. Design and analysis of single-bit ternary matched filter, *Wireless Personal Communications*, 2019, Vol. 106, pp. 1915-1929.
15. Sack M., Ito M.R., Cumming I.G. Application of efficient linear FM matched filtering algorithms to synthetic aperture radar processing, *IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing)*. IET Digital Library, 1985, Vol. 132, No. 1, pp. 45-57.
16. Wu L. et al. ISAR imaging of targets with complex motion based on discrete chirp Fourier transform for cubic chirps, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 10, pp. 4201-4212.
17. Othman M.A.B., Belz J., Farhang-Boroujeny B. Performance analysis of matched filter bank for detection of linear frequency modulated chirp signals, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, Vol. 53, No. 1, pp. 41-54.

18. Artem'ev V.V., Kruglov A.V., Sorokin I.A. Optimizatsiya struktury soglasovannogo tsifrovogo fil'tra s izmenyaemyimi koeffitsientami pri realizatsii na programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh [Optimization of the structure of a matched digital filter with variable coefficients when implemented on programmable logic integrated circuits], *Vysokie tekhnologii atomnoy otrasli. Molodezh' v innovatsionnom protsesse* [High technologies of the nuclear industry. Youth in the innovation process], 2021, pp. 120-123.
19. Kozlov S.V., Kyong L.V. Algoritmy dlitel'nogo kogherentnogo nakopleniya otrazhennogo signala pri nenulevykh vysshikh proizvodnykh dal'nosti do radiolokatsionnoy tseli v spektral'noy oblasti [Algorithms for long-term coherent accumulation of the reflected signal with non-zero higher derivatives of the range to the radar target in the spectral region], *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2021, Vol. 19, No. 5, pp. 35-44.
20. Pollakowski M., Ermert H. Chirp signal matching and signal power optimization in pulse-echo mode ultrasonic nondestructive testing, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 1994, Vol. 41, No. 5, pp. 655-659.

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

**Бахчевников Валентин Владимирович** – Южный федеральный университет; e-mail: bahchevnikov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79518289271; ст. преподаватель.

**Деркачев Владимир Александрович** – e-mail: vderkachev@sfedu.ru; тел.: +79614154733; ассистент.

**Бакуменко Алексей Николаевич** – e-mail: baku@sfedu.ru; тел.: +79886031853; ассистент.

**Bakhchevnikov Valentin Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: bahchevnikov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79518289271; senior lecturer.

**Derkachev Vladimir Aleksandrovich** – e-mail: vderkachev@sfedu.ru; phone: +79614154733; assistant.

**Bakumenko Aleksej Nikolaevich** – e-mail: baku@sfedu.ru; phone: +79886031853; assistant.

УДК 53.098

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-165-174

**И.В. Малышев, Н.В. Паршина, А.А. Охотникова**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ  
ЧАСТОТНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
АВТОДИННОГО ТИПА**

*В рамках дрейфово-диффузионной модели переноса носителей в объёме полупроводников типа  $A^{III}B^V$ , при внешнем воздействии сильных постоянных электрических и магнитных полей, ортогонально ориентированных относительно друг друга, предложен новый принцип применения обнаруженных эффектов, в которых учитываются нелинейности выходных параметров рабочего чипа, что приводит к возможности создания новых полупроводниковых структур, управляемых магнитным полем (МУПС). Ранее диффузионная компонента плотности выходного тока не учитывалась как отдельный эффект, возникающий при ортогональном воздействии сильных электрических и магнитных компонент, что было впервые рассмотрено в настоящей работе. Показано, что эта компонента входит в состав индукционного поперечного выходного тока и может быть рассмотрена, как самостоятельный эффект. В основе предложенного практического применения лежат классические соотношения, описывающие компонентное пространственное представление энергозависимости эффективной массы и параметров кинетических уравнений дрейфа и разогрева носителей в объёме структуры высокоподвижных полупроводников типа  $A^{III}B^V$ . (Зависимость от энергии величины обратной эффективной массы получена в предположении утяжеления этого параметра в рамках двухдоллинного представления. Однако, механизм такого увеличения детально не рассматривается, а учиты-*

вается как результат разложения в ряд Тейлора.) При этом гипотетически обнаружены также некоторые новые явления: диффузионный детекторный эффект и поперечный индукционный эффект, управляемый магнитным полем, аналогичный по своему проявлению эффекту Ганна в этом направлении. Полученные результаты открывают перспективу для создания принципиально новых частотно-преобразовательных устройств на базе вышеуказанных МУПС, таких как преобразователи (смесители) автодинного типа, одна из конструкций которых так же предложена в данной работе в волноводном исполнении. В случае экспериментального подтверждения обнаруженных эффектов, которые могут быть исследованы по предложенной в работе структурной схеме измерительной установки, можно сделать вывод о перспективных новых применениях магнитоуправляемых полупроводниковых структур. Кроме того, разработчикам будет интересна возможность использования угла ориентации магнитного поля для управления выходными параметрами таких структур в составе преобразователей частоты.

*Напряжённость электрического поля; индукция магнитного поля; эффективная масса; дрейфово-диффузионная модель; перенос носителей заряда; квазимпульс; кинетическая энергия горячих электронов; эффект Ганна.*

**I.V. Malyshev, N.V. Parshina, A.A. Okhotnikova**

### **APPLICATION OF ORTHOGONAL ORIENTED STRONG ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS TO CREATE FREQUENCY-CONVERTING DEVICES OF AUTODYNE TYPE**

*In the framework of the drift-diffusion model of carrier transport in the bulk of III–V type semiconductors, under external action of strong constant electric and magnetic fields orthogonally oriented relative to each other, a new principle for applying the discovered effects is proposed, which take into account the nonlinearities of the output parameters of the working chip, which leads to the possibility creation of new semiconductor structures controlled by a magnetic field (SSCMF). Previously, the diffusion component of the output current density was not taken into account as a separate effect arising under the orthogonal action of strong electric and magnetic components, which was at first time considered in this paper. It is shown that this component is a part of the inductive transverse output current and can be considered as an independent effect. The proposed practical application is based on the classical relations that describe the component spatial representation of the effective mass energy dependence and the parameters of the kinetic equations for the carriers drift and heating in the bulk of highly mobile III–V type semiconductors structures. (The energy dependence of the reciprocal effective mass value was obtained under the assumption that this parameter becomes heavier in the framework of the two-valley representation. However, the mechanism of such increasing is not considered in detail, but is taken into account as a result of expansion in a Taylor series.) At the same time, some new phenomena were also hypothetically discovered: a diffusion detector effect and a transverse induction effect controlled by a magnetic field, similar in its manifestation to the Gunn effect observed in this direction. The results obtained open the prospect for creating fundamentally new frequency-converting devices based on the above SSCMF, such as autodyne-type converters (mixers), one of the designs of which is also proposed in this work in a waveguide version. In the case of experimental confirmation of the discovered effects, which can be investigated using the block diagram of the measuring setup proposed in the work, we can conclude that there are promising new applications of magnetically controlled semiconductor structures. In addition, equipment developers will be interested in the possibility of using the magnetic field orientation angle to control the output parameters of such structures as part of converters.*

*Electric field strength; magnetic field induction; effective mass; drift-diffusion model; charge carrier transfer; quasi-pulse; kinetic energy of hot electrons; Gunn effect.*

**Введение.** При разработке смесительных устройств необходимо учитывать вопросы согласования смесительного (частотно-преобразовательного) узла с гетеродинным устройством [1–3]. Для этого необходимо использовать дополнительные внешние цепи. Избежать этих усложнений в схеме устройства позволит исключение из полной схемы смесителя узла гетеродина, что является путём создания смесителей автодинного типа, когда часть разрабатываемого смесителя содержит

гетеродинный блок в своём составе, т.е. используется в составе двух блоков: гетеродинном и смесительном. Это, конечно, требует дополнительных согласующих включений [3, 4]. Известно, что такие устройства ограничены частотными диапазонами их применения, но практическое удобство и достоинства применения таких упрощающих схематических решений является стимулом для разработки смесителей данного типа. Особую актуальность разработкам автодинных частотно-преобразовательных элементов микроволнового диапазона определяет освоение микро- и наноразмерных технологий, что также является благоприятным фактором.

**Компонентная дрейфово-диффузионная модель.** В основе работы предложенных смесительных узлов этих устройств лежит использование силы Лоренца, которая проявляет себя при одновременном ортогональном воздействии сильного постоянного электрического (с напряженностью  $\mathbf{E}$ ) и магнитного (с индукцией  $\mathbf{B}$ ) полей [5, 6]. На практике это проявляется в виде эффекта Холла, который широко используется в различных технических устройствах.

Напряженность внешнего электрического поля обуславливает проявление дрейфово-диффузионных процессов при перемещении горячих электронов [7], что приводит к формированию из них пространственных сгустков, проявляющих себя в виде «солитонов», имеющих большую скорость дрейфа [3, 8]. Известно также, что возможность реализации эффекта Ганна в объёме полупроводникового чипа с примесной концентрацией  $n$  и его физическими размерами определяется выполнением критерия Кремера [6, 9].

При рассмотрении кинетических эффектов, проявляемых при воздействии на электроны внешнего поля, важно знать каким образом происходит увеличение эффективной массы  $m$  с ростом кинетической энергии [10]. Так же известен эффект отрицательной эффективной массы при торможении носителей заряда во внешнем поле. В общем случае величина обратной эффективной массы  $1/m = d^2W/dp^2$  выступает в качестве коэффициента в дисперсионной зависимости  $W(p) = p^2/m$ . В дальнейших преобразованиях будем применять известное соотношение, описывающее энергозависимость  $1/m = f(W)$ , которое записывается как результирующее соотношение разложения этой функции в ряд Тейлора (ограничение двумя первыми членами ряда) [11–13]:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_0} \left[ 1 - p_m \frac{W - W_0}{W_0} \right], \quad (1)$$

( $m_0$  – величина эффективной массы электрона на дне зоны проводимости при  $T = 300\text{K}$  (при энергии  $W = W_0$  – средняя его энергия при комнатной температуре, которую, в ряде случаев, можно полагать равной энергии акустического фонона),  $p_m$  – безразмерная постоянная величина, соответствующая типу конкретной полупроводниковой структуры и определяемая из дрейфовой характеристики  $v(E)$  (в случае GaAs  $p_m = 0,1$ )) [12, 13].

Заметим, что уравнение (1) подразумевает в неявном виде эффект утяжеления эффективной массы который происходит при переходе электрона в боковую верхнюю долину [11, 12]. Также не учитывались и другие наиболее известные механизмы, описывающие данную зависимость в конкретных условиях (классическое и Кейновское отклонение дисперсии от квадратичного закона и др.)

Для рассмотрения кинетических процессов будем использовать феноменологический подход. Он предполагает использование систем дифференциальных уравнений сохранения (разогрева и дрейфа) [13, 14]:

$$\frac{dW}{dt} = eE p/m - (W - W_0) / \tau; \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = eE - \frac{p}{\tau}, \quad (3)$$

(где  $\tau$  и  $\tau_3$  – времена релаксации квазиимпульса  $p$  и энергии  $W$  соответственно;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона). В дальнейшем будем использовать стационарный случай этих уравнений.

После подстановки соотношения (2) в (1) (с учётом того, что  $E_{\text{п}} = m_0 W_0 / e^2 p_m \tau \tau_3$  – напряжённость порогового электрического поля эффекта Ганна) можно получить:

$$\frac{E}{E_{\text{п}}} = \sqrt{\frac{m}{m_0} p_m \left( \frac{W}{W_0} - 1 \right)}. \quad (4)$$

Рассмотрим структуру полупроводникового чипа на основе материала типа  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  с длиной рабочего участка  $L$  и площадью поперечного сечения  $S$  (рис.1), в условиях воздействия постоянного электрического поля с напряжённостью  $E_0$  и направленного вдоль оси  $x$ . В рамках данной модели будем определять это направление как ориентированное параллельно направлению перемещения носителей заряда дрейфующих под действием этого поля  $|E_0| = E_{0x}$ . Кроме того на этот образец также воздействует постоянное магнитное поле с индукцией  $B$ , приложенной под углом  $\alpha$  по отношению к оси  $z$ , что определяет  $B_z = |B| \cos \alpha$  (проекция  $B$  на ось  $z$ ). Такая конструкция может рассматриваться как магнитоуправляемая полупроводниковая структура (МУПС) [13, 14].

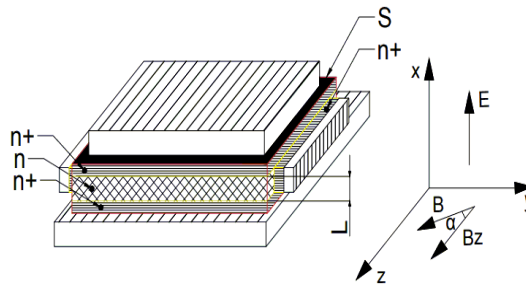


Рис. 1. Топология размещения слоёв чипа МУПС

**Расчёт и анализ.** В рамках предложенной дрейфово-диффузионной модели рассмотрим влияние сильного магнитного поля на значение коэффициента диффузии и дрейфовые параметры МУПС.

Известно [15], что дрейфовая скорость носителей заряда в полупроводнике, при воздействии магнитного поля, приобретает Холловскую (поперечную) составляющую. Тогда уравнения для средней электронной кинетической энергии  $W$ , и для эффективной массы (1), будут иметь осевые ( $x$  и  $y$ ) составляющие, т.е. [12]:

$$\frac{1}{m_x} = \frac{1}{m_0} \left[ 1 - p_m \frac{W_x - W_0}{W_0} \right]; \quad \frac{1}{m_y} = \frac{1}{m_0} \left[ 1 - p_m \frac{W_y - W_0}{W_0} \right]. \quad (5)$$

Уравнения дрейфа и разогрева (2) и (3) в компонентной форме будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= \frac{eE_{0x}}{m_x} - \frac{v_x}{\tau}; & \frac{dv_y}{dt} &= \frac{eE_B}{m_y} - \frac{v_y}{\tau}; & \frac{dW_x}{dt} &= eE_{0x}v_x - \frac{W_x - W_0}{\tau}; \\ & & & & \frac{dW_y}{dt} &= eE_B v_y - \frac{W_y - W_0}{\tau}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $eE_B = ev_x B_z$  – сила Лоренца, направленная вдоль оси  $y$ .

В результате решения стационарного случая уравнений (2) – (3) [12, 16] и учитывая, что эффективная масса носителей представлена в виде (5), получаются соотношения для компонент кинетической энергии:

$$W_x = eE_{0x}v_{x0} + W_0; \quad W_y = eE_B v_{y0} + W_0;$$

$$v_x = \frac{W_x - W_0}{eE_{0x}}; \quad v_y = \frac{W_y - W_0}{eE_B}.$$

Далее определяем:  $\frac{W_x}{W_0} = 1 + \frac{z}{p_m(1+z)}$ ;  $\frac{W_y}{W_0} = 1 + \frac{z_B}{p_m(1+z_B)}$ , где введены параметры:  $z = E_{0x}^2/E_{\Pi}^2$ ,  $z_B = E_B^2/E_{\Pi}^2$ .

Поскольку, согласно известному соотношению Эйнштейна:  $D_0 = \frac{2}{3} \frac{W_0}{m_0}$  – коэффициент диффузии без воздействия внешних полей [4, 17], можно записать в нормированном виде соотношения для осевых компонент коэффициента диффузии:

$$\frac{D_x}{D_0} = \frac{z + p_m(z+1)}{p_m(z+1)^2}; \quad \frac{D_y}{D_0} = \frac{z_B + p_m(z_B+1)}{p_m(z_B+1)^2}. \quad (7)$$

Эти соотношения в зависимости от  $E_{0x}/E_{\Pi}$  и  $B_z$  приведены на рис. 2–4.

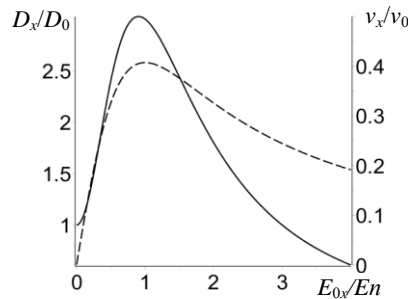


Рис. 2. Нормированные полевые зависимости компонент продольного коэффициента диффузии  $D_x/D_0$  (сплошная линия) и продольной дрейфовой скорости  $v_x/v_0$  (пунктирная линия)

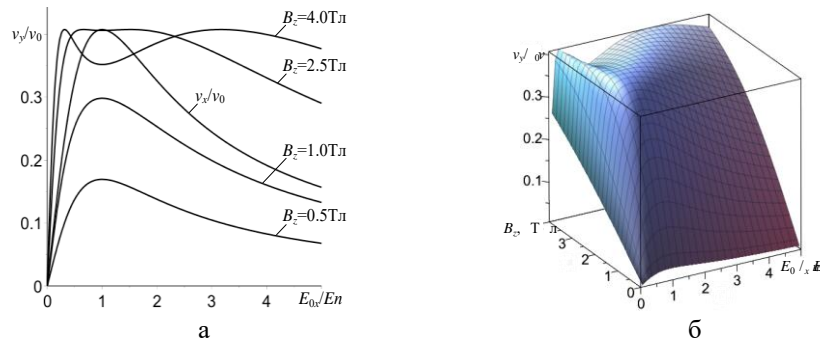


Рис. 3. Полевые поперечные дрейфовые индукционные (ось  $y$ ) зависимости  $v_y/v_0 = f(E_{0x}/E_{\Pi}, B_z)$  и  $v_x/v_0 = f(E_{0x}/E_{\Pi})$  (ось  $x$ ), (а), их трехмерное изображение (б)

Очевидно, что электрическое поле вдоль продольной  $x$  оси сильно влияет на вид как дрейфовой скорости, так и коэффициента диффузии, при полном отсутствии какой-либо зависимости этих осевых компонент от поперечного ( $z$ ) магнитного поля [18].

Построенные на рис. 4 графики электрических и магнитных характеристик (ось  $y$ ) поперечных компонент индукционного коэффициента диффузии демонстрируют сильную зависимость этого параметра от индукции внешнего магнитного поля [19].

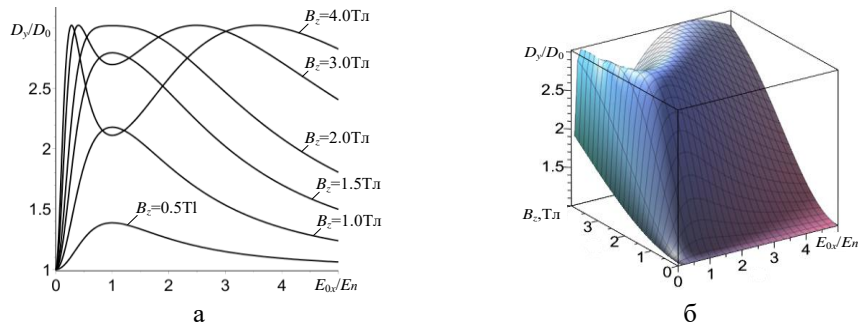


Рис. 4. Электромагнитные характеристики коэффициента поперечного диффузии  $D_y/D_0 = f(E_{0x}/E_{П}, B_z)$  (а), их трехмерное изображение (б)

Анализ полученных кривых на рис. 3 и 4 для дрейфовых и диффузионных компонент  $v_y/v_0 = f(E_{0x}/E_{П}, B_z)$  и  $D_y/D_0 = f(E_{0x}/E_{П})$  показывает, что диффузионные процессы в условиях сильных магнитных полей с индукцией  $B_z = 3$  Тл и выше демонстрируют появление ещё одного максимума. При этом графики приобретают более нелинейный вид.

**Применение результатов моделирования.** Поскольку на поперечных дрейфовых характеристиках рис.3 имеется падающий участок (что будет иметь место и на ВАХ структуры), можно сделать предположение, что этот активный поперечный участок объёма полупроводника будет проявлять свойства структуры, в которой может быть реализован эффект Ганна, а напряженность порогового поля этого эффекта будет зависеть от магнитного поля (МП) [19–21] (рис. 5 и 6). Также из расчётов видно, что при таких сильных полях (при  $B_z = 4$  Тл) эта напряжённость будет в 2 раза меньше, чем в его отсутствии. Таким образом понятно, что КПД такого гетеродинного генератора на таком поперечном объёмном диоде будет выше, поскольку в этом случае будет ниже количество выделяемой тепловой мощности. Указанный генераторный узел может быть создан на базе МУПС, входящей в состав схемы генератора (при соблюдении условий баланса амплитуд и фаз).

При этом такой генератор может быть применён в качестве гетеродинного в составе смесителя автодинного типа (автодинного преобразователя частоты) [1, 20], в котором продольный участок объёмной структуры (ось  $x$ ) представляет собой смесительный нелинейный полупроводниковый элемент (НПЭ). При подаче на этот смесительный НПЭ положительного напряжения смещения (напряжения рабочей точки) и переменного внешнего напряжения сигнала, получается смеситель, у которого контур промежуточной частоты может быть размещён параллельно с образцом структуры при обеспечении ёмкостной развязки по постоянному току [21] (рис. 5).

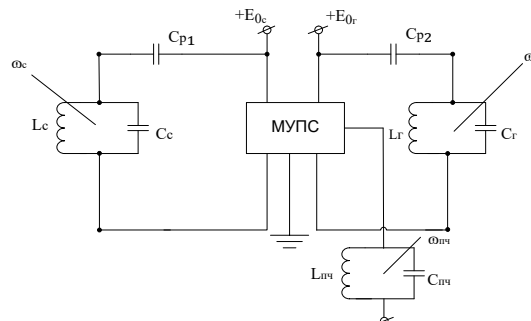


Рис. 5. Обобщённая структурная схема смесителя на МУПС

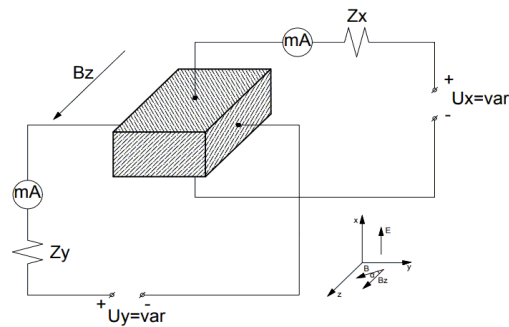


Рис. 6. Эскиз подключений для проведения экспериментальных исследований статических характеристик МУПС

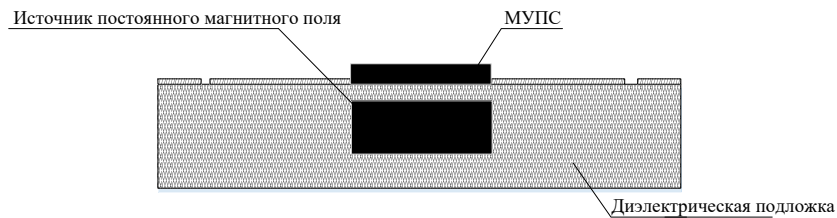


Рис. 7. Структурный эскиз размещения конструкции МУПС на диэлектрической подложке внутри волновода

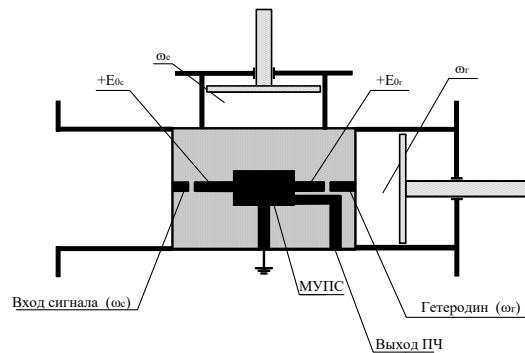


Рис. 8. Двухмерное схематическое представление смесителя волноводного типа

Волноводный вариант предложенного смесителя приведён в эскизном виде на рис. 7 и 8. Его прикладное достоинство заключается в том, что представляется возможность исключить из конструкции автономный гетеродинный генератор, а управление перестройкой частоты внутреннего гетеродина осуществлять как путём изменения величины индукции  $B$ , так и вариацией угла её ориентации относительно оси направления дрейфа.

**Заключение.** В результате проведенных расчётов с предлагаемым компонентным представлением дрейфовой скорости, эффективной массы и коэффициента диффузии от энергии определена практическая целесообразность и простота нахождения выходных параметров рабочего смесительного чипа для приборов микроволнового диапазона. В рамках феноменологического рассмотрения предложен способ определения компонент коэффициента диффузии при воздействии на полупроводник силь-



ных электрических и магнитных полей (и, как частный случай, обнаружение нового диффузионного детекторного эффекта). Полученные результаты позволяют предложить возможность создания нового класса преобразовательных устройств с характеристиками, управляемыми величиной индукции магнитного поля и ориентацией этого поля относительно направления дрейфа носителей заряда.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Усанов Д.А.* Эффект автодиного детектирования в генераторе на диоде Ганна с низкочастотным колебательным контуром в цепи питания // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 46, № 12. – С. 1497-1500.
2. *Malyshev I.V., Fil K. A., Goncharova O.A.* Determination of the Bulk Conductivity of III–V Semiconductors in a Strong Constant Electric Field and under Harmonic Effects // Semiconductors. – 2019. – Vol. 53, No. 15. – P. 1979-1982.
3. *Heinrich H., Keeler W.* Gunn Effect Threshold and Domain Formation in Transverse Magnetic Fields in Indium Antimonide // Applied Physics Letters. – 1972. – No. 4. – P. 171-172.
4. *Peter Y.Yu. Manuel Cardona.* Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. – 793 p.
5. *Levinshtein M.E., Nasledov D.N., Shur M.S.* Magnetic Field Influence on the Gunn Effect // PSS B. – 1969. – No. 2. – P. 897-903.
6. *Мальшиев И.В., Осадчий Е.Н., Гончарова О.А.* Разработка частотных преобразователей, использующих дрейфовые и диффузионные объёмные нелинейности в условиях действия внешних сильных электрических и магнитных полей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 126-142.
7. *Короновский А.А., Храмов А.Е., Москаленко О.И. и др.* Исследование влияния случайных флуктуаций концентрации легирующей примеси на ток в полупроводниковых сверхрешетках // Матер. 22-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012), Sevastopol, Crimea. – 2012. – P. 183-184.
8. *Мальшиев И.В., Осадчий Е.Н., Филь К.А.* Способы учёта энергозависимости эффективной массы горячих носителей в объёме полупроводников типа АІІІВV для различных случаев дисперсии // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4. – ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4396.
9. *Мальшиев И.В., Гончарова О.А.* Исследование собственной КВЧ проводимости полупроводников // Наука и образование на рубеже тысячелетий: Сб. научно-исследовательских работ. – 2018. – Вып. 1. – С. 168-174.
10. *Malyshev I.V., Fil K.A., Parshina N.V.* Nonlinearity of the Diffusion Coefficient of Hot Carriers in the Bulk of the Semiconductor under the Action of Electric and Magnetic Fields // Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 6, No. 3. – P. 923-927.
11. *Sitangshu Bhattacharya, Kamakhya Prasad Ghatak.* Effective Electron Mass in Low-Dimensional Semiconductors // Series in Materials Science. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. – Vol. 167. – 535 p.
12. *Fischetti M.V., Vandenbergh W.G.* Advanced Physics of Electron Transport in Semiconductors and Nanostructures. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 474 p.
13. *Malyshev I.V., Goncharova O.A., Fedotov A.A.* Comparative Analysis of Charge Carriers Effective Mass Energy Dependences in the Various Semiconductors under Conditions of Strength and Extra Strength Electric External Fields Action // Proceedings of 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) – 2021, Divnomorskoe, Russia. – P. 125- 128.
14. *Malyshev I.V., Goncharova O.A.* The Possibility of Creating a New Class of Frequency Converting Devices Based on The Bulk of АІІІВV Type Semiconductor Structures with Parameters Controlled by Strong Electric and Magnetic Fields // Proceedings of 2019 International Conference on Radiation Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2019, Divnomorskoye, Krasnodar Region, Russia. – P. 188-191.
15. *Sungjung Joo, Taeyueb Kim, Sang Hoon Shin, et al.* Magnetic-field-controlled Reconfigurable Semiconductor Logic // Nature. – 2013. – Vol. 494. – P. 72-76.
16. *Malyshev I.V., Fil K.A., Parshina N.V.* The Dependence of the Diffusion Coefficient in Semiconductor Materials under the Influence of the External Strong Magnetic and Electric Fields // Materials of 2017 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications – 2017, Jabalpur, India. – P. 142-143.

17. *Trovato M., Reggiani L.* Maximum Entropy Principle within a Total Energy Scheme: Application to Hot-Carrier Transport in Semiconductors // *Physical Review*. – 2000. – Vol. 61, No. 24. – P. 16667-16681.
18. *Fromhold T.M., Krokhin A.A., Wilkinson P.B., et al.* Chaotic Quantum Transport in Superlattices // *UFN*. – 2001. – 44:10 suppl. – P. 24-27.
19. *Fowler D., Hardwick D., Patané A. et al.* Magnetic-Field-Induced Miniband Conduction in Semiconductor Superlattices // *Physical Review*. – 2007. – Vol. 76, No. 24. – P. 245303.
20. *Сельский А.О., Короновский А.А., Москаленко О.И. и др.* Влияние межминизонного тунелирования на генерацию тока в полупроводниковой сверхрешётке // *Журнал технической физики*. – 2015. – Вып. 4. – С. 62-66.
21. *Malyshev I.V., Parshina N.V., Goncharova O.A.* Behavior of Bulk Semiconductor Structures and Superlattices Output Parameters under the Influence of Strong External Constant and Alternative Electric Fields // *Proceedings of 10th Anniversary International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2021–2022) Divnomorsk, Russia, May 23–27, 2022.* – P. 192-193.

#### REFERENCES

1. *Usanov D.A.* Effekt avtodinnogo detektirovaniya v generatore na diode Ganna s nizko-chastotnym kolebatel'nym konturom v tsepi pitaniya [The effect of autodyne detection in a Gunn diode oscillator with a low-frequency oscillatory circuit in the power circuit], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1996, Vol. 46, No. 12, pp. 1497-1500.
2. *Malyshev I.V., Fil K. A., Goncharova O.A.* Determination of the Bulk Conductivity of III–V Semiconductors in a Strong Constant Electric Field and under Harmonic Effects, *Semiconductors*, 2019, Vol. 53, No. 15, pp. 1979-1982.
3. *Heinrich H., Keeler W.* Gunn Effect Threshold and Domain Formation in Transverse Magnetic Fields in Indium Antimonide, *Applied Physics Letters*, 1972, No. 4, pp. 171-172.
4. *Peter Y.Yu.* Manuel Cardona. Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 793 p.
5. *Levinshtein M.E., Nasledov D.N., Shur M.S.* Magnetic Field Influence on the Gunn Effect, *PSS B*, 1969, No. 2, pp. 897-903.
6. *Malyshev I.V., Osadchiy E.N., Goncharova O.A.* Razrabotka chastotnykh preobrazovateley, ispol'zuyushchikh dreyfovye i diffuzionnye ob"emnye nelineynosti v usloviyakh deystviya vneshnikh sil'nykh elektricheskikh i magnitnykh poley [Development of frequency converters using drift and diffusion volumetric nonlinearities under the action of external strong electric and magnetic fields], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 2, pp. 126-142.
7. *Koronovskiy A.A., Khramov A.E., Moskalenko O.I. i dr.* Issledovanie vliyaniya sluchaynykh fluktuatsiy kontsentratsii legiruyushchey primesi na tok v poluprovodnikovyykh sverkhreshetkakh [Investigation of the influence of random fluctuations of the dopant concentration on the current in semiconductor superlattices], *Mater. 22-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii "SVCh-tekhnika i tele-kommunikatsionnye tekhnologii" (KryMiKo'2012), Sevastopol, Crimea.* [Materials of the 22nd International Crimean Conference "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies" (KryMiKo'2012), Sevastopol, Crimea, 2012], pp. 183-184.
8. *Malyshev I.V., Osadchiy E.N., Fil K.A.* Sposoby ucheta energozavisimosti effektivnoy massy goryachikh nositeley v ob"eme poluprovodnikov tipa AIIIbV dlya razlichnykh sluchaev dispersii [Methods for taking into account the energy dependence of the effective mass of hot carriers in the volume of AIIIbV type semiconductors for various cases of dispersion], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2017, No. 4, Available at: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4396](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4396).
9. *Malyshev I.V., Goncharova O.A.* Issledovanie sobstvennoy KVCh provodimosti poluprovodnikov [Study of intrinsic EHF conductivity of semiconductors], *Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletiy: Sb. nauchno-issledovatel'skikh rabot* [Science and education at the turn of the millennium: Collection of research papers], 2018, Issue 1, pp. 168-174.
10. *Malyshev I.V., Fil K.A., Parshina N.V.* Nonlinearity of the Diffusion Coefficient of Hot Carriers in the Bulk of the Semiconductor under the Action of Electric and Magnetic Fields, *Russian Physics Journal*, 2017, Vol. 6, No. 3, pp. 923-927.

11. *Sitangshu Bhattacharya, Kamakhya Prasad Ghatak*. Effective Electron Mass in Low-Dimensional Semiconductors, *Series in Materials Science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, Vol. 167, 535 p.
12. *Fischetti M.V., Vandenbergh W.G.* Advanced Physics of Electron Transport in Semiconductors and Nanostructures. Switzerland: Springer International Publishing, 2016, 474 p.
13. *Malyshev I.V., Goncharova O.A., Fedotov A.A.* Comparative Analysis of Charge Carriers Effective Mass Energy Dependences in the Various Semiconductors under Conditions of Strength and Extra Strength Electric External Fields Action, *Proceedings of 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) – 2021, Divnomorskoe, Russia*, pp. 125-128.
14. *Malyshev I.V., Goncharova O.A.* The Possibility of Creating a New Class of Frequency Converting Devices Based on The Bulk of AIIIbV Type Semiconductor Structures with Parameters Controlled by Strong Electric and Magnetic Fields, *Proceedings of 2019 International Conference on Radiation Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2019, Divnomorskoye, Krasnodar Region, Russia, pp. 188-191.
15. *Sungjung Joo, Taeyueb Kim, Sang Hoon Shin, et al.* Magnetic-field-controlled Reconfigurable Semiconductor Logic, *Nature*, 2013, Vol. 494, pp. 72-76.
16. *Malyshev I.V., Fil K.A., Parshina N.V.* The Dependence of the Diffusion Coefficient in Semiconductor Materials under the Influence of the External Strong Magnetic and Electric Fields, *Materials of 2017 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications – 2017, Jabalpur, India*, pp. 142-143.
17. *Trovato M., Reggiani L.* Maximum Entropy Principle within a Total Energy Scheme: Application to Hot-Carrier Transport in Semiconductors, *Physical Review*, 2000, Vol. 61, No. 24, pp. 16667-16681.
18. *Fromhold T.M., Krokhin A.A., Wilkinson P.B., et al.* Chaotic Quantum Transport in Superlattices, *UFN*, 2001, 44:10 suppl, pp. 24-27.
19. *Fowler D., Hardwick D., Patanè A. et al.* Magnetic-Field-Induced Miniband Conduction in Semiconductor Superlattices, *Physical Review*, 2007, Vol. 76, No. 24, pp. 245303.
20. *Sel'skiy A.O., Koronovskiy A.A., Moskalenko O.I. i dr.* Vliyanie mezhhimnizonnogo tunelirovaniya na generatsiyu toka v poluprovodnikovoy sverkhreshetke [Influence of interminiband tunneling on current generation in a semiconductor superlattice], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2015, Issue 4, pp. 62-66.
21. *Malyshev I.V., Parshina N.V., Goncharova O.A.* Behavior of Bulk Semiconductor Structures and Superlattices Output Parameters under the Influence of Strong External Constant and Alternative Electric Fields, *Proceedings of 10th Anniversary International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2021–2022) Divnomorsk, Russia, May 23–27, 2022*, pp. 192-193.

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

**Малышев Игорь Владимирович** – Южный федеральный университет; e-mail: ivmalyshev@sfned.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185372656, кафедра РТЭН; к.т.н.; доцент.

**Паршина Наталья Валерьевна** – e-mail: nparshina@sfned.ru; тел.: +79524146455; кафедра РТЭН; к.т.н.; доцент.

**Охотникова Анастасия Александровна** – Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета; e-mail: ohotnikova@sfned.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79518230823; научный сотрудник.

**Malyshev Igor Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: ivmalyshev@sfned.ru; Tadanrog, Russia; phone: +79185372656; the department of RTEN; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Parshina Natalia Valerievna** – e-mail: nparshina@sfned.ru; phone: +79524146455; the department of RTEN; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Ohotnikova Anastasia Alexandrovna** – Research Institute of Multiprocessor Computing Systems named after Academician A.V. Kalyaev, Southern Federal University; e-mail: ohotnikova@sfned.ru; Tadanrog, Russia; phone: +795182308-23; researcher.

## Раздел III. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-175-186

**Х.С. Аламир, Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян**

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗАТОРОВ НА ДОРОГАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛИРУЕМОГО АЛГОРИТМА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА БАЗЕ АДАПТИВНОГО IOTN**

*Явление заторов на дорогах возникает, когда норма спроса на дороге или на транспортном объекте превышает имеющуюся пропускную способность, причем бывает двух видов: либо рутинная, т.е. возникает в определенные моменты времени, которые являются пиковыми, например, на дороге, идущих или возвращающихся с работы или учебных заведений людей; либо другой тип – внезапные появившиеся заторы, возникающие в результате дорожно-транспортного происшествия, то есть в случае аварии на дороге, либо в силу других форс-мажорных причин. В связи с этим для уменьшения нарастания заторов в городах, можно и необходимо в современных условиях жизни и развития технологий использовать концепцию умных систем. Она отличается множеством алгоритмов, используемых в мире машинного обучения (ML) и Интернета вещей (IoT) для более точного прогнозирования потока трафика в краткосрочной перспективе и выявления возможностей для предотвращения заторов. В современных городах могут использоваться множество различных датчиков для сбора информации для прогнозирования краткосрочного трафика на территории города и точного захвата пространственной и временной эволюции (изменения) транспортного потока. Алгоритмы, внедренные в машинное обучение, улучшают возможности разрабатываемой системы. Качество принимаемых решений разрабатываемого искусственного интеллекта увеличивается при одновременном увеличении объема собираемых данных. В этой статье предлагается модель системы TCC-SVM для анализа пробок на дорогах в среде умного города. Предлагаемая модель включает в себя систему управления трафиком Интернета вещей (IoT), которая сообщает о заторах в определенной точке. Существующие системы управления дорожным движением становятся неэффективными из-за увеличения количества транспортных средств на дорогах. В городских районах пробки и аварии являются серьезной проблемой. Интеллектуальная транспортная система необходима для решения проблем, вызванных заторами на дорогах.*

*Нейронные сети; прогноз городского трафика; машинное обучение; интернет вещей; интеллектуальные систем; метод опорных векторов (SVM).*

**H.S. Alamir, E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan**

### **INTELLIGENT TRAFFIC CONGESTION CONTROL SYSTEM USING A CONTROLLED MACHINE LEARNING ALGORITHM ON ADAPTIVE IOTN**

*The phenomenon of congestion on the roads occurs when the demand rate on the road or on a transport facility exceeds the available capacity, and there are two types: either routine, i.e. occurs at certain times that are peak, for example, on the road, walking or returning from work or educational institutions of people; or another type – sudden traffic jams that have appeared as a result of a traffic accident, that is, in the event of an accident on the road, or due to other force majeure reasons. In this regard, in order to reduce the increase in congestion in cities, it is possible and necessary to use the concept of smart systems in modern conditions of life and technology development. It is distinguished by a variety of algorithms used in the world of machine learning*

*(ML) and the Internet of Things (IoT) to more accurately predict the flow of traffic in the short term and identify opportunities to prevent congestion. In modern cities, many different sensors can be used to collect information to predict short-term traffic in the city and accurately capture the spatial and temporal evolution (change) of traffic flow. Algorithms embedded in machine learning improve the capabilities of the system being developed. The quality of the decisions made by the developed artificial intelligence increases with a simultaneous increase in the volume of data collected. This article proposes a model of the TCC-SVM system for analyzing traffic jams in a smart city environment. The proposed model includes an Internet of Things (IoT) traffic management system that reports congestion at a certain point. Existing traffic management systems are becoming ineffective due to the increase in the number of vehicles on the roads. In urban areas, traffic jams and accidents are a serious problem. An intelligent transport system is necessary to solve the problems caused by congestion on the roads.*

*Neural networks; urban traffic forecast; machine learning; internet of things; intelligent systems; support vector machine (SVM).*

**Введение:** В умных городах данные об уровнях заторов являются важным аспектом управления дорожным движением. Эти данные о трафике определяются рядом различных датчиков с использованием радаров, микроволн и т.д. Валид предложил методику расчета плотности трафика с использованием подхода метода опорных векторов (SVM) [1–3]. Различные изображения текущего трафика захватываются и затем отправляются в предлагаемую систему, которая также получает информацию о более медленных скоростях, более длительном времени в пути и увеличении очередей автомобилей, а затем вычисляет плотность трафика [4].

Пробки на дорогах являются проблематичным вопросом, это происходит, когда количество автомобилей на дорогах города поднимается выше пропускной способности этой дороги, также известной как «насыщение». Борьба с заторами, которая влияет на многие проблемы, с которыми сталкиваются граждане, является одной из основных проблем транспортной системы в умных городах [1]. Загрязнение воздуха, использование топлива, нарушения ПДД и шумовое загрязнение, а также многочисленные упущенные возможности и аварии – все это проблемы современного города, влияние которых необходимо оптимизировать для удобства проживания в данном городе. В большинстве современных систем светофоров тайминги зафиксированы на всех перекрестках и не могут быть скорректированы в соответствии с изменениями плотности движения. Поэтому это была одна из самых важных составляющих, которая заставляла транспортные средства большую часть времени ждать в очередях, чтобы количество транспортных средств не увеличивалось на других дорогах, и очевидно, что эта процедура приводит к потере большего количества времени в ожидании в потоке транспорта. Особое внимание необходимо уделить времени ожидания в транспортном потоке машин экстренных служб [2]. Из-за фиксированных таймингов сигналов светофоров интенсивное движение может быть сконцентрировано в одном направлении в определенное время, но это вызывает накладные расходы и тратит много времени [5].

Связь между различными устройствами происходит в основном с помощью датчиков, исполнительных механизмов и мобильных устройств; Выполнение запроса выполняется одним и тем же диапазоном устройств. В 2018 году количество умных устройств превзошло максимально предполагаемое [6] и продолжает расти. Электронные устройства, такие как беспроводные датчики, смартфоны и другие встроенные системы, подключенные к Интернету или локальной сети (LAN), которая использует термин Интернет вещей (IoT) изменили возможности исследования и корректировки, в частности транспортных потоков. В последнее время стало известно, что умных устройств становится все больше, а потому информация, собираемая этими устройствами, будет все более уверенно охватывать исследуемую зону. Исторически сложилось так, что первая проверка компьютерного интеллекта

произошла в пятидесятых годах прошлого века. Вычислительный интеллект - это то, что нас интересует, и мы широко занимаемся им в нашем исследовании, которое считается отраслью искусственного интеллекта (ИИ), с помощью которой можно увеличить случаи обучения для новых проблем, которые могут возникнуть во время работы, и цель состоит в том, чтобы исследовать более широкое видение и уточнить ожидаемые проблемы на всех уровнях.

А с развитием приложений на базе искусственного интеллекта, основной функцией которого и для которого он был разработан, является обработка и изучение собранных данных с целью принятия возможных решений, связанных со значимыми шаблонами в дополнение к различным вариантам, которые являются факторами, стимулирующими и использующими развитие в работе алгоритмов искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения. Акцент будет сделан на изменении динамики времени светофора в соответствии с зависимостью, в основном, от плотности движения в городах, также можно учесть расчет некоторых факторов важного значения, которые могут быть причиной контроля заторов на дорогах или, наоборот, кучи факторов, снижающих заторы на дорогах. Чтобы сэкономить время и найти решения других, связанных с этим проблем, в этой статье сфокусируемся на использовании датчиков, как части концепции Интернета вещей с целью получения приемлемых результатов, которые эффективно способствуют процессу управления потоком информации, связанной с трафиком, за счет использования различных классификаторов, таких как Perceptron, Naive Bayes, Decision Tree, Logistic Regression и K-Nearest (перцептрон, нативный Байес, дерево решений, логистическая регрессия и K-ближайший).

В этом исследовании SVM используется для поиска точки затора на дорожном перекрестке с использованием различных статистических показателей, таких как частота промахов точности, специфичность, чувствительность, ложноположительное значение, ложноотрицательное значение, положительное отношение вероятности, отрицательное отношение вероятности, положительное значение прогноза и отрицательное значение предиктива. С помощью этих матриц перегруженность может быть идентифицирована более точно по сравнению с изученными исследованиями.

**Предлагаемая модель системы (TCC-SVM).** На рис. 1 демонстрируется новая модель системы контроля заторов на дорогах (TCC) с использованием SVM в ML [7] для интеллектуальной системы управления дорожным движением. С помощью этой модели можно предоставить полную картину модели системы TCC-SVM, которая предлагается в данной статье, в которой данные собираются и принимаются интеллектуальными устройствами с поддержкой IoT. С помощью этой модели данные сигналов одного узла передаются другому узлу и обновляются. Затем следующий слой, называемый сенсорным, получает данные от датчиков и облака, состоящих из входных параметров, которые используются для поиска точки скопления.

Модель была разделена на четыре разных слоя, в которых данные после получения их из облака и датчиков передаются в систему управления для обработки полученных результатов. Исходные данные вводились после передачи из облака и датчики распределялись в слои объекта, а после ввода исходных данных начинается следующий этап, на котором данные передаются на следующий слой, который является преслойной обработкой [8]. В этом слое данные улучшаются путем обработки найденных значений (недостающих значений), а после первого и второго этапов формируется следующий слой, в котором данные передаются на прикладной уровень. Прикладной слой, в свою очередь, разделен на два слоя, первый слой – это слой производительности, а другой слой – слой прогнозирования. На уровне

прогнозирования проводится работа над SVM для оптимальной оценки пробок на дорогах. Также на данном этапе работы производительность слоя оценивается по значениям, полученным в результате анализа слоя прогнозирования.

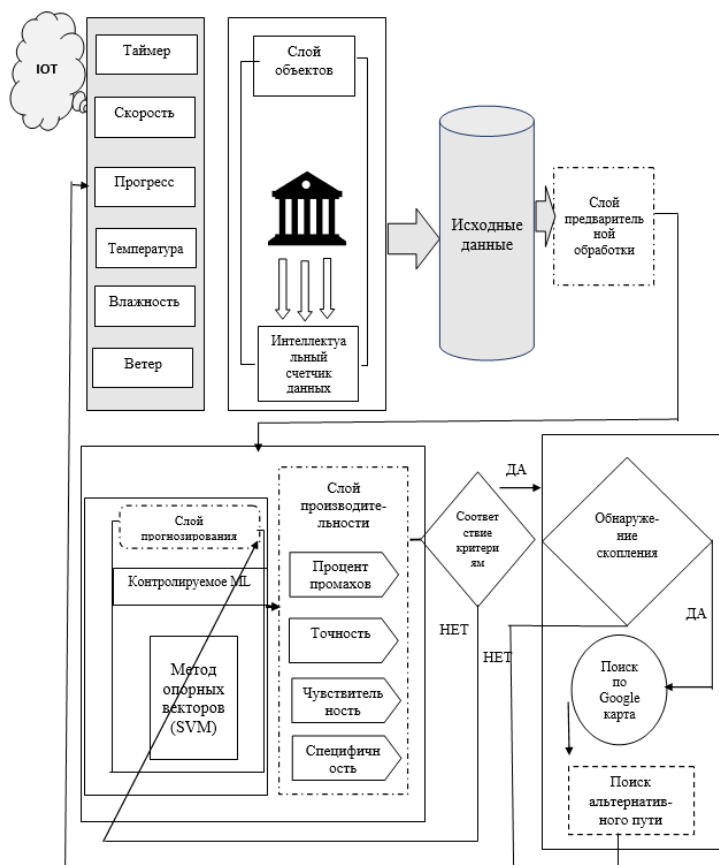


Рис. 1. Предлагаемая модель разрабатываемой системы (TCC\_SVM)

При наличии RFID-датчиков водители смогут получать уведомления о точке заторов на дорогах [9], а высокоточное прогнозирование этих пробок может быть достигнуто с помощью предлагаемой модели системы TCC-SVM с использованием SVM, использование которой приходится на методы машинного обучения. Дороги претерпевают изменения, которые иногда могут привести к ухудшению состояния в результате плохих погодных условий, в связи с чем в основном это сказывается на объеме движения [10]. Неблагоприятная погода может быть комбинацией различных факторов, например дождя, влажности, температуры и т.д.

Исследование касается данных, которые были доступны и собраны через Интернет, которые состоят из потока данных о различных погодных условиях и трафике, и которые обновляются с интервалом в 10 минут в рамках работы системы. В табл. 1 объясняются основные переменные входа, а также выхода, чтобы предсказать заторы на дорогах в любом месте и времени. Знание и обнаружение каких-либо точек заторов в транспортном потоке в том или ином месте и в плохих погодных условиях является основной целью этого исследования.

Таблица 1

**Входные/выходные переменные предлагаемой системы**

№	Имя входной/выходной переменной
Вход 1	Время
Вход 2	Скорость движения
Вход 3	Транспортный поток
Вход 4	Влажность
Вход 5	Скорость ветра
Вход 6	Температура воздуха
Выход 1	Вместимость

Как мы знаем, уравнение прямой равно

$$X_2 = ax_1 + b, \tag{1}$$

где  $a$  - наклон линии,  $b$  – пересечение; следовательно

$$ax_1 - x_2 + b = 0.$$

Пусть  $\vec{X} = (X_1 - X_2)^T$  и  $\vec{W} = (a - 1)$  тогда приведенное выше уравнение может быть записано как

$$\vec{W} \cdot \vec{X} + b = 0. \tag{2}$$

Это уравнение получено из 2-мерных векторов. Но на самом деле, он также работает для любого числа измерений, уравнение (2), также известное как уравнение гиперполосы.

Направление вектора  $\vec{X} = (X_1, X_2)^T$ , написано, как  $\vec{W}$  и определяется как

$$W = \frac{x_1}{\|x\|} + \frac{x_2}{\|x\|}, \tag{3}$$

где

$$\|x\| = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 \dots X_n^2}.$$

Как мы знаем, что

$$\cos(\theta) = \frac{x_1}{\|x\|} \text{ и } \cos(\alpha) = \frac{x_2}{\|x\|}.$$

Уравнение (3) также может быть записано как

$$W = (\cos(\theta), \cos(\alpha))$$

$$\vec{w} \cdot \vec{x} = \|w\| \|x\| \cos(\theta)$$

$$\theta = \beta - \alpha$$

$$\cos(\theta) = \cos(\alpha) + \sin(\beta) \sin(\alpha)$$

$$= \cos(\beta) \cos(\alpha) + \sin(\beta) \sin(\alpha)$$

$$= \frac{w_1}{\|w\|} \frac{x_1}{\|x\|} + \frac{w_2}{\|w\|} \frac{x_2}{\|x\|}$$

$$\vec{w} \cdot \vec{x} = \sum_{i=1}^n w_i x_i. \tag{4}$$

Точно так же, как приведенное выше уравнение было рассчитано для размерных векторов, скалярное произведение может быть рассчитано

$$f = y(w \cdot x + b).$$

Затем  $F$ , который называется функциональным полем набора данных

$$f = \min_{i=1 \dots m} f_i.$$

В городских районах основными проблемами являются пробки и аварии. Интеллектуальная транспортная система необходима для решения проблем, вызванных пробками на дорогах. Один из объектов: выделенная сеть транспортных средств



(VANET), отслеживает заторы на дорогах, отображая статистику по номерам транспортных средств на экране мобильного устройства. Информация поступает с различных перекрестков, что позволяет участникам дорожного движения выбрать маршрут и объехать заторы на оживленной дороге. Поэтому необходимо разработать интеллектуальную систему обнаружения пробок на дорогах, а также распространить эти возможности в управляющих системах автомобилей, чтобы можно было перенаправить входящий трафик и уменьшить заторы без участия людей [11–13].

При сравнении гиперплоскостей будет дополнительно выбрана гиперплоскость с наибольшим  $F$ ;  $F$  – называется геометрическим полем набора данных. Для достижения нашей цели по поиску оптимальной гиперплоскости нам необходимо определить ее значения  $w$  и  $b$ .

Функция Лагранжа

$$\mathcal{L}(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} w \cdot w - \sum_{i=1}^m \alpha_i [y_i(w x_i + b) - 1].$$

$$\nabla \mathcal{L}(w, b, \alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i x_i = 0. \quad (5)$$

$$\nabla_b \mathcal{L}(w, b, \alpha) = - \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) получаем

$$w = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i x_i \text{ и } \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0. \quad (7)$$

После подстановки функции Лагранжа получаем  $\mathcal{L}$

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i x_j. \quad (8)$$

Поскольку ограничения содержат неравенства, мы распространяем метод множителя Лагранжа на условия Каруш-Куна-Такера (ККТ). Комплементарное условие ККТ гласит, что

$$\alpha_i [y_i (w_i x^* + b) - 1] = 0 \quad (9)$$

$x^*$  является оптимальной точкой.

$\alpha$  является положительным значением и  $\alpha$  для других точек  $\approx 0$  так

$$y_i ((w_i x^* + b) - 1) = 0. \quad (10)$$

Они называются опорными векторами, которые являются ближайшими точками к гиперплоскости. Исходя из уравнения (10)

$$w - \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i x_i = 0$$

$$w = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i x_i. \quad (11)$$

Для вычисления значения  $b$  получаем

$$y_i ((w_i x^* + b) - 1) = 0. \quad (12)$$

Умножаем обе стороны на  $y_i$  в уравнении (12) и получаем

$$y_i^2 ((w_i x^* + b) - 1) = 0,$$

где

$$y_i^2 = 1$$

$$((w_i x^* + b) - y_i) = 0$$

$$b = y_i - w_i x^* \quad (13)$$

тогда

$$b = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S (y_i - w_i x) \quad (14)$$

$S$  – число опорных векторов. В одном случае у нас будет гиперплоскость, тогда мы сможем использовать гиперплоскость для прогнозирования. Когда функция гипотезы равна

$$h(w_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } w \cdot x + b \geq 0 \\ -1 & \text{if } w \cdot x + b < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Вышеуказанная точка на гиперплоскости будет классифицирована как класс +1 (обнаружена перегрузка), а точка под гиперплоскостью будет классифицирована как -1 (перегрузка не найдена).

Таким образом, основная цель алгоритма SM – найти гиперплоскость, которая могла бы точно разделить данные, и нам нужно найти наилучшую гиперплоскость, которую часто называют оптимальной гиперплоскостью [14, 15].

Необходимо также улучшить согласованность светофоров и уменьшить заторы на дорогах. Необходимо разработать интеллектуальную систему светофоров для связи с аварийными транспортными средствами. Помимо рассмотрения значимости автомобилей в соответствии с характером инцидента, предлагаемая система включает защиту от взлома [12].

Анализ результатов. Пробки являются основной проблемой в многочисленных уличных сетях. В различных автомобильных навигационных приложениях и машинах на главных улицах прогнозирование пробок в режиме реального времени может быть сделано с помощью интернет-технологий. Правило вывода о параллельной обработке записей с устройств, видео и датчиков генерирует отчетливую онтологию в предлагаемой работе на основе датчиков [16].

Программное обеспечение для моделирования MATLAB использовалось для прогнозирования точек перегруженности. Результаты точности и пропуска во время обучения и валидации представлены в табл. 2. Для применения алгоритма SVM использовался набор данных из 1786 наборов записи; эти данные были разделены на 70% для обучения (1250 образцов) и 30% для обучения и валидации (536 образцов). Для оценки различных статистических данных, используемых для бенчмаркинга и эффективности, использовались различные метрики: точность, специфичность и чувствительность. Истинный положительный результат выражается с точки зрения чувствительности, а точный отрицательный – с точки зрения специфичности. Параметры, полученные из формул, задаются уравнениями (16)-(25).

Таблица 2

**Обучение предлагаемой модели системы TCC-SVM при прогнозировании заторов на дорогах**  
**Предлагаемая модель системы TCC-SVM (70% выборочных данных при обучении)**

Общее количество образцов (N=1250)		Результат (Выход) ( $O_0O_1$ )	
Ожидаемый результат ( $T_0T_1$ )		$O_0$ (отсутствие заторов)	$O_1$ (наличие заторов)
Ввод	$T_0 = 838$ Положительная	Положительная	Отрицательная
	$T_1 = 412$ Отрицательная	836	02
		13	398

$$\text{Misrate} = \frac{(o_1/t_0 + o_0/t_1)}{t_0 + t_1} \quad (16)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{(o_0/T_0 + o_1/T_1)}{T_0 + T_1} \quad (17)$$

$$\text{Sensitivity} = T_C(T_C + F_{NC}) \quad (18)$$

$$\text{Specificity} = T_{NC}(T_{NC} + F_C) \quad (19)$$

$$\text{Poor predictive value} = \frac{o_1/T_1}{(o_1/T_1 + o_0/T_1)} \quad (20)$$

$$\text{Positive prediction value} = \frac{o_0/T_0}{(o_0/T_0 + o_1/T_0)} \quad (21)$$

$$\text{False positive ratio} = 1 - \text{Specificity} \quad (22)$$

$$\text{False – negative ratio} = 1 - \text{sensitivity} \quad (23)$$

$$\text{Likelihood ratio positive} = \frac{\text{Sensitivity}}{(1 - \text{Specificity})} \quad (24)$$

$$\text{Likelihood ratio negative} = \frac{(1 - \text{Sensitivity})}{\text{Specificity}} \quad (25)$$

Предлагаемая модель системы TCC-SVM вычисляет ожидаемый результат как отрицательный (0) и положительный (1). Отрицательный результат (0) указывает на отсутствие переполненности, в то время как положительный результат (1) указывает на переполненность [17–21].

В таблице 2 показан прогноз пробок на дорогах, подготовленный с помощью предлагаемой модели системы TCS-SVM на этапе обучения. Всего в ходе обучения было использовано 1250 образцов. Они были далее разделены на 838 положительных и 412 отрицательных образцов. Результаты вернули 836 образцов как положительный класс, который правильно предсказал отсутствие заторов. Тем не менее, 2 записи были неправильно предсказаны как отрицательные, что говорит о том, что заторы были обнаружены, когда не было заторов. Аналогичным образом, из 412 образцов, давших отрицательный результат, 398 образцов правильно предсказали отрицательный результат, что означает, что были обнаружены перегрузки, а 14 образцов неправильно предсказали положительный результат, что указывает на отсутствие перегруженности, когда там действительно существовали заторы.

Предлагаемая модель TCS-SVM для заторов на дорогах на этапе проверки проиллюстрирована в таблице 3. 286 положительных и 250 отрицательных результатов были получены в общей сложности из 536 образцов, использованных в процессе валидации. Было обнаружено, что 4 записи ошибочно предсказывали отрицательный результат, что означает, что перегруженность была обнаружена, когда на самом деле не было перегруженности, тогда как 280 положительных записей правильно предполагали отсутствие перегруженности. Как и в предыдущем примере, 242 из 250 образцов, которые дали отрицательный результат, подразумевающий перегруженность, были идентифицированы точно прогнозируемыми перегрузками, но 7 образцов ошибочно предсказали положительный результат, не показывая заторы при возникновении заторов.

Таблица 3

**Валидация предлагаемой модели системы TCC-SVM в ходе прогнозирования заторов на дорогах**  
**Предлагаемая модель системы TCC-SVM (30% выборочных данных при валидации)**

Общее количество образцов (N = 536)		Результат (Вывод) ( $O_0, O_1$ )	
Ожидаемый результат ( $T_0, T_1$ )		$O_0$ (отсутствие заторов) $O_1$ (наличие заторов)	
Ввод		Положительная	Отрицательная
$T_0 = 286$ Положительная			
$T_1 = 250$ Отрицательная		280	04
		07	242

Табл. 4 показывает производительность предложенной модели системы TCC-SVM с точки зрения чувствительности, специфичности, точности и частоты промахов на этапах обучения и проверки. Это ясно показывает, что предлагаемая система TCC-SVM во время обучения возвращала уровни 98%, 99,5%, 98,7% и 1,3% для чувствительности, специфичности, точности и частоты промахов соответственно. И во время проверки предложенная система TCC-SVM вернула уровни 97,56%, 98,37%, 97,9% и 2,1% для чувствительности, специфичности, точности и частоты ошибок соответственно. Кроме того, были добавлены дополнительные статистические меры для прогнозирования таких значений, как ложноположительные, ложноотрицательные, отрицательное отношение правдоподобия и поло-

жительное отношение, а также положительные и отрицательные значения предсказания. Результаты при обучении составили 0,5%, 2%, 196,0,0051, 99,76% и 96,60%. Во время проверки предложенная система TCC-SVM вернула 1,63%,

Таблица 4

**Оценка эффективности предлагаемой модели системы TCC-SVM при валидации и обучении с использованием различных статистических показателей**

	Чувствительность	Специфичность	Точность	Процент промахов	Ложноположительное значение
Обучение	(0.995)	(0.98)	(0.987)	1.3%	(0.005)
	99.5%	98%	98.7%		0.5%
Проверка	(0.9837)	(0.9756)	(0.979)	2.1%	(0.0163)
	98.37%	97.56%	97.9%		1.63%
	Ложноотрицательное значение	Коэффициент вероятности положительный	Коэффициент вероятности отрицательный	Положительное значение прогноза	Отрицательное значение прогноза
Обучение	2%	196	0.0051	99.76%	96.60%
Проверка	2.44%	59.85	0.0167	98.59%	97.18%

**Вывод.** Модель TCC-SVM была предложена для интеллектуальной системы управления дорожным движением, которая могла бы анализировать данные с различных сенсорных устройств для прогнозирования пробок на дорогах. Используя уровень предварительной обработки для улучшения входящих данных путем обработки отсутствующих значений, система опорных векторов используется для прогнозирования перегрузки. Результаты моделирования показывают, что предложенная модель TCC-SVM работает значительно лучше, чем предыдущие подходы.

В этом исследовании SVM используется для нахождения точки блокировки на перекрестке улиц с использованием различных фактических показателей, например, точности, специфичности, чувствительности, ложноположительного значения, вводящей в заблуждение ложноотрицательного значения, положительной доли вероятности, отрицательной доли вероятности, положительного значения прогноза и отрицательного значения прогноза.

Среди ограничений этого исследования – временные задержки, так как на производительность системы может повлиять задержка в получении информации от предыдущего состояния. Кроме того, непрерывная подача информации в систему может увеличить сложность данных. Большая часть данных не отбрасывается, потому что нет методов, связанных с обработкой этой информации. Процедуры или возможности, подобные человеческим, могут быть связаны для улучшения производительности системы.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Lana I., Del Ser J., Velez M., et Vlahogianni E. I. Road Traffic Forecasting: Recent Advances and New Challenges // IEEE Intell. Transp. Syst. Mag. – 2018. – Vol. 10, No. 2. – P. 93-109,
2. Заргарян Е.В., Аюнджян Ж.Ж. Исследование автоматизации коллаборативных роботов и способы их применения // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2020: Матер. X Международной научно-технической конференции. "Технологии разработки информационных систем". – 2020. – С. 218-223.
3. Заргарян Ю.А. Задача управляемости в адаптивной автоматной обучаемой системе управления // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2020: Матер. X Международной научно-технической конференции. "Технологии разработки информационных систем". – 2020.

4. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Dmitrieva I.A., Sakharova O.N. and Pushmina I.V. Modeling design information systems with many criteria. Information Technologies and Engineering – APITECH - 2020 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 2085 (3). – P. 032057(1-7). – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032057.
5. Kamarianakis Y. et Prastacos P. Forecasting Traffic Flow Conditions in an Urban Network: Comparison of Multivariate and Univariate Approaches // Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board. – Janv. 2003. – Vol. 1857, No. 1. – P. 74-84.
6. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Kapc I.V., Sakharova O.N., Kalyakina I.M and Dmitrieva I.A. Method of estimating the Pareto-optimal solutions based on the usefulness // International Conference on Advances in Material Science and Technology - CAMSTech-2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 919 (2). – P. 022027 (1-8). – DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022027.
7. Nagatani T. The physics of traffic jams // Rep. Prog. Phys. – Sept. 2002. – Vol. 65, No. 9. – P. 1331-1386.
8. Jiber M., Lamouik I., Ali Y., et Sabri M.A. Traffic flow prediction using neural network // in 2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), Fez, 2018. – P. 1-4.
9. Zhang Y. et Liu Y. Comparison of Parametric and Nonparametric Techniques for Non-peak Traffic Forecasting. – 2009. – Vol. 3, No. 3. – P. 7.
10. Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E. The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12, No. 23. – P. 6762-6772.
11. Zargarjan E.V., Zargarjan Ju.A., Finaev V.I. Information support for the training of fuzzy production account balance in the conditions of incomplete data. Innovative technologies and didactics in teaching (ITDT-2016): Collected papers. – 2016. – P. 128-138.
12. Ahmed M.S. et. Cook A.R. Analysis of Freeway Traffic Time-Series Data by Using Box-Jenkins Techniques. – P. 9.
13. Финаев В.И., Заргарян Ю.А., Заргарян Е.В., Соловьев В.В. Формализация групп подвижных объектов в условиях неопределённости для выбора управляющих решений // Информатизация и связь. – 2016. – № 3. – С. 56-62.
14. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Artificial Neural Networks for Demand Forecasting: Application Using Moroccan Supermarket Data. – 2015.
15. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Configuration and implementation of a daily artificial neural network-based forecasting system using real supermarket data // Int. J. Logist. Syst. Manag. – 2017. – Vol. 28, No. 2. – P. 144-163.
16. Пушнина И.В. Система управления подвижным объектом в условиях неопределённости // Наука и образование на рубеже тысячелетий: Сб. научно-исследовательских работ. – Кисловодск: КГТИ, 2018. – С. 65-74.
17. Wang X., Wang C. Time series data cleaning: A survey // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 1866-1881. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962152.
18. Data-driven smart cities: Big Data, analytics, and security. – 2018. – URL: <https://skelia.com/articles/data-driven-smart-cities-big-data-analytics-and-security> (дата обращения: 14.09.2020).
19. Kim J., Tae D., Seok J. A survey of missing data imputation using generative adversarial networks // Proc. of the 2020 Int. Conf. on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC. – 2020. – P. 454-456. – DOI: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065044.
20. Dmitrieva I.A., Milesenko L.P., Begun O.V., Berezhnaya A.V. Information Modernization of The General Theory of Environmental Safety Ensuring // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific Conference. – Krasnoyarsk, 2021. – P. 12072.
21. Аламир Х.С., Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А. Модель прогнозирования транспортного потока на основе нейронных сетей для предсказания трафика на дорогах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6 (223). – С. 124-132.

## REFERENCES

1. Lana I., Del Ser J., Velez M., et Vlahogianni E. I. Road Traffic Forecasting: Recent Advances and New Challenges, *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, 2018, Vol. 10, No. 2, pp. 93-109,
2. Zargaryan E.V., Akopdzhanyan Zh.Zh. Issledovanie avtomatizatsii kollaborativnykh robotov i sposoby ikh primeneniya [Research of automation of collaborative robots and methods of their application. In the collection], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2020: Mater. X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. "Tekhnologii razrabotki*

- informatsionnykh sistem*" [Technologies for the development of information systems TRIS-2020. Materials of the X International Scientific and Technical Conference. "Technologies for the Development of Information Systems"], 2020, pp. 218-223.
3. Zargaryan Yu.A. Zadacha upravlyaemosti v adaptivnoy avtomatnoy obuchaemoy sisteme upravleniya [The problem of controllability in an adaptive automaton learning control system], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2020: Mater. X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. "Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem*" [Technologies for the development of information systems TRIS-2020. Materials of the X International Scientific and Technical Conference. "Technologies for the Development of Information Systems"], 2020.
  4. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Dmitrieva I.A., Sakharova O.N. and Pushnina I.V. Modeling design information systems with many criteria. Information Technologies and Engineering – APITECH – 2020, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 2085 (3), pp. 032057(1-7). – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032057.
  5. Kamarianakis Y. et Prastacos P. Forecasting Traffic Flow Conditions in an Urban Network: Comparison of Multivariate and Univariate Approaches, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.*, Janv. 2003, Vol. 1857, No. 1, pp. 74-84.
  6. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Kapc I.V., Sakharova O.N., Kalyakina I.M and Dmitrieva I.A. Method of estimating the Pareto-optimal solutions based on the usefulness, *International Conference on Advances in Material Science and Technology - CAMSTech-2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919 (2), pp. 022027 (1-8). DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022027.
  7. Nagatani T. The physics of traffic jams, *Rep. Prog. Phys.*, Sept. 2002, Vol. 65, No. 9, pp. 1331-1386.
  8. Jiber M., Lamouik I., Ali Y., et Sabri M.A. Traffic flow prediction using neural network // in 2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), Fez, 2018. – P. 1-4.
  9. Zhang Y. et Liu Y. Comparison of Parametric and Nonparametric Techniques for Non-peak Traffic Forecasting, 2009, Vol. 3, No. 3, pp. 7.
  10. Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E. The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, Vol. 12, No. 23, pp. 6762-6772.
  11. Zargarjan E.V., Zargarjan Ju.A., Finaev V.I. Information support for the training of fuzzy production account balance in the conditions of incomplete data. Innovative technologies and didactics in teaching (ITDT-2016): Collected papers, 2016, pp. 128-138.
  12. Ahmed M.S. et. Cook A.R. Analysis of Freeway Traffic Time-Series Data by Using Box-Jenkins Techniques, pp. 9.
  13. Finaev V.I., Zargaryan Yu.A., Zargaryan E.V., Solov'ev V.V. Formalizatsiya grupp podvizhnykh ob"ektov v usloviyakh neopredelennosti dlya vybora upravlyayushchikh resheniy [Formalization of groups of mobile objects in conditions of uncertainty for the choice of control decisions], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2016, No. 3, pp. 56-62.
  14. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Artificial Neural Networks for Demand Forecasting: Application Using Moroccan Supermarket Data, 2015.
  15. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Configuration and implementation of a daily artificial neural network-based forecasting system using real supermarket data, *Int. J. Logist. Syst. Manag.*, 2017, Vol. 28, No. 2, pp. 144-163.
  16. Pushnina I.V. Sistema upravleniya podvizhnym ob"ektom v usloviyakh neopredelennosti [Control system of a moving object under conditions of uncertainty], *Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletiy: Sb. nauchno-issledovatel'skikh rabot* [Science and education at the turn of the millennium. collection of research papers]. Kislovodsk: KGTI, 2018, pp. 65-74.
  17. Wang X., Wang C. Time series data cleaning: A survey, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 1866-1881. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962152.
  18. Data-driven smart cities: Big Data, analytics, and security, 2018. Available at: <https://skelia.com/articles/data-driven-smart-cities-big-data-analytics-and-security> (accessed 14 September 2020).
  19. Kim J., Tae D., Seok J. A survey of missing data imputation using generative adversarial networks, *Proc. of the 2020 Int. Conf. on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC*, 2020, pp. 454-456. DOI: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065044.

20. Dmitrieva I.A., Mileshko L.P., Begun O.V., Berezhnaya A.V. Information Modernization of the General Theory of Environmental Safety Ensuring, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, 2021, pp. 12072.
21. Alamir Kh.S., Zargaryan E.V., Zargaryan Yu.A. Model' prognozirovaniya transportnogo potoka na osnove neyronnykh setey dlya predskazaniya trafika na dorogakh [A traffic flow prediction model based on neural networks for predicting traffic on the roads], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6 (223), pp 124-132.

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

**Аламир Хайдер Сагбан Хуссейн** – Южный федеральный университет, e-mail: alamir@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

**Заргарян Елена Валерьевна** – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Заргарян Юрий Артурович** – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Alamir Haider Sagban Hussein** – Southern Federal University, e-mail: alamir@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; postgraduate student.

**Zargaryan Elena Valerevna** – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Zargaryan Yuri Arturovich** – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007.519.816

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-186-200

**С.И. Родзин, А.В. Боженюк, Ю.А. Кравченко, О.Н. Родзина**

### **МЕТОДЫ НЕЧЕТКОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ГРУППОВОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ\***

Целями данной статьи является анализ современного состояния исследований в области нечетких методов многокритериальной оптимизации, а также разработка операторов агрегации и алгоритмов, использующих нечеткое многокритериальное групповое принятие решений с применением интуитивистского отношения лингвистических предпочтений. Представлены наиболее известные нечеткие методы многокритериальной оптимизации: ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS, ANP, ANP, МАСВЕТН, DEMATEL, интеграл Шоке и DEA, рассмотрены их особенности, области применения и наиболее цитируемые статьи. Большинство реальных задач оптимизации могут иметь противоречивые цели. Также представлены метод нечеткого принятия многоцелевых решений FMODM для ситуаций, когда существуют неточности и неопределенность в некоторых целях и переменных, от которых они зависят; методы нечеткого многоцелевого линейного программирования FMOLP, нечеткого многопредметного целевого программирования FMOGP и нечеткие эвристические методы принятия решений. Рассмотрена проблема нечеткого многокритериального группового принятия решений при эвакуации с интуитивным отношением лингвистических предпочтений. Отмечено, что методы нечеткой логики особенно подходят для принятия решений об эвакуации, когда данных мало, знание причинно-следственных связей неточно, а наблюдения и критерии могут быть выражены в лингвистических качественных терминах. Представлены основные этапы группового принятия наилучшего решения среди альтернатив в нечеткой среде: объединение оценок экспертов; получение итоговой оценки для каждой альтернативы, представленной лингвистической переменной; ранжирование альтернатив; групповое принятие наиболее предпочтительного

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121, <https://rscf.ru/project/22-71-10121/> в Южном федеральном университете.

решения. Предлагается подход к групповому принятию решений с интуитивным отношением предпочтений на основе процедур агрегирования. Рассматривается групповая модель принятия решений и концепция нечеткого группового решения и лингвистические переменные, используемые при прогнозировании чрезвычайной ситуации и планировании эвакуации. Отмечается, что известные операторы упорядоченного взвешенного усреднения OWA, LOWA не учитывают веса экспертов. Определяется оператор Low, позволяющий учесть весовые значения экспертов, а также подход к определению нечеткого группового решения aFCS в качестве множества типа 2. Представлены алгоритмы для определения нечеткого группового многокритериального решения на основе aFCS.

*Нечеткое множество; лингвистическая переменная; групповое лицо принимающее решение; многокритериальная проблема; оператор; агрегирование; эвакуация.*

**S.I. Rodzin, A.V. Bozhenyuk, Y.A Kravchenko, O.N. Rodzina**

### **METHODS OF FUZZY MULTICRITERIA GROUP DECISION-MAKING FOR EVACUATION TASKS IN EMERGENCY SITUATIONS**

*The purpose of this article is to analyze the current state of research in the field of fuzzy multicriteria optimization methods, as well as the development of aggregation operators and algorithms using fuzzy multicriteria group decision-making using an intuitionistic attitude of linguistic preferences. The most well-known fuzzy methods of multicriteria optimization are presented: ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS, AHP, ANP, MACBETH, DEMATEL, Shoke integral and DEA, their features, applications and the most cited articles are considered. Most real optimization problems may have conflicting goals. The method of fuzzy multi-purpose decision-making FMODM is also presented for situations where there are inaccuracies and uncertainty in some goals and variables on which they depend; methods of fuzzy multi-purpose linear programming FMOLP, fuzzy multi-objective target programming FMOGP and fuzzy heuristic decision-making methods. The problem of fuzzy multicriteria group decision-making during evacuation with an intuitive relation of linguistic preferences is considered. It is noted that fuzzy logic methods are particularly suitable for making evacuation decisions when there is little data, knowledge of cause-and-effect relationships is inaccurate, and observations and criteria can be expressed in linguistic qualitative terms. The main stages of group making the best decision among alternatives in a fuzzy environment are presented: combining expert assessments; obtaining a final assessment for each alternative represented by a linguistic variable; ranking alternatives; group making the most preferred decision. An approach to group decision-making with an intuitive preference relationship based on aggregation procedures is proposed. The group model of decision-making and the concept of fuzzy group decision and linguistic variables used in predicting an emergency situation and planning evacuation are considered. It is noted that the well-known operators of ordered weighted averaging OWA, LOWA do not take into account the weights of experts. The Low operator is defined, which allows taking into account the weight values of experts, as well as an approach to determining a fuzzy group solution of aFCS as a type 2 set. Algorithms for determining a fuzzy group multicriteria solution based on aFCS are presented.*

*Fuzzy set; linguistic variable; group decision maker; multi-criteria problem; operator; aggregation; evacuation.*

**Введение.** Реальные проблемы принятия решений, как правило, слишком сложны и плохо структурированы, чтобы оценивать их оптимальность с помощью одного критерия. В одной задаче может быть установлено несколько критериев оптимальности. Одновременное рассмотрение нескольких критериев приводит к многокритериальной задаче принятия решений [1].

Проблемы, в которых лицо, принимающее решение (ЛПР), должно оценить конечный набор альтернатив, чтобы выбрать наиболее подходящую и ранжировать их от наилучшей к худшей, называются дискретными проблемами многокритериальной оптимизации (ДМО), а проблемы, в которых существует бесконечный набор альтернатив, называются непрерывными проблемами многокритериальной оптимизации (НМО).



Нечеткие методы многокритериальной оптимизации используются для оценки альтернатив либо индивидуальным ЛПП, либо группой ЛПП в условиях нечеткости и неопределенности. В этом случае соответствие альтернатив критериям и весовые коэффициенты важности критериев оцениваются с использованием лингвистических переменных [2]. Значениями лингвистической переменной являются слова или предложения на естественном или искусственном языке [3]. Для решения задач ДМО и НМО при нечетких условиях было предложено несколько методов, а теория нечетких множеств была расширена за счет разработки новых типов нечетких множеств, таких как нестационарные нечеткие множества, интуиционистские нечеткие множества, нечеткие мультимножества, колеблющиеся нечеткие множества [3, 4].

Целями данной статьи является анализ современного состояния области исследований нечетких методов многокритериальной оптимизации, а также разработка операторов агрегации и алгоритмов, использующих нечеткое многокритериальное групповое принятие решений с применением интуиционистского отношения лингвистических предпочтений.

**Современные методы и подходы к решению проблем многокритериального и многоцелевого принятия решения в нечетких условиях.** Для задач ДМО наиболее известными нечеткими методами многокритериальной оптимизации являются нечеткие методы *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *VIKOR*, *TOPSIS*, *AHP*, *ANP* и *DEMATEL*. Рассмотрим подробнее их особенности, области применения и публикационную активность.

*Нечеткий метод ELECTRE.* Принцип работы семейства методов *ELECTRE* состоит в следующем. Для каждой пары альтернативных решений выдвигается предположение (гипотеза) о том, что одна альтернатива лучше другой. Методы *ELECTRE* строят одно или несколько четких или нечетких отношений превосходства. Затем для каждой пары альтернатив находятся два индекса: индекс согласия (величина, подтверждающая предположение о превосходстве одной альтернативы над другой) и индекс несогласия (величина, опровергающая это предположение). На основе анализа этих индексов выбирается одна или несколько лучших альтернатив ("ядро" альтернатив) [1]. Библиография по нечеткому методу *ELECTRE* в базе *Scopus* содержит свыше 1100 публикаций по нескольким предметным областям. Больше всего статей по нечетким методам на основе *ELECTRE* публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Fuzzy Sets and Systems* и *European Journal of Operational Research*. Наиболее цитируемой статьей о нечетких методах *ELECTRE* является [5].

Исследования, основанные на нечетком *ELECTRE*, включают работы, в которых предлагаются новые подходы или модификации существующих подходов [6]. Например, сравниваются четкий и нечеткий методы *ELECTRE* для решения задачи выбора поставщика и предлагается новый нечеткий метод *ELECTRE*. В [6] представлен интервальный нечеткий метод *ELECTRE*, направленный на решение задач с различными весами критериев. Другая группа работ использует существующие подходы для решения конкретных прикладных задач. Например, в [7] рассматривается задача экспертного отбора персонала по десяти критериям с помощью нечеткого метода *ELECTRE*. Еще одна группа работ представляет различные гибридные нечеткие методы принятия решений *ELECTRE*. Так в [8] предлагается методология оценки качества веб-сайта электронного банкинга, основанная на гибридном нечетком подходе *AHP-ELECTRE*. В данном методе веса критериев генерируются с помощью нечеткого метода анализа *AHP*. Далее, нечеткий метод *ELECTRE* используется для оценки уровня качества веб-сайтов.

В [9] разработан интуиционистский нечеткий метод *ELECTRE* для решения многокритериальных задач принятия решений. В нем используются интуиционистские нечеткие множества Атанасова (*A-IFS*) в условиях недостатка информации для решения проблем. Оценки альтернатив по каждому критерию и веса каждого критерия берутся в качестве лингвистических переменных, характеризующих интуиционистскими нечеткими множествами. В [10] разработан основанный на нечетком *ELECTRE* метод ранжирования для многокритериального группового принятия решений в среде интервальных нечетких множеств.

*Нечеткий метод PROMETHEE*. Семейство методов *PROMETHEE* представлено в [11] разработан нечеткий метод *PROMETHEE* для задач использования альтернативной энергии. В других работах этот метод применяется для оценки эко-технологии, для решения производственных проблем, а также для задачи выбора оборудования. Наиболее цитируемой статьей о нечетком методе *PROMETHEE* является [11]. Больше всего статей по данному методу публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *International Journal of Production Research* и *European Journal of Operational Research*.

*Нечеткий метод VIKOR*. Метод *VIKOR*, разработанный в [12], представляет собой метод многокритериальной оптимизации, критерии которого являются ортогональными и имеют разные единицы измерения. Компромиссное решение определяется по степени “близости” к идеальному решению путем взаимных уступок. В [13] предлагает расширение метода *VIKOR* для поиска нечеткого компромиссного решения, причем критерии и их веса являются нечеткими множествами. В [14] решается многокритериальная проблема ранжирования рисков в мегапроектах. Имеются примеры гибридизации метода *VIKOR* и *AHP*: веса критериев определяются с помощью нечеткого метода *AHP*, а затем альтернативы ранжируются с помощью нечеткого *VIKOR*. В целом число статей, индексированных в *Scopus* и посвященных нечеткому *VIKOR*, включает свыше 900 публикаций по самым различным предметным областям. Больше всего статей, посвященных *VIKOR*, публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Applied Mathematical Modelling* и *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. Области приложения нечеткого *VIKOR* весьма разнообразны: управление бизнесом, сельское хозяйство, энергетика материаловедение и медицина. Однако наиболее широкое применение метод получил в области информатики и инженерии. Наиболее цитируемой статьей о нечетком *VIKOR* является [15].

Больше всего статей по нечетким методам на основе *VIKOR* публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Applied Mathematical Modelling* и *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*.

*Нечеткий метод TOPSIS*. В [16] разработан нечеткий метод *TOPSIS*. Основная идея метода состоит в том, чтобы выбрать альтернативу, которая имеет наименьшее расстояние от положительного идеального решения и наибольшее расстояние от отрицательного идеального решения. Для этого вычисляется индекс сходства (или коэффициент относительной близости). Индекс сходства показывает расстояние до положительного идеального решения и до отрицательного идеального решения. После этого выбирается решение с максимальным значением относительной близости, которое учитывает как близость с положительным идеальным решением, так и удаленность от отрицательного идеального решения. Число статей, индексированных в *Scopus* и посвященных нечеткому *TOPSIS* включает свыше 4000 публикаций в различных предметных областях. В [17] модифицируется метод *TOPSIS*, используя теорию возможностей. Оценки ЛПР производятся с помощью треугольных нечетких чисел (TFN). Интегрированный коэффициент относительной близости каждой альтернативы вычисляется с помощью матрицы вероятностных средних значений и

матрицы вероятностных стандартных отклонений. В других исследованиях нечеткий метод TOPSIS успешно используется для ранжирования поставщиков экологически чистого сырья для электронной компании, для оценки финансовых показателей компаний контейнерных перевозок, для оценки финансовых показателей банков, а также гибридный метод ANP-TOPSIS – для оценки банков, для оценки качества обслуживания авиакомпании. Больше всего статей по нечетким методам на основе TOPSIS публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Applied Soft Computing Journal* и *Applied Mathematical Modelling*. Области приложения нечеткого метода TOPSIS включают инженерию, информатику, менеджмент, эконометрику и финансы, социальные науки, сельское хозяйство, энергетику, биохимию и астрономию. Наиболее цитируемой статьей о нечетком TOPSIS является [18].

*Нечеткий метод ANP.* Метод аналитической иерархии (ANP) первоначально был предложен Т. Саати как структурированный подход, используемый для принятия решений в сложных задачах. ANP организует критерии принятия решений в виде иерархии и ставит перед собой цели количественной оценки приоритетов для множества альтернатив на основе парных сравнений ЛПР. ANP также предполагает согласованность сравнения альтернатив и обладает способностью обнаруживать и учитывать несоответствия, присущие процессу принятия решений. Однако в тех случаях, когда ЛПР не могут выразить свои оценки четкими числами, можно использовать нечеткую логику, которая обеспечивает учет неопределенностей, связанных с особенностями когнитивных процессов человека. Были предложены различные нечеткие расширения метода ANP с помощью различных шкал, содержащих треугольные, трапециевидные и четкие числа [19]. Нечеткие методы ANP использовались для задачи выбора поставщиков в сфере розничной торговли, размещения объектов [14]. Ведущими журналами, опубликовавшими исследования, основанные на нечетком методе ANP, являются *Expert Systems with Applications*, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, *International Journal of Production Research*, *European Journal of Operational Research*, а также *Fuzzy Sets and Systems*. Исследования, основанные на нечетком ANP, можно разделить на следующие группы. Первая группа посвящена разработке новых нечетких методологий ANP или модифицирует существующие подходы. В частности, предлагается стохастический метод ANP, модель нелинейного программирования для поддержания согласованности оценок, расширение до интуиционистской нечеткости [21]. Чтобы применить метод при групповом принятии решений, для агрегирования матричной оценки решения используется интуитивное нечеткое взвешенное усреднение (IFWA). Вторая группа исследований использует существующие подходы в конкретной проблемной области. Например, нечеткий метод ANP используется в индустрии туризма для определения основных факторов, побуждающих круизные линии выбирать конкретные порты захода, для оценки систем хранения водорода с учетом веса, объема, стоимости и энергоэффективности системы, для оптимальной сегментации МРТ-изображений в системе медицинской диагностики [22, 23]. Третья группа работ посвящена гибридизации различных многокритериальных методов с нечетким ANP. Например, в [24] интегрируются метод *Delphi* и нечеткий ANP для определения факторов, влияющих на коммерциализацию новых технологических продуктов. В целом, нечеткий метод ANP был использован в различных областях: инженерии, информатике, экологии, управлении бизнесом, принятии решений в энергетике, сельском хозяйстве, материаловедении. Наиболее цитируемой статьей является [25].

*Нечеткий метод ANP.* Нечеткий метод ANP (Т. Саати) является обобщением метода ANP [26]. Здесь также используются попарные сравнения, однако факторы не являются независимыми друг от друга. Этапы метода ANP включают структу-

рирование, моделирование и анализ. Этап структурирования состоит в постановке задачи и определении критериев принятия решений. На этапе моделирования экспертам задаются вопросы, основанные на попарных сравнениях, для выяснения предпочтений. Этап анализа включает в себя вычисление групповых предпочтений и определение приоритетов. Исследования, основанные на нечетком *ANP*, можно разделить на следующие группы. Первая группа включает работы, в которых модифицируются существующие подходы [27]. Вторая группа исследований использует существующие подходы в конкретной проблемной области. Например, в [28] используют нечеткий метод *ANP* для оценки производительности производственных систем с учетом критериев качества, технического обслуживания и затрат. Нечеткий *ANP* также применялся для отбора подходящих кандидатов для продвижения по службе. Третья группа объединяет различные методы принятия решений и разрабатывает гибридные методы. Так в [29] разрабатывается гибридная модель, которая сочетает в себе нечеткие методы *ANP* и *VIKOR* для выбора концепции городской логистики. Больше всего статей по нечетким методам на основе нечеткого *ANP* публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Computers and Industrial Engineering*, *International Journal of Production Research*, *Applied Mathematical Modelling*. Наиболее цитируемой статьей является [27].

*Нечеткий метод MACBETH* реализует многокритериальный интерактивный подход к принятию решений. Метод позволяет ЛПР оценивать альтернативы путем качественных сравнений относительно различий в их предпочтении при многокритериальном анализе. Отличие *MACBETH* от других многокритериальных нечетких методов заключается в том, что для работы метода необходимы только качественные оценки о разнице в предпочтении между парами решений, чтобы генерировать числовые оценки для вариантов решений по каждому критерию и взвешивать критерии. Публикации по базе *Scopus* статей по нечеткому методу *MACBETH* включают около 200 работ. Например, в [30] оценивались альтернативные источники возобновляемой энергии в условиях неопределенности. Метод *MACBETH* пока не был расширен до версий с использованием интуиционистских нечетких множеств.

*Метод DEMATEL* является одним из лучших инструментов для выявления причинно-следственных связей между критериями оценки решений [31]. Он основан на орграфах, которые связывают множество причин и множество следствий. Метод *DEMATEL* использовался для определения факторов, влияющих на выбор лучших поставщиков, для оценки эффективности их работы и принятию решений при выборе поставщика. В [29] разрабатывается гибридная модель, сочетающая методы *DEMATEL*, *ANP* и *VIKOR*. Литература по нечеткому методу *DEMATEL* по базе *SCOPUS* включает около 600 публикаций по всем областям. Наиболее цитируемой является статья [32].

Еще одним методом, используемым для нечетких задач принятия решений с несколькими атрибутами как способ измерения ожидаемой полезности неопределенного события, является *интеграл Шоке (Choquet)*. В методе предлагается использовать оператор на основе интеграла Шоке для интервально-интуиционистских нечетких множеств. Этот оператор позволяет учитывать важность событий и корреляцию между ними [33].

*Метод анализа охвата данных DEA* применяется для определения эффективности принимаемых решений. В [34] разрабатывается нечеткий метод *DEA* для оценки производительности производственных систем, где входные и выходные данные могут быть нечеткими, предлагается методика, использующая метод *DEA* и нечеткие отношения предпочтений для оценки альтернатив принятия решений. В нем попарные оценки эффективности вычисляются с использованием *DEA*, затем эти оценки используются для построения отношения нечетких предпочтений и согласованного отношения нечетких предпочтений.

В многоцелевых задачах принятия решений необходимо одновременно оптимизировать более одной целевой функции [35]. Такие методы как метод функции полезности, лексикографический метод, целевое программирование, алгоритмы, инспирированные природой, применяются, когда априорной информации о предпочтениях достаточно для получения всех Парето-оптимальных решений [36, 37–39].

Метод нечеткого принятия многоцелевых решений *FMODM* разработан для ситуаций, когда существуют неточности и неопределенность в некоторых целях и переменных, от которых они зависят [40]. Методу *FMODM* согласно базе данных *SCOPUS* посвящены свыше полторы тысячи статей. Исследования, основанные на *FMODM*, в основном, были опубликованы в журналах *International Journal of Production Research*, *European Journal of Operational Research*, *Expert Systems with Applications*, *Computers and Industrial Engineering*, *Fuzzy Sets and Systems*. Основными областями, в которых применялись методы *FMODM*, являются инженерия, информатика, энергетика, экология, материаловедение и биохимия.

Известны также методы нечеткого многоцелевого линейного программирования *FMOLP*, нечеткого многопредметного целевого программирования *FMOGP* и нечеткие эвристические методы принятия решений [41]. Для случая, когда ЛПП не может указать точное значение для каждой цели применяется метод *FMOGP*. Предметными областями, для которых наиболее часто используется *FMOGP*, являются информатика, математика, инженерия.

Большинство реальных задач оптимизации могут иметь противоречивые цели. Это приводит к отказу от поиска оптимального решения и рассмотрению "эффективного решения". Для решения этих сложных многоцелевых задач был разработан ряд нечетких эвристических методов [42]. Примерами являются эволюционные и роевые алгоритмы [43]. Исследования, посвященные разработке методов нечеткого принятия многоцелевых решений, чаще всего публикуются в журналах *Fuzzy Sets and Systems*, *Applied Soft Computing Journal*, and *Engineering Structures*. Предметными областями, для которых наиболее часто используются нечеткие эвристические методы принятия многоцелевых решений, являются инженерия, информатика, математика и энергетика.

В целом нечеткие методы *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *VIKOR*, *TOPSIS*, *AHP*, *ANP*, *DEMATEL* и другие чаще всего применяются в таких предметных областях как инженерия, информатика, принятие решений, математика, экономика и менеджмент. Можно также заключить, что нечеткие методы *MADM* применимы в энергетике, фармацевтике, психологии, медицине, сельском хозяйстве и охране окружающей среды. Если судить по базе *SCOPUS*, то наблюдается экспоненциальный рост использования нечетких многокритериальных методов принятия решений для указанных предметных областей, причем наиболее используемыми методами являются методы нечеткого *AHP* и нечеткого *TOPSIS*.

**Нечеткое многокритериальное групповое принятие решений при эвакуации с интуитивным отношением лингвистических предпочтений.** Работ по применению нечеткой логики для поддержки принятия решений об эвакуации много [42]. Необходимость в массовой эвакуации возникает сравнительно редко, например, в случае крупных стихийных бедствий. Методы, основанные на статистике и численных подходах, чтобы быть хорошо откалиброванными, требуют многочисленных экспериментов. Детерминированные методы и подходы к оптимизации могут дать приемлемые результаты для конечномерных задач, но без учета неопределенностей. Поэтому нечеткая логика, имеющая дело с субъективной неопределенностью, оказывается более эффективной, чем использование только детерминированных, вероятностных или эвристических подходов. Кроме того, применение теории нечетких множеств и нечеткой логики к решению проблем эвакуации и ликвидации последствий стихийных бедствий позволяет включать в модель принятия ре-

шений данные, не поддающиеся количественной оценке, неполную и недоступную информацию, а также частично игнорируемые факты. Поэтому методы нечеткой логики, по-видимому, особенно подходят для принятия решений об эвакуации, когда данных мало, знание причинно-следственных связей неточно, а наблюдения и критерии могут быть выражены в лингвистических качественных терминах.

Групповое принятие наилучшего решения среди альтернатив в нечеткой среде включает четыре этапа: (1) объединение оценок экспертов; (2) получение итоговой оценки для каждой альтернативы, представленной лингвистической переменной; (3) ранжирование альтернатив; (4) групповое принятие наиболее предпочтительного решения. Использование лингвистических переменных при эвакуации делает суждения экспертов более надежными и информативными, нежели числовых оценок. Нечеткое коллективное решение (*Fuzzy Collective Solution, FCS*) широко используется для оценки и ранжирования альтернативных решений, представленных лингвистическими переменными.

Существующие алгоритмы для *FCS* являются инструментом для агрегирования группового принятия наилучших решений с интуитивно понятными отношениями предпочтений. Как известно, интуиционистское нечеткое множество (*Intuitionistic Fuzzy Set, IFS*) является расширением нечеткого множества Заде [44]. Для многих сложных проблем принятия решений использование *IFS* позволяет успешно моделировать неточные и неопределенные данные. В [45] авторы предложили интуитивное нечеткое ядро и консенсусного победителя в групповом принятии решений с интуитивными (индивидуальными и социальными) нечеткими отношениями предпочтений.

Мы предлагаем подход к групповому принятию решений с интуитивным отношением предпочтений на основе процедур агрегирования. Вначале рассмотрим групповую модель принятия решений и концепцию нечеткого группового решения, а затем представим операторы и вычислительные алгоритмы для нечеткого группового решения многокритериальной задачи.

Рассмотрим следующую модель в рамках лингвистических оценок. Предположим, что задан  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – конечный набор альтернатив, имеется  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  – множество экспертов. Пусть, например, менеджер назначает вес  $w(e_k) = w(k)$  для каждого эксперта, так что  $0 \leq w(k) \leq 1$  и  $\sum_k w(k) = 1$ .

Пусть  $S = \{s_t, t = 1, \dots, T\}$  – конечное и полностью упорядоченное множество лингвистических переменных. Предположим, что каждый эксперт  $e_k \in E$  высказывает свое мнение по  $X$  посредством лингвистических предпочтений:  $p_k: X \times X \rightarrow S$ , где  $p_k(i, j) = p_k(x_i, x_j) \in S$  представляет лингвистическую оценку степени предпочтения альтернативы  $x_i$  по сравнению с  $x_j$ . Например, при прогнозировании чрезвычайной ситуации и планировании эвакуации рассматриваются следующие значения лингвистических переменных  $S$ :

$$S = \{I, EU, VLC, SC, IM, MC, ML, EL, C\},$$

которые являются трапециевидными нечеткими числами на интервале  $[0,1]$ . В частности, пусть

- $I$  – невозможно –  $(0, 0, 0, 0)$ ;
- $EU$  – крайне маловероятно –  $(0.00, 0.01, 0.02, 0.07)$ ;
- $VLC$  – очень низкая вероятность –  $(0.04, 0.10, 0.18, 0.23)$ ;
- $SC$  – малый шанс –  $(0.17, 0.22, 0.36, 0.42)$ ;
- $IM$  – это возможно –  $(0.32, 0.41, 0.58, 0.65)$ ;
- $MC$  – значимый шанс –  $(0.58, 0.63, 0.80, 0.86)$ ;
- $ML$  – очень вероятно –  $(0.72, 0.78, 0.92, 0.97)$ ;
- $EL$  – чрезвычайно вероятно –  $(0.93, 0.98, 0.99, 1)$ ;
- $C$  – бесспорно –  $(1, 1, 1, 1)$ ;

В [46] был определен оператор упорядоченного взвешенного усреднения *OWA*, а в [47] – оператор *LOWA*, основанный на *OWA* и выпуклой комбинации лингвистических переменных. Однако при этом не учитывался вес экспертов. Таким образом, мы имеем дело с проблемой агрегирования, в которой веса экспертов неизвестны.

Пусть  $a = \{a_1, \dots, a_m\}$  – набор лингвистических переменных для агрегирования, а  $b$  – связанный вектор упорядоченных переменных, равный  $b = \{a_{im}, a_{i(m-1)}, \dots, a_{i1}\}$ , такой, что  $a_{im} \geq a_{i(m-1)} \geq \dots \geq a_{i1}$ .

Определим оператор *Low* следующим образом:

$$Low(a, w) = C\{(w_{im}, a_{im}), (1 - w_{im}, Low(a', w'))\}, \quad (1)$$

где  $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]$  – вектор весов экспертов, причем  $w_i \in [0, 1]$  и  $\sum_i w_i = 1$ ,  $a' = \{a_{i(m-1)}, \dots, a_{i1}\}$ ,  $w' = \{w'_{i(m-1)}, \dots, w'_{i1}\}$ ,  $w'_j = w_j / (1 - w_{im})$ .

Здесь  $C$  – оператор, реализующий выпуклую комбинацию двух лингвистических переменных  $s_j, s_i, j \geq i$  с  $w_j > 0, w_i > 0, w_j + w_i = 1, C\{(w_j, s_j), (w_i, s_i)\} = s_k$ , где  $k = i + round(w_j (j - i))$ , *round* – обычный оператор округления.

Построим многокритериальную модель принятия групповых решений.

Предположим, что задан конечный набор критериев:  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_L\}$ . Каждый эксперт  $e_k \in E$  высказывает свое мнение по множеству альтернатив  $X$  для каждого критерия посредством лингвистических предпочтений:

$$p_{kl}: X \times X \rightarrow S, \text{ где } p_{kl}(i, j) = p_{kl}(x_i, x_j) \in S, \quad (2)$$

которые представляют лингвистическую оценку степени предпочтения альтернативы  $x_i$  по сравнению с  $x_j$ . Более того, предположим, что заданы веса критериев  $\{\beta_l, l = 1, 2, \dots, L\}$ , такие, что  $0 \leq \beta_l \leq 1, \sum_l \beta_l = 1$ .

Будем считать, что для нашей модели выполняются следующие соотношения:

$$p_{kl}(i, i) = s_{T+1/2}, \forall i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$p_{kl}(i, j) \geq s_{T+1/2}, \text{ для } p_{kl}(j, i) \leq s_{T+1/2}. \quad (4)$$

Пусть  $\{P^k, k = 1, \dots, m\}$  – отношения лингвистических предпочтений. Для каждого  $(i, j), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$ , и для каждого  $s_t \in S$  положим

$$W_{i,j}[s_t] = \sum_k \{w(k): P^k(i, j) = s_t\}. \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой сумму индивидуальных весов экспертов, чтобы присвоить лингвистической переменной  $s_t$  в качестве значения предпочтения альтернативы  $x_i$  по сравнению с  $x_j$ .

Теперь необходимо наметить подход к определению нечеткого группового решения *FCS* и применить его для оценки и ранжирования множества альтернатив.

Подход к определению *FCS* аналогичен концепции агрегированных степеней доминирования альтернатив. Для каждой пары альтернатив  $(x_i, x_j)$  степень лингвистического доминирования определяется как

$$E(x_i, x_j) = Low(S, U), \quad (6)$$

где  $U = [u_T, \dots, u_1], u_t = W_{ij}[s_t], t = 1, \dots, T$ .

Тогда нечеткое групповое решение *FCS* представляет собой нечеткое множество на множестве альтернатив  $X$ :

$$FCS = \{fcs(x_1)/x_1, fcs(x_2)/x_2, \dots, fcs(x_n)/x_n\}, \quad (7)$$

где степень принадлежности альтернативы  $x_i$  рассчитывается следующим образом:

$$fcs(x_i) = Low(S, V),$$

где  $V = [v_T, \dots, v_1], t = 1, \dots, T, v_t = \#\{j: E(x_i, x_j) = s_t\} / (n - 1)$ .

Предположим, что для каждого критерия  $C_l$  получено соответствующее нечеткое групповое решение  $FCS_l$ :

$$FCS_l = \{fcs_l(x_1)/x_1, \dots, fcs_l(x_n)/x_n\}, l = 1, \dots, L.$$

Тогда агрегированное нечеткое коллективное решение  $aFCS$  представляет собой нечеткое множество на множестве альтернатив  $X$ :

$$aFCS = \{afcs(x_1)/x_1, afcs(x_2)/x_2, \dots, afcs(x_n)/x_n\}, \quad (8)$$

где степень принадлежности альтернативы  $x_i$  рассчитывается как

$$afcs(x_i) = Low(S, U_\beta), i = 1, \dots, n,$$

где  $U_\beta = [u_{\beta_T}, \dots, u_{\beta_1}]$ ,  $u_{\beta_T} = \sum_l \{\beta_l: fcs(x_i) = s_t\}$ ,  $t = 1, \dots, T$ .

Таким образом,  $aFCS$  является нечетким множеством типа 2 на  $X$ .

Рассмотрим алгоритмы с использованием  $aFCS$ .

**Алгоритм 1.**

Шаг 1. Вычислить степень лингвистического доминирования  $E_l$  для каждого критерия  $C_l$ , используя множество предпочтений  $\{p_{kl}, k = 1, \dots, m\}$  и весов  $\{w(k): e_k \in E\}$ :

$$E_l = [E_l(i, j)] = [E(x_i, x_j)], i, j = 1, \dots, n, \quad (9)$$

где  $E_l(x_i, x_j) = Low(S, U_l)$ ,  $U_l = [u_{lT}, \dots, u_{l1}]$ ,

$$u_{lt} = W_{ij}(s_t) = \sum_k \{w(k): p_{kl}(i, j) = s_t\}, t = 1, \dots, T.$$

Шаг 2. Используя (9), вычислить нечеткое групповое решение:

$$FCS_l = \{fcs_l(x_1)/x_1, fcs_l(x_2)/x_2, \dots, fcs_l(x_n)/x_n\}, l = 1, \dots, L. \quad (10)$$

Шаг 3. Используя (10) и веса  $\{\beta_l, l = 1, \dots, L\}$ , вычислить агрегированное нечеткое групповое решение  $aFCS$ :

$$aFCS = \{afcs(x_1)/x_1, afcs(x_2)/x_2, \dots, afcs(x_n)/x_n\}. \quad (11)$$

Шаг 4. Ранжировать множество альтернатив  $X$  в соответствии с (11):

$$X_t = \{x_i: afcs(x_i) = s_t\}, t = 1, \dots, T. \quad (12)$$

Решением будет являться подмножество

$$X_{t^*}, \text{ где } t^* = \max \{t: X_t \neq \emptyset, s_t \in S\}.$$

**Алгоритм 2.**

Шаг 1. Вычислить степень лингвистического доминирования  $E_l$  для каждого критерия  $C_l$ , согласно (9):

$$E_l = [E(x_i, x_j)], i, j = 1, \dots, n, l = 1, \dots, L.$$

Шаг 2. Используя  $\{E_l, l = 1, \dots, L\}$  и множество весов  $\{\beta_l, l = 1, \dots, L\}$ , вычислить общее групповое мнение:

$$Q = [q(i, j)] = [q(x_i, x_j)], i, j = 1, \dots, n, \quad (13)$$

где  $q(x_i, x_j) = Low(S, U_q)$ ,  $U_q = [u_{qT}, \dots, u_{q1}]$ ,

$$u_{qt} = W_{ij}^q(s_t) = \sum_l \{\beta_l: E_l(i, j) = s_t\}, t = 1, \dots, T.$$

Шаг 3. Вычислить нечеткое коллективное решение  $FCS_Q$  в соответствии с общим групповым мнением  $Q$ :

$$FCS_Q = \{fcs_Q(x_1)/x_1, fcs_Q(x_2)/x_2, \dots, fcs_Q(x_n)/x_n\}. \quad (14)$$



Шаг 4. Разбиваем множество альтернатив  $X$  на подмножества

$$X_t = \{x_i: fcs_Q(x_i) = s_t\}, t = 1, \dots, T \quad (15)$$

и выбрать решение, аналогично шагу 4 алгоритма 1.

**Алгоритм 3.**

Шаг 1. Вычислить *относительные степени доминирования*  $F^k$  для каждого эксперта  $e_k$ , используя множество предпочтений  $\{p_{kl}, l = 1, \dots, L\}$  и весов  $\{\beta_l, l = 1, \dots, L\}$ , как

$$F^k = [F^k(i, j)] = [F^k(x_i, x_j)], i, j = 1, \dots, n, \quad (16)$$

где  $F^k(x_i, x_j) = Low(S, U^k), U^k = [u_{1T}^k, \dots, u_{11}^k]$ ,

$$u_t^k = \sum_l \{\beta_l: p_{kl}(i, j) = s_t\}, t = 1, \dots, T.$$

Шаг 2. С помощью  $F^k$  вычислить нечеткую оценку  $FE^k$  по мнению эксперта  $e_k$ :

$$FE^k = \{fe^k(x_1)/x_1, \dots, fe^k(x_n)/x_n\}, \quad (17)$$

где степень принадлежности альтернативы  $x_i$  рассчитывается как

$$fe^k(x_i) = Low(S, V_k), i = 1, \dots, n, \quad (18)$$

где  $V_k = [v_T, \dots, v_1], v_t = |\{j: F^k(x_i, x_j) = s_t, j \neq i\}| / (n - 1), t = 1, \dots, T.$

Шаг 3. Вычислить согласно (8) агрегированную нечеткую оценку  $aFE$  на  $X$ , используя нечеткие оценки  $\{FE^k, k=1, \dots, m\}$  и веса  $\{w(k): e_k \in E\}$ :

$$aFE = \{afe(x_1)/x_1, \dots, afe(x_n)/x_n\}. \quad (19)$$

Шаг 4. Разбиваем множество альтернатив  $X$  на подмножества

$$X_t = \{x_i: afe(x_i) = s_t\}, t = 1, \dots, T \quad (20)$$

и выбрать решение, аналогично шагу 4 алгоритма 1.

**Заключение.** Нечеткие методы *MADM* и *MODM* широко представлены в литературе, разработаны и успешно применяются во многих областях для решения многокритериальных задач при расплывчатых и неполных данных. Журналами, в которых чаще всего публикуются приложения и теоретические разработки по нечетким методам *MADM* и *MODM* являются *Expert Systems with Applications, Computer Integrated Manufacturing Systems, International Journal of Production Research, European Journal of Operational Research, Computers and Industrial Engineering, and Fuzzy Sets and Systems*, причем наблюдается тенденция к увеличению числа публикаций.

В статье представлен анализ проблемы принятия многокритериальных групповых решений при лингвистических оценках. Модель отношений лингвистических предпочтений является полезным инструментом для представления выбора лиц, принимающих решения. Разработаны операторы агрегации и алгоритмы, использующие нечеткое групповое решение. В перспективе планируется исследовать различные процедуры агрегирования в ситуациях с интуитивной нечеткой информацией о предпочтениях типа 2.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петровский А.Б. Теория принятия решений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009.
2. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.
3. Garibaldi J.M., Jaroszewski M., Musikasawan S. Nonstationary Fuzzy Sets // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2008. – Vol. 16 (4). – P. 1072-1086.
4. Torra V. Hesitant fuzzy sets // Jour. Int. Intell. Syst. – 2010. – Vol. 25 (6). – P. 529-539.
5. Bender M.J., Simonovic S.P. A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty // Fuzzy Sets Syst. – 2000. – Vol. 115 (1). – P. 35-44.

6. *Vahdani B., Hadipour H.* Extension of the ELECTRE method based on interval-valued fuzzy sets // *Soft Comput.* – 2011. – Vol. 15 (3). – P. 569-579.
7. *Rouyendegh B., Erkan T.* An Application of the Fuzzy ELECTRE Method for Staff Selection // *Hum. Factor Ergon. Man.* – 2013. – Vol. 23 (2). – P. 107-115.
8. *Kaya T., Kahraman C.* A fuzzy approach to ebanking website quality assessment based on an integrated AHP-ELECTRE method // *Technological and Economic Development of Economy.* – 2011. – 17 (2). – P. 313-334.
9. *Wu M.-C., Chen T.-Y.* The ELECTRE multicriteria analysis approach based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets // *Expert Syst. Appl.* – 2011. – Vol. 38 (10). – P. 12318-12327.
10. *Chen T.-Y.* An ELECTRE-based outranking method for multiple criteria group decision making using interval type-2 fuzzy sets // *Inform. Sciences.* – 2014. – Vol. 263. – P. 1-21.
11. *Goumas M., Lygerou V.* An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects // *Eur. Jour. Oper. Res.* – 2000. – Vol. 123 (3). – P. 606-613.
12. *Chang T.H.* Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan // *Inform. Sciences.* – 2014. – Vol. 271. – P. 196-212.
13. *Kacprzyk J., Zadrozny S., Nurmi H., Bozhenyuk A.* Towards Innovation Focused Fuzzy Decision Making // *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems.* – 2021. – P. 256-268.
14. *Ebrahimnejad S., et. al.* Risk ranking in mega projects by fuzzy compromise approach: A comparative analysis // *Jour. Intell. Fuzzy Systems.* – 2014. – Vol. 26 (2). – P. 949-959.
15. *Sanayei A., Mousavi S.F., Yazdankhah A.* Group decision making process for supplier selection with VIKOR under fuzzy environment // *Expert Syst. Appl.* – 2010. – Vol. 37 (1). – P. 24-30.
16. *Chen S., Hwang C.L.* *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications.* – Springer Verlag, 1992.
17. *Ye F., Li Y.N.* An extended TOPSIS model based on the Possibility theory under fuzzy environment // *Knowl.-Based Systems.* – 2014. – Vol. 67. – P. 263-269.
18. *Boran F.E., et. al.* A multicriteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method // *Expert Systems Appl.* – 2009. – Vol. 36 (8). – P. 11363-11368.
19. *Zeng J., An M., Smith N.J.* Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment // *Int. Jour. of Project Management.* – 2007. – Vol. 25 (6). – P. 589-600.
20. *Rodzin S., Rodzina O.* Metaheuristics memes and biogeography for trans computational combinatorial optimization problems // *Proc. of the 6th Int. Conf. – Cloud System and Big Data Engineering.* – 2016. – P. 1-5.
21. *Xu Z., Liao H.* Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process // *IEEE Trans. Fuzzy Systems.* – 2014. – Vol. 22 (4). – P. 749-761.
22. *Wang Y., et. al.* Selecting a cruise port of call location using the fuzzy-AHP method: A case study in East Asia // *Tourism Management.* – 2014. – Vol. 42. – P. 262-270.
23. *El-Khatib S., Rodzin S., Skobtsov Yu.* Investigation of optimal heuristical parameters for mixed ACO-k-means segmentation algorithm for MRI images // *Proc. 3rd Int. Scientific Conf. on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM).* – 2016. – Vol. 51. – P. 216-221.
24. *Cho J., Lee J.* Development of a new technology product evaluation model for assessing commercialization opportunities using Delphi method and fuzzy AHP approach // *Expert Syst. Appl.* – 2013. – Vol. 40 (13). – P. 5314-5330.
25. *Chan F.T.S., Kumar N.* Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach // *Omega-Int. Jour. Manage Syst.* – 2007. – Vol. 35 (4). – P. 417-431.
26. *Saaty T.L.* *Theory and applications of the analytic network process.* – RWS Publications, 2005.
27. *Onut S., Kara S.S., Isik E.* Long term supplier selection using a combined fuzzy MCDM approach: A case study for a telecommunication company // *Expert Syst. Appl.* – 2009. – Vol. 36 (2). – P. 3887-3895.
28. *Pourjavad E., Shirouyehzad H.* Evaluating manufacturing systems by fuzzy ANP: A case study // *Int. Jour. of Appl. Manag. Science.* – 2014. – Vol. 6 (1). – P. 65-83.
29. *Tadic S., et. al.* A novel hybrid MCDM model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and f VIKOR for city logistics concept selection // *Expert Systems with Appl.* – 2014. – Vol. 41 (18). – P. 8112-8128.

30. *Ertay T. et al.* Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey // *Technological and Economic Development of Economy*. – 2013. – Vol. 19 (1). – P. 38-62.
31. *Chang B., Chang C.-W., Wu C.-H.* Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria // *Expert Syst Appl.* – 2011. – Vol. 38 (3). – P. 1850-1858.
32. *Wu W.-W., Lee Y.-T.* Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method // *Expert Syst. Appl.* – 2007. – Vol. 32 (2). – P. 499-507.
33. *Xu Z.* Choquet integrals of weighted intuitionistic fuzzy information // *Inform. Sciences*. – 2010. – Vol. 180 (5). – P. 726-736.
34. *Liu S.-T.* A fuzzy DEA/AR approach to the selection of flexible manufacturing systems // *Comput. Ind. Eng.* – 2008. – Vol. 54 (1). – P. 66-76.
35. *Ногин В.Д.* Принятие решений при многих критериях. – СПб.: Изд-во «ЮТАС», 2007.
36. *Борисов А.И.* Принятие решений на основе нечетких моделей. – М.: Наука, 1990.
37. *Ларичев О.И.* Вербальный анализ решений. – М.: Наука, 2006.
38. *Подиновский В.В.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Физматлит, 2007.
39. *Родзин С.И., Родзина Л.С.* Биоинспирированный поиск решений: теория и приложения для обработки проблемно-ориентированных знаний в геоинформатике // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 4. – С. 203-216.
40. *Kahraman C., Cevik S., Oztaysi B.* Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review // *Int. Jour. of Computational Intelligence Systems*. – 2015. – No. 8 (4). – P. 637-666.
41. *Родзин С.И.* Биоэвристики многокритериальной оптимизации: проектирование и гибридизация // *Тр. межд. конгресса IS&IT'18*. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2018. – Т. 1. – С. 33-47.
42. *Герасименко Е.М., Курейчик В.В., Родзин С.И., Кухаренко А.П.* Применение нечеткой логики для принятия решений об эвакуации при наводнении // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 4. – С. 15-29.
43. *Родзина О.Н.* Проблемно-ориентированные алгоритмы мягких вычислений. – Чебоксары: Издательский дом «Среда», 2020. – 96 с.
44. *Atanassov K.* Intuitionistic Fuzzy Sets: Theory and Applications. Physica, 1999.
45. *Szmidt E., Kasprzyk J.* Using intuitionistic fuzzy sets in group decision making // *Control and Cybernetics*. – 2002. – Vol. 31. – P. 1055-1057.
46. *Yager R.R.* On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making // *IEEE Trans. on systems. Man and Cybernetics*. – 1988. – Vol. 18 (1). – P. 183-190.
47. *Llamazares B.* Choosing OWA operator weights in the field of Social Choice // *Information Sciences*. – 2007. – Vol. 177 (21). – P. 4745-4756.

## REFERENCES

1. *Petrovskiy A.B.* Teoriya prinyatiya resheniy [Decision Theory]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2009.
2. *Zade L.A.* Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow: Mir, 1976.
3. *Garibaldi J.M., Jaroszewski M., Musikasuwan S.* Nonstationary Fuzzy Sets, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, Vol. 16 (4), pp. 1072-1086.
4. *Torra V.* Hesitant fuzzy sets, *Jour. Int. Intell. Syst.*, 2010, Vol. 25 (6), pp. 529-539.
5. *Bender M.J., Simonovic S.P.* A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty, *Fuzzy Sets Syst.*, 2000, Vol. 115 (1), pp. 35-44.
6. *Vahdani B., Hadipour H.* Extension of the ELECTRE method based on interval-valued fuzzy sets, *Soft Comput.*, 2011, Vol. 15 (3), pp. 569-579.
7. *Rouyendegh B., Erkan T.* An Application of the Fuzzy ELECTRE Method for Staff Selection, *Hum. Factor Ergon. Man.*, 2013, Vol. 23 (2), pp. 107-115.
8. *Kaya T., Kahraman C.* A fuzzy approach to ebanking website quality assessment based on an integrated AHP-ELECTRE method, *Technological and Economic Development of Economy*, 2011, 17 (2), pp. 313-334.
9. *Wu M.-C., Chen T.-Y.* The ELECTRE multicriteria analysis approach based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets, *Expert Syst. Appl.*, 2011, Vol. 38 (10), pp. 12318-12327.

10. Chen T.-Y. An ELECTRE-based outranking method for multiple criteria group decision making using interval type-2 fuzzy sets, *Inform. Sciences*, 2014, Vol. 263, pp. 1-21.
11. Goumas M., Lygerou V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects, *Eur. Jour. Oper. Res.*, 2000, Vol. 123 (3), pp. 606-613.
12. Chang T.H. Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan, *Inform. Sciences*, 2014, Vol. 271, pp. 196-212.
13. Kacprzyk J., Zadrozny S., Nurmi H., Bozhenyuk A. Towards Innovation Focused Fuzzy Decision Making, *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 2021, pp. 256-268.
14. Ebrahimnejad S., et. el. Risk ranking in mega projects by fuzzy compromise approach: A comparative analysis, *Jour. Intell. Fuzzy Systems*, 2014, Vol. 26 (2), pp. 949-959.
15. Sanayei A., Mousavi S.F., Yazdankhah A. Group decision making process for supplier selection with VIKOR under fuzzy environment, *Expert Syst. Appl.*, 2010, Vol. 37 (1), pp. 24-30.
16. Chen S., Hwang C.L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications. Springer Verlag, 1992.
17. Ye F., Li Y.N. An extended TOPSIS model based on the Possibility theory under fuzzy environment, *Knowl.-Based Systems*, 2014, Vol. 67, pp. 263-269.
18. Boran F.E., et. al. A multicriteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method, *Expert Systems Appl.*, 2009, Vol. 36 (8), pp. 11363-11368.
19. Zeng J., An M., Smith N.J. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment, *Int. Jour. of Project Management*, 2007, Vol. 25 (6), pp. 589-600.
20. Rodzin S., Rodzina O. Metaheuristics memes and biogeography for trans computational combinatorial optimization problems, *Proc. of the 6th Int. Conf. – Cloud System and Big Data Engineering*, 2016, pp. 1-5.
21. Xu Z., Liao H. Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 2014, Vol. 22 (4), pp. 749-761.
22. Wang Y., et. al. Selecting a cruise port of call location using the fuzzy-AHP method: A case study in East Asia, *Tourism Management*, 2014, Vol. 42, pp. 262-270.
23. El-Khatib S., Rodzin S., Skobitsov Yu. Investigation of optimal heuristical parameters for mixed ACO-k-means segmentation algorithm for MRI images, *Proc. 3rd Int. Scientific Conf. on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM)*, 2016, Vol. 51, pp. 216-221.
24. Cho J., Lee J. Development of a new technology product evaluation model for assessing commercialization opportunities using Delphi method and fuzzy AHP approach, *Expert Syst. Appl.*, 2013, Vol. 40 (13), pp. 5314-5330.
25. Chan F.T.S., Kumar N. Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach, *Omega-Int. Jour. Manage Syst.*, 2007, Vol. 35 (4), pp. 417-431.
26. Saaty T.L. Theory and applications of the analytic network process. RWS Publications, 2005.
27. Onut S., Kara S.S., Isik E. Long term supplier selection using a combined fuzzy MCDM approach: A case study for a telecommunication company, *Expert Syst. Appl.*, 2009, Vol. 36 (2), pp. 3887-3895.
28. Pourjavad E., Shirouyehzad H. Evaluating manufacturing systems by fuzzy ANP: A case study, *Int. Jour. of Appl. Manag. Science*, 2014, Vol. 6 (1), pp. 65-83.
29. Tadic S., et. al. A novel hybrid MCDM model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and f VIKOR for city logistics concept selection, *Expert Systems with Appl.*, 2014, Vol. 41 (18), pp. 8112-8128.
30. Ertay T. et. al. Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey, *Technological and Economic Development of Economy*, 2013, Vol. 19 (1), pp. 38-62.
31. Chang B., Chang C.-W., Wu C.-H. Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria, *Expert Syst Appl.*, 2011, Vol. 38 (3), pp. 1850-1858.
32. Wu W.-W., Lee Y.-T. Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method, *Expert Syst. Appl.*, 2007, Vol. 32 (2), pp. 499-507.
33. Xu Z. Choquet integrals of weighted intuitionistic fuzzy information, *Inform. Sciences.*, 2010, Vol. 180 (5), pp. 726-736.
34. Liu S.-T. A fuzzy DEA/AR approach to the selection of flexible manufacturing systems, *Comput. Ind. Eng.*, 2008, Vol. 54 (1), pp. 66-76.
35. Nogin V.D. Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh [Decision-making under many criteria]. St. Petersburg: Izd-vo «YuTAS», 2007.

36. *Borisov A.I.* Prinyatie resheniy na osnove nechetkikh modeley [Decision-making based on fuzzy models]. Moscow: Nauka, 1990.
37. *Larichev O.I.* Verbal'nyy analiz resheniy [Verbal analysis of solutions]. Moscow: Nauka, 2006.
38. *Podinovskiy V.V.* Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach [Pareto-optimal solutions to multi-criteria problems]. Moscow: Fizmatlit, 2007.
39. *Rodzin S.I., Rodzina L.S.* Bioinspirirovannyy poisk resheniy: teoriya i prilozheniya dlya obrabotki problemno-orientirovannykh znaniy v geoinformatike [Bioinspired search for solutions: theory and applications for processing problem-oriented knowledge in geoinformatics], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4, pp. 203-216.
40. *Kahraman C., Cevik S., Oztaysi B.* Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review, *Int. Jour. of Computational Intelligence Systems*, 2015, No. 8 (4), pp. 637-666.
41. *Rodzin S.I.* Bioevristiki mnogokriterial'noy optimizatsii: proektirovanie i gibridizatsiya [Bio heuristics of multicriteria optimization: design and hybridization], *Tr. mezhd. kongressa IS&IT'18* [Proceedings of the international congress IS&IT'18]. Taganrog: Izd-vo Stupina S.A., 2018, Vol. 1, pp. 33-47.
42. *Gerasimenko E.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I., Kukharenskiy A.P.* Primenenie nechetkoy logiki dlya prinyatiya resheniy ob evakuatsii pri navodnenii [Application of fuzzy logic for decision-making on evacuation in case of flooding], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4, pp. 15-29.
43. *Rodzina O.N.* Problemno-orientirovannyye algoritmy myagkikh vychisleniy [Problem-oriented algorithms of soft computing]. Cheboksary: Izdatel'skiy dom «Sreda», 2020, 96 p.
44. *Atanassov K.* Intuitionistic Fuzzy Sets: Theory and Applications. Physica, 1999.
45. *Szmidt E., Kacprzyk J.* Using intuitionistic fuzzy sets in group decision making, *Control and Cybernetics*, 2002, Vol. 31, pp. 1055-1057.
46. *Yager R.R.* On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making, *IEEE Trans. on systems, Man and Cybernetics*, 1988, Vol. 18 (1), pp. 183-190.
47. *Llamazares B.* Choosing OWA operator weights in the field of Social Choice, *Information Sciences*, 2007, Vol. 177 (21), pp. 4745-4756.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

**Родзин Сергей Иванович** – Южный федеральный университет; e-mail: srodzin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; профессор.

**Боженюк Александр Витальевич** – e-mail: avb002@yandex.ru; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; профессор.

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

**Родзина Ольга Николаевна** – e-mail: orodzina@sfedu.ru; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; ст. преподаватель.

**Rodzin Sergey Ivanovich** – Southern Federal University; e-mail: srodzin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371673; the department of software engineering; professor.

**Bozhenyuk Alexander Vitalyevich** – e-mail: avb002@yandex.ru; phone: +78634371651; the department of information and analytical security system; professor.

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

**Rodzina Olga Nikolaevna** – e-mail: orodzina@sfedu.ru; phone: +78634371673; the department of software engineering; senior teacher.

**Е.М. Герасименко, Д.Ю. Кравченко, Ю.А. Кравченко, Э.В. Кулиев**  
**ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ**  
**И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**  
**НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО МЕТОДА СТРУКТУРИРОВАНИЯ**  
**ИНФОРМАЦИИ\***

*Статья посвящена решению научной проблемы поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) на основе решения задачи структурирования информации. Актуальность данной задачи обусловлена необходимостью развития теоретических основ оптимизации риска возникновения неблагоприятных воздействий на здоровье человека и окружающую природную среду в связи с чрезвычайными ситуациями (ЧС). Авторами даны определения основным терминам исследуемой предметной области. Представлена формализованная постановка решаемой задачи. Приведена развернутая классификация чрезвычайных ситуаций с описанием особенностей представленных классов. Система правил для поддержки принятия решений при чрезвычайных ситуациях должна иметь многоуровневую иерархию, что позволяет обеспечить построение различных траекторий принятия решений по принципу сверху-вниз. Наиболее подходящей моделью для построения такого информационного пространства является онтологическая структура, которая обеспечивает создание необходимой многоуровневой иерархии с учетом всех параметров и критериев, влияющих на развитие ситуации. Основными элементами данной онтологической модели являются сущности и связи между ними, наличие которых на верхнем уровне декомпозиции будет указывать на риск возникновения чрезвычайной ситуации, а на каждом более низком уровне – будет разворачивать таксономию детального описания возможных ситуаций развития ЧС и необходимых действий для их предотвращения или ликвидации последствий. Обработка построенной онтологической модели правил реализуется в работе на основе применения предложенного авторами нечеткого метода структурирования информации при ЧС, который отличается от известных аналогов применением нового обобщенного критерия оптимизации выбора альтернатив поддержки принятия решений. Оригинальность оптимизационной постановки задачи структурирования заключается в оценке контекстной привязки элементов информации к определенному классу чрезвычайных ситуаций, междисциплинарности с учетом наличия множества связей между предметными областями, а также учета снижения уровня оперативности информации о протекании ЧС с течением времени.*

*Чрезвычайные ситуации; поддержка принятия решений; нечеткие правила; онтология; классификация; структурирование информации.*

**E.M. Gerasimenko, D.Yu. Kravchenko, Yu.A. Kravchenko, E.V. Kuliev**  
**DECISION SUPPORT FOR PREVENTION AND ELIMINATION**  
**OF THE EMERGENCIES' CONSEQUENCES BASED**  
**ON THE INFORMATION STRUCTURING FUZZY METHOD**

*The article is devoted to solving the scientific problem of decision support for the prevention and elimination of emergencies' consequences based on solving the problem of structuring information. The relevance of this task is due to the need to develop theoretical foundations for optimizing the risk of adverse effects on human health and the environment in connection with emergencies. 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 emergencies' classification with a description of the presented classes' features is given. The system of rules for decision support in emergencies should have a multi-level hierarchy, which allows for the construction of various*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121, <https://rscf.ru/project/22-71-10121/> в Южном федеральном университете.

decision-making trajectories on a top-down basis. The most suitable model for building such an information space is an ontological structure that provides the creation of the necessary multi-level hierarchy, taking into account all the parameters and criteria that affect the development of the situation. The main elements of this ontological model are entities and relationships between them, the presence of which at the upper level of decomposition will indicate the risk of an emergency, and at each lower level it will expand the taxonomy of a detailed description of emergencies' possible situations and the necessary actions to prevent or eliminate them consequences. The processing of this ontological model of rules is implemented on the basis of the structuring information fuzzy method proposed by the authors in emergencies, which differs from known analogs by the use of a new generalized criterion for optimizing the choice of decision support alternatives. The originality of the optimization formulation of the structuring problem lies in the assessment of the information elements contextual binding to a certain class of emergency situations, interdisciplinary, taking into account the presence of many links between subject areas, as well as taking into account the decrease in the level of information efficiency about the course of emergencies over time.

*Emergencies; decision support; fuzzy rules; ontologies; classification; information structuring.*

**Введение.** Эффективное решение оптимизационной задачи минимизации риска возникновения неблагоприятных воздействий на здоровье человека и окружающую природную среду в связи с чрезвычайными ситуациями (ЧС) требует проведения классификации основных типов ЧС и определения базовых критериев оценки действий ответственных лиц в процессе предотвращения и/или устранения последствий ЧС.

Дадим определение понятию **чрезвычайная ситуация**. Под термином ЧС будем понимать некоторые непредвиденные условия, приведшие к возникновению инфекционных болезней, аварий, катастроф, природного стихийного или техногенного бедствия, что создает на определенной территории обстановку, которая в ближайшей перспективе приводит к ущербу здоровью людей или к человеческим жертвам, а также к значительным материальным потерям и ущербу природной среде с последующим ухудшением качества среды жизнедеятельности людей. Источник любого типа ЧС имеет два основных класса **поражающих факторов** (ПФ) – *первичный* и *вторичный* [1–5]. Первичный ПФ наступает одновременно с началом чрезвычайной ситуации, а вторичный – инициируется первичным позднее, либо не проявляется вообще. Поражающие факторы имеют **виды воздействия** представленные на рис. 1.

Центральным фактором, приводящим к возникновению неблагоприятных воздействий на здоровье человека и окружающую природную среду принято считать **опасность** [1]. Актуализация понятия «опасность» напрямую связана с появлением некоторого **источника опасности** – процесса в определенной области исследуемого пространства, воздействие которого оцениваются как вредоносные (опасные природные явления, стихийные бедствия). Техногенная сфера наиболее всего подвержена воздействию источников опасности на **потенциально опасные объекты** [1–4].

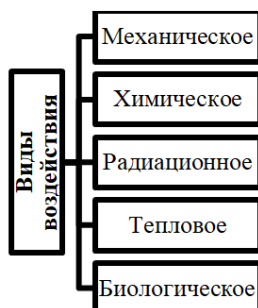


Рис. 1. Виды воздействия поражающих факторов

Основными критериями оценки и сравнения опасностей ЧС являются: условия неприемлемости (недопустимости) определенной опасности; формализация границы между опасностью и безопасностью. Данные нечеткие критерии сводятся к оценке опасности на основе определения значения показателя **риска**.

**1. Постановка задачи оптимизации риска возникновения чрезвычайных ситуаций.** В работе [5] под термином «риск» понимают величину, которая включает в себя вероятность возникновения опасных событий и среднее значение ущерба от них. Таким образом, показатель риска может быть представлен в виде следующего выражения:

$$R = PD \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $P$  – частота возникновения опасного события в течение года (вероятность),  $D$  – среднее значение ущерба от данного опасного события.

Получение численного значения показателя риска позволяет оценить опасность, а также разработать и спрогнозировать меры по ее снижению. Решение данной оптимизационной задачи подразумевает сохранение определенного баланса между основным критерием и ограничениями решения задачи. Любые мероприятия по снижению риска подразумевают появление весомой статьи расходов, что для любого вида деятельности имеет критичное значение предела величины таких расходов, именно поэтому должен соблюдаться баланс между прогнозом возникновения возможных опасных ситуаций и рентабельностью проводимой деятельности. С данным балансом напрямую связано понятие **приемлемого риска** [5]. Определение значений приемлемого риска требует комплексного рассмотрения проблемы, учитывающего технические, экономические, социальные, психологические и иные аспекты.

Подобная задача имеет высокую научную сложность из-за наличия информационной неопределенности комплексного учета разнородных характеристик, которые в ряде случаев невозможно нормировать и привести к единой шкале измерения. С учетом указанной информационной неопределенности показателей оценки опасности тех или иных событий в настоящее время защищенность человека и окружающей среды от ЧС оцениваются не по показателям качества жизни, а по предельным величинам характеристик надежности и эффективности технических систем, от которых прямо или косвенно зависит безопасность. Поэтому в данном случае процесс повышения безопасности жизнедеятельности имеет сугубо технический характер и строится на основе подхода к учету последствий возникающих ЧС. В связи с этим принята следующая **классификация безопасности** (рис. 2):

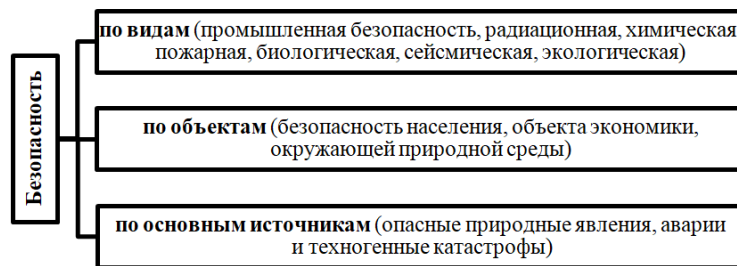


Рис. 2. Классификация безопасности

Несмотря на спорный характер такого технического подхода к оценке защищенности человека от ЧС, он в настоящее время является единственно приемлемым [1–3], позволяющим преодолеть проблему информационной неопределенности, а также контролировать и снижать опасность возникновения чрезвычайных ситуаций.



**2. Классификация чрезвычайных ситуаций.** В базовой терминологии [1] ЧС делят на два основных класса: **конфликтные** и **бесконфликтные**. Данные классы имеют четкую границу разделения признаков, характеристики и значения которых практически не пересекаются. Класс конфликтных ЧС имеет следующие основные подклассы (рис. 3):

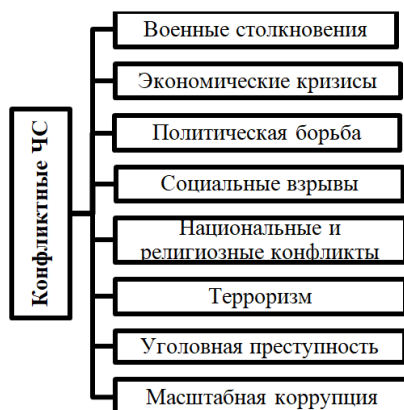


Рис. 3. Классификация конфликтных ЧС

Классификация бесконфликтных ЧС является более широкой и развернутой. Данную классификацию необходимо рассматривать по многим признакам, которые характеризуют явления с разных сторон [1]. Представим такую таксономию бесконфликтных ЧС (рис. 4).

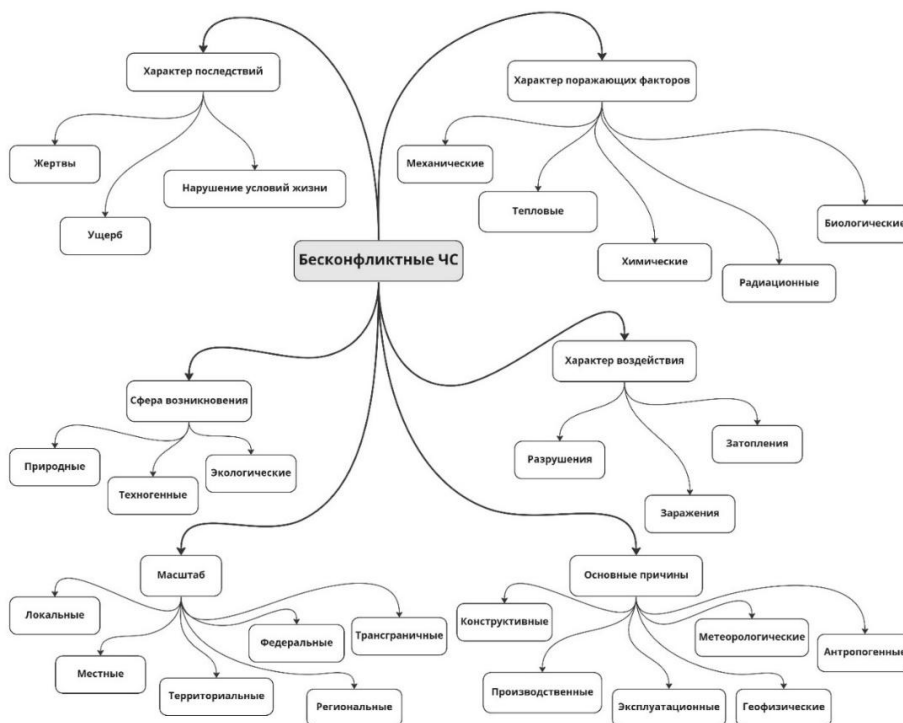


Рис. 4. Классификация бесконфликтных ЧС

Рассмотрим более подробно надкласс ЧС, связанный с определением сферы их возникновения [1–5]. Раскроем в данном классе состав **трёх базовых подклассов чрезвычайных ситуаций: ЧС природного характера; ЧС техногенного характера; ЧС экологического характера**. Составы данных подклассов ЧС опишем на примере, проиллюстрированном на рис. 5.

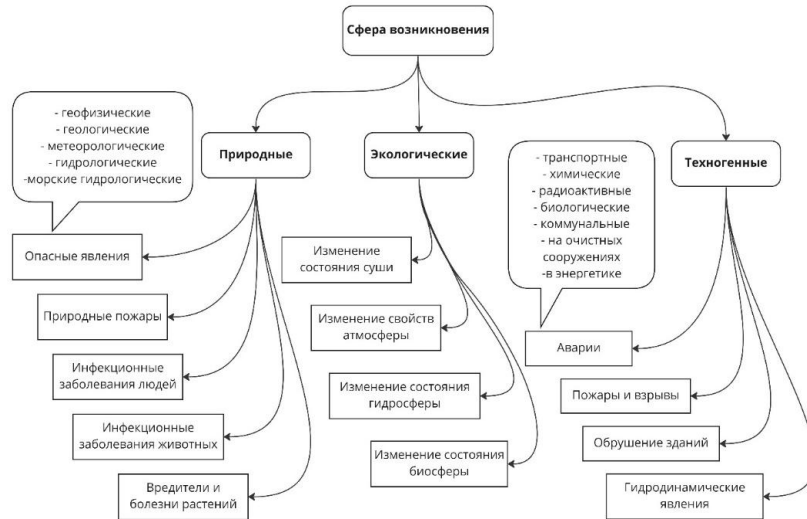


Рис. 5. Состав базовых подклассов ЧС по классу сфер возникновения

Отметим, что территория нашей страны имеет широкий спектр типов ЧС природного характера, которые могут быть вызваны различными опасными природными явлениями и процессами (землетрясения, ураганы, бури, смерчи, метели, вьюги, оползни, сели, обвалы, снежные лавины, пожары, наводнения и т.д.).

3. Разработка нечеткого метода структурирования информации при поддержке принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Комбинации низкоуровневых правил «если-то», построенные для конкретных прецедентов возникновения и развития ЧС, будут создавать уникальные наборы альтернатив поддержки принятия решений по устранению последствий возникновения той или иной чрезвычайной ситуации [6-11]. Каждая такая альтернатива является по своей сути траекторией, отражающей последовательность действия с множеством уточняющих вариаций, построенных на основе применения нечетких методов структурирования оперативной информации.

В большинстве случаев *оперативная информация о ЧС будет поступать в центры мониторинга в виде текстовых корпусов данных*. В подобной ситуации **нечеткий метод структурирования информации** будет состоять из последовательности операций семантической фильтрации [11–17]. Основным преимуществом данного нечеткого метода является его универсальность. Опишем разработку предложенного нечеткого метода структурирования информации.

Пусть имеется множество из  $n$  альтернатив поддержки принятия решений по устранению последствий возникновения ЧС. При этом,  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$  – множество значений предпочтительности построенных альтернатив по одному из критериев  $Q_i, i = 1, \dots, k$ , которые задаются на нечетком множестве с применением функции принадлежности  $\mu_{Q_i}$ , определяющей степень соответствия альтернативы  $t_j, j = 1, \dots, n$  событию, оцениваемому критерием  $Q_i$ . По итогам анализа выбирается

альтернатива, имеющая наибольший суммарный рейтинг соответствия выбранным критериям. Нечеткое множество степени соответствия альтернатив  $t_n$  критерию  $Q_i$  представлено выражением (2):

$$Q_i = \left\{ \mu_{Q_i}(t_1)/t_1, \mu_{Q_i}(t_2)/t_2, \dots, \mu_{Q_i}(t_n)/t_n \right\}. \quad (2)$$

Правило для выбора соответствующей ситуации альтернативы поддержки принятия решений представлено в выражении (3) в виде пересечения описанных выше нечетких множеств:

$$S = Q_1 \cap Q_2 \cap \dots \cap Q_k. \quad (3)$$

Операция пересечения нечетких множеств представлена как минимум функций принадлежности в выражении (4):

$$\mu_S(t_j) = \min \mu_{Q_i}(t_j), i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Выбранной будет считаться альтернатива  $t^*$  с наибольшим значением функции принадлежности, как это показано в выражении (5):

$$\mu_S(t^*) = \max \mu_S(t_j), j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

В предлагаемом исследовании определение значений функции принадлежности основано на получении интегральных оценок. В данном случае, в основе решения задачи структурирования информации лежит построение иерархии классов с последующей идентификацией системно значимых признаков происходящих событий и распределением последних по группам и подгруппам.

Опишем оптимизационную задачу [6, 7], в которой каждый из выбранных критериев получает квазиоптимальное значение. Авторы предлагают учитывать следующий набор критериев для решения данной задачи. Первый критерий контекстной привязки на каждой итерации отвечает за выбор элемента информации с наибольшим значением принадлежности к определенному классу чрезвычайных ситуаций [18–23]. Например, имеется  $P$  взаимосвязанных элементов, предварительно распределенных на  $S$  предметных областей, в результате необходимо упорядочить элементы в каждой предметной области для  $C$  различных траекторий поддержки принятия решений с достижением максимума значения критерия контекстной привязки. В этом случае описание критерия контекстной привязки  $Q_1$  примет вид выражения (6):

$$Q_1 = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^S \varepsilon_{ij} \delta_{ik} \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – значение коэффициента контекстной привязки элемента информации  $i$  в траектории поддержки принятия решений  $j$ , ( $j = 1, \dots, C$ ),  $\delta_{ik}$  – бинарный параметр, принимающий значение 1, если элемент  $i$  входит в предметную область  $k$ , и значение 0 – в противном случае.

Во втором критерии учитывается возможность наличия междисциплинарности элементов информации в исследуемых альтернативах траекторий поддержки принятия решений с учетом наличия множества связей между предметными областями, что позволяет идентифицировать системность в исследуемых информационных процессах. Второй критерий  $Q_2$  определяется на основе выражения (7):

$$Q_2 = \sum_{i=1}^P \sum_{y=1}^S \sum_{k=1}^S \gamma_{iy} \delta_{ik} \rightarrow \max, y \neq k, \quad (7)$$

где  $\gamma_{iy}$  – матрица коэффициентов междисциплинарных связей, задающих меру отношения элемента информации  $i$  к предметной области  $y$ . Данные коэффициенты задаются на основе экспертных оценок и принимают значения в диапазоне [0;1].

Третий критерий  $Q_3$  определяет динамику снижения уровня оперативности информации о протекании ЧС с учетом избыточности при получении сведений из множества различных источников, т.е. необходим для оценки ценности полученной информации и задан выражением (8):

$$Q_3 = \sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^P \varepsilon_{ij} \delta_{ik} \varphi_{ij} \rightarrow \max, \quad (8)$$

где  $\varphi_{ij}$  – коэффициент, предполагающий рассмотрение лишь наиболее значимых с учетом оперативности элементов информации, принимающий значение 1, если  $\varepsilon_{ij} \geq 0,8$ , и значение 0 – в противном случае.

На основе выражений (6)–(8) задан обобщенный критерий оптимизации, предполагающий построение альтернативных траекторий поддержки принятия решений по устранению последствий возникновения ЧС. Таким образом, обобщенный критерий примет вид выражения (9):

$$Q_{int} = \tau_1 Q_1 + \tau_2 Q_2 + \tau_3 Q_3 \rightarrow \max, \quad (9)$$

где  $\tau_i$  – вес каждого из предложенных критериев, определенный на основе экспертных оценок.

Предложенный нечеткий метод структурирования информации при ЧС, отличается от известных применением *нового обобщенного критерия оптимизации выбора альтернатив поддержки принятия решений*. Оригинальность оптимизационной постановки задачи структурирования заключается в оценке контекстной привязки элементов информации к определенному классу чрезвычайных ситуаций, междисциплинарности с учетом наличия множества связей между предметными областями, а также учета снижения уровня оперативности информации о протекании ЧС с течением времени. В основе разработки данного метода использованы нечеткие модели структурирования знаний, предложенные авторами в работе [6]. Описанная в данном источнике интегрированная нечеткая модель структурирования знаний является универсальной и отличается от аналогичных введением оригинальной иерархии классов для семантической фильтрации элементов информации. Модель позволяет реализовать настройку весовых коэффициентов при моделировании альтернативных траекторий поддержки принятия решений.

**4. Результаты вычислительного эксперимента.** Предложенный нечеткий метод структурирования информации при ЧС протестирован на обработке семантической сети, используемой в качестве информационной модели. Семантическая сеть построена в специально созданном программном приложении на основе декомпозиции информации о различных вариантах возникновения предпосылок чрезвычайных ситуаций, а также действий по ликвидации их возможных последствий.

Исследователь задает произвольное количество уровней декомпозиции, оптимальным для подобных информационных моделей считается количество структурных единиц в одном уровне равное шести. Такая организация сети позволяет выделить уровни детализации анализируемой информации. Каждый узел сети имеет привязку к определенному элементу информации (рис. 6).

Первому уровню принадлежит только один понятийный узел сети. Он является корнем сети и обобщает все ее содержимое, являясь мета-информацией. Каждый новый уровень раскрывает содержание понятий предыдущего уровня, тем самым раскрывая для исследователя всю предметную область и обнаруживая наличие междисциплинарных связей с другими узлами сети.

Сеть включает в себя множество предметных областей  $F = \{F_1, F_2, F_3 \dots F_z\}$ , где  $z = \overline{1, m}$ ,  $m$  – integer constant (количество предметных областей), причем,  $F_z = \{O_{z1}, O_{z2}, O_{z3}, \dots, O_{zk_z}\}$ , где  $k_z$  – integer constant (количество элементов (объектов) знаний в  $F_z$ ), причем, в случае задания отношений между объектами одной предметной области получим, что  $\forall i, j \rightarrow i = \overline{1, k_z}; j = \overline{1, k_z}; i \neq j \exists C_z[i][j] = n$ ,

где  $n$  – количество связей между  $O_{zi}$  и  $O_{zj}$ ,  $z$  – integer constant (номер исследуемой предметной области). В случае задания всех, в т.ч. междисциплинарных, отношений между объектами предметных областей получим, что  $\forall a, b \rightarrow a = \overline{1, \sum_{z=1}^m k_z}$ ;  $b = \overline{1, \sum_{z=1}^m k_z}$ ;  $a \neq b \exists C_{interdisc}[a][b] = p$ , где  $p$  – количество всех, в т.ч. междисциплинарных, связей между объектами сети.

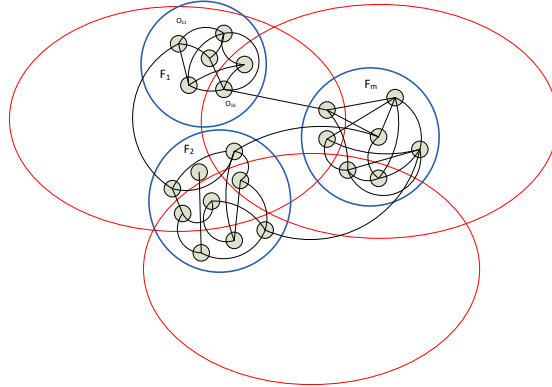


Рис. 6. Абстрактная модель семантической сети с несколькими уровнями декомпозиции

В результате проведенных исследований получена временная сложность предложенного модифицированного алгоритма (рис. 7).



Рис. 7. Зависимость времени работы метода от числа вершин семантической сети

Временная сложность алгоритма в представленном примере составила  $O(n^2)$ , где  $n$  – количество анализируемых алгоритмом входных данных. По мнению авторов в большинстве реальных случаев не понадобится сеть такой большой размерности. Более вероятным диапазоном используемого количества вершин в семантической сети будет  $n \in [5000: 50000]$ , в этом случае ВСА предложенного нечеткого метода структурирования информации при поддержке принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций составит  $O(n)$ .

**Заключение.** В данной статье представлена разработка нечеткого метода структурирования информации. Основной целью работы являлось повышение эффективности средств поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на основе методов нечеткой логики.

Основными результатами проведенного исследования являются следующие:

1. Даны определения основным терминам исследуемой предметной области. Представлена формализованная постановка решаемой задачи;
2. Приведена развернутая классификация чрезвычайных ситуаций с описанием особенностей представленных классов;
3. Разработан нечеткий метод структурирования информации, состоящий из последовательности операций семантической фильтрации. Основным преимуществом данного нечеткого метода является его универсальность. Предложенный нечеткий метод структурирования информации при ЧС, отличается от известных применением нового обобщенного критерия оптимизации выбора альтернатив поддержки принятия решений и позволяет проводить оценку контекстной привязки элементов информации к определенному классу чрезвычайных ситуаций, междисциплинарности с учетом наличия множества связей между предметными областями, а также учета снижения уровня оперативности информации о протекании ЧС с течением времени.

Для оценки эффективности предложенного нечеткого метода разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент. Полученные результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают эффективность предложенного нечеткого метода структурирования информации при поддержке принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Временная сложность представленного алгоритма является полиномиальной. При выполнении исследования решены все поставленные задачи, цель данной работы достигнута.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2014 году. – М.: МЧС России, 2015. – 318 с.
2. Современные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / под общ. ред. В.А. Пучкова. – М.: ФКУ ЦСИ ГЗ МЧС России, 2013. – 352 с.
3. *Болов В.Р.* Применение современных технологий, методов мониторинга и прогнозирования в обеспечении системы управления в кризисных ситуациях // Журнал-каталог «Средства спасения. Противопожарная защита. Российские инновационные системы». – 2010. – № 10.
4. *Исаев, В.С., Макиев, Ю.Д., Малышев, В.П., Таранов, А.А., Камзолкин, В.Л.* Методика оценки эффективности мероприятий по повышению устойчивости функционирования критически важных объектов и объектов жизнеобеспечения в условиях угроз террористического характера // Информационный сборник. – М.: ЦСИ ГЗ МЧС России, 2010. – № 42. – С. 52-68.
5. *Горбунов, С.В., Макиев, Ю.Д., Малышев, В.П.* Анализ технологий прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Стратегия гражданской безопасности, проблемы и решения: Науч.-аналит. сб. – М.: 2011. – Т. 1. – № 1 (1) . – С. 43-53.
6. *Кравченко Ю.А.* Модель структуризации знаний на основе оценки наличия существенных признаков // Тр. Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'15». Научное издание в 3-х т. Т. 1. – 2015. – С. 293-298.
7. *Варшавский П.Р., А.П. Еремеев, Куриленко И.Е.* Моделирование временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов // Information technologies and knowledge. – 2012. – Vol. 6, No. 3. – P. 227-239.
8. *Бова, В.В., Курейчик В.В., Лецанов Д.В.* Модель семантического поиска в системах управления знаниями на основе генетических процедур // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 12. – С. 876-883.
9. *Chen C., Koufaris M.* The Impact of Decision Support System Features on User Overconfidence and Risky Behavior // Nature Publishing Group. – 2014. – No. 4. – P. 1-17.
10. *Ларичев О.И.* Вербальный анализ решений. – М.: Наука, 2006. – 181 с.
11. *Капунов Т.Г., Курейчик В.М.* Адаптивный генетический алгоритм на основе нечетких правил // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5 (199). – С. 26-34.

12. Arenas M., Botoeva E., Calvanese D., Ryzhikov V. Exchanging OWL 2 QL Knowledge Bases // 23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 2013. – P. 703-710.
13. Федоров Д.Ю. Применение структуризации знаний для обеспечения информационной безопасности личности // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2013. – № 2. – С. 40-43.
14. Кравченко Ю.А. Технологии управления знаниями как основа поддержки принятия решений // Тр. Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'14». Научное издание в 4-х т. Т. 1. – 2014. – С. 151-157.
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.
22. Грегер С.Э., Поршнев С.В. Метод объектно-ориентированного представления многоуровневых семантических моделей // Cloud of Science. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 548-561.
23. Шевченко Е.Л. Метрика близости семантических аннотаций для задачи сравнения профилей процессов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, № 2 (63). – С. 48-52.

## REFERENCES

1. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera v 2014 godu [State report on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2014]. Moscow: MChS Rossii, 2015, 318 p.
2. Sovremennyye sistemy monitoringa i prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy [Modern systems of monitoring and forecasting of emergency situations], under the general ed. of V.A. Puchkova. Moscow: FKU TsSI GZ MChS Rossii, 2013, 352 p.
3. Bolov V.R. Primenenie sovremennykh tekhnologiy, metodov monitoringa i prognozirovaniya v obespechenii sistemy upravleniya v krizisnykh situatsiyakh [Application of modern technologies, methods of monitoring and forecasting in providing a management system in crisis situations], *Zhurnal-katalog «Sredstva spaseniya. Protivopozharnaya zashchita. Rossiyskie innovatsionnye sistemy»* [Journal-catalog "Means of rescue. Fire protection. Russian Innovation Systems"], 2010, No. 10.
4. Isaev, V.S., Makiev, Yu.D., Malyshev, V.P., Taranov, A.A., Kamzolkin, V.L. Metodika otsenki effektivnosti meropriyatiy po povysheniyu ustoychivosti funktsionirovaniya kriticheski vazhnykh ob"ektov i ob"ektov zhizneobespecheniya v usloviyakh ugroz terroristicheskogo kharaktera [Methodology for assessing the effectiveness of measures to improve the stability of the functioning of critical facilities and life support facilities in the face of terrorist threats], *Informatsionnyy sbornik* [Information collection]. Moscow: TsSI GZ MChS Rossii, 2010, No. 42, pp. 52-68.
5. Gorbunov, S.V., Makiev, Yu.D., Malyshev, V.P. Analiz tekhnologiy prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera [Analysis of technologies for forecasting natural and man-made emergencies], *Strategiya grazhdanskoy bezopasnosti, problemy i resheniya: Nauch.-analit. sb.* [Strategy of civil security, problems and solutions: Scientific and analytical collection]. Moscow: 2011, Vol. 1, No. 1 (1), pp. 43-53.

6. Kravchenko Yu.A. Model' strukturizatsii znaniy na osnove otsenki nalichiya sushchestvennykh priznakov [A model of knowledge structuring based on the assessment of the presence of essential features], *Tr. Kongressa po intellektual'nykh sistemam i informatsionnykh tekhnologiyam «IS&IT'15»* [Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies "IS&IT'15"]. Scientific publication in 3 vol. Vol. 1, 2015, pp. 293-298.
7. Varshavskiy P.R., A.P. Ereemeev, Kurilenko I.E. Modelirovanie vremennykh zavisimostey v intellektual'nykh sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy na osnove pretsedentov [Modeling of time dependencies in intelligent decision support systems based on precedents], *Information technologies and knowledge* [Information technologies and knowledge], 2012, Vol. 6, No. 3, pp. 227-239.
8. Bova, V.V., Kureychik V.V., Leshchanov D.V. Model' semanticheskogo poiska v sistemakh upravleniya znaniyami na osnove geneticheskikh protsedur [Semantic search model in knowledge management systems based on genetic procedures], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2017, Vol. 23, No. 12, pp. 876-883.
9. Chen C., Koufaris M. The Impact of Decision Support System Features on User Overconfidence and Risky Behavior, *Nature Publishing Group*, 2014, No. 4, pp. 1-17.
10. Larichev O.I. Verbal'nyy analiz resheniy [Verbal analysis of decisions]. Moscow: Nauka, 2006, 181 p.
11. Kaplunov T.G., Kureychik V.M. Adaptivnyy geneticheskiy algoritm na osnove nechetkikh pravil [Adaptive genetic algorithm based on fuzzy rules], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 5 (199), pp. 26-34.
12. Arenas M., Botoeva E., Calvanese D., Ryzhikov V. Exchanging OWL 2 QL Knowledge Bases, *23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2013, pp. 703-710.
13. Fedorov D.Yu. Primenenie strukturizatsii znaniy dlya obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti lichnosti [Application of knowledge structuring to ensure the information security of the individual], *Natsional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie* [National security and strategic planning], 2013, No. 2, pp. 40-43.
14. Kravchenko Yu.A. Tekhnologii upravleniya znaniyami kak osnova podderzhki prinyatiya resheniy [Технологии управления знаниями как основа поддержки принятия решений], *Tr. Kongressa po intellektual'nykh sistemam i informatsionnykh tekhnologiyam «IS&IT'14»* [Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies "IS&IT'14"]. Scientific publication in 4 vol. Vol. 1, 2014, pp. 151-157.
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 the quantitative scale of semantic information evaluation], *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management], 2020, No. 2 (8), pp. 24-32.
22. Greger S.E., Porshnev S.V. Metod ob"ektno-orientirovannogo predstavleniya mnogourovnevnykh semanticheskikh modeley [The method of object-oriented representation of multilevel semantic models], *Cloud of Science*, 2016, Vol. 3, No. 4, pp. 548-561.
23. Shevchenko E.L. Metrika blizosti semanticheskikh annotatsiy dlya zadachi sravneniya profily protsessov [The proximity metric of semantic annotations for the task of comparing process profiles], *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies], 2013, Vol. 3, No. 2 (63), pp. 48-52.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.



**Герасименко Евгения Михайловна** – Южный федеральный университет; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Кравченко Даниил Юрьевич** – e-mail: dkravchenko@sfedu.ru; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; студент.

**Кравченко Юрий Алексеевич** – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования, д.т.н.; доцент.

**Кулиев Эльмар Валерьевич** – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Gerasimenko Evgeniya Mihailovna** – Southern Federal University; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

**Kravchenko Daniil Yurievich** – e-mail: kravchenkodaniil122@gmail.com; phone: +78634371651; the department of computer aided design; student.

**Kravchenko Yury Alekseevich** – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; phone: +78634371651; the department of computer aided design; dr. of eng. sc.; associate professor.

**Kuliev Elmar Valerievich** – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; phone: +78634371651; the department of computer aided design, associate professor.

УДК 004.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-212-226

**Ф.С. Булыга, В.М. Курейчик****СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЕКТОРИЗАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ**

*Представленная публикация посвящена обзору проблемы представления текстовой информации для последующего осуществления кластерного анализа в рамках обработки и управления информацией большой размерности. Современные требования предъявляемые к аналитическим, поисковым и рекомендательным информационным системам демонстрируют слабую сформированность целостного решения, способного обеспечить достаточный уровень быстродействия и качества получаемых результатов в рамках функционирования текущего рынка информационных технологий. Поиск решения представленной проблемы влечет за собой необходимость в проведении объективного анализа существующих решений представления текстовой информации в векторном пространстве, с целью формирования целостного представления о достоинствах и недостатках анализируемых подходов, а также формированием критериев, позволяющих реализовать собственный подход, лишенный выявленных слабостей. Представленная работа является аналитической, и позволяет получить представление о современном состоянии и проработанности выявленной проблемы в рамках ограниченной предметной области. Кластеризация текстовых данных – автоматическое формирование подмножеств, элементами которых выступают экземпляры документов некоторой исследуемой, неструктурированной выборки фиксированной размерности. Данный процесс можно классифицировать как обучения без учителя, предполагающее, отсутствие эксперта, собственноручно присваивающего исходной выборке документов индексы классов. Однако, осуществление кластерного анализа текстовых данных без какой-либо предварительной обработки – невозможно. Для этого необходимо обеспечить стандартизацию и приведение входных данных к единому формату и виду. В рамках данного этапа осуществления кластерного анализа, в представленной публикации рассматриваются методы предварительной обработки текстовых данных. Новизна представленной публикации заключается в формировании теоретического базиса основных методов векторизации текстовых данных, путем систематизации и объективи-*

зации выдвинутых предположений, путем проведения серии экспериментальных исследований. Основным отличием данной работы от уже опубликованных научных трудов является систематизация и анализ современных решений, а также выдвижение гипотезы об актуальности и эффективности собственного гибридного подхода предназначенного для векторизации текстовых данных.

*Большие данные, кластеризация, кластерный анализ; интеллектуальный анализ данных; векторизация; кластеризация текстовых данных; k-means, Word2Vec; TF-IDF; Bag-of-Words.*

**F.S. Bulyga, V.M. Kureichik**

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF VECTORIZATION OF HIGH DIMENSIONAL TEXT DATA**

*The presented publication is devoted to an overview of the problem of presenting textual information for the subsequent implementation of cluster analysis in the framework of processing and managing high-dimensional information. Modern requirements for analytical, search and recommendation information systems demonstrate the weak formation of a holistic solution that can provide a sufficient level of speed and quality of the results obtained within the framework of the current information technology market. The search for a solution to the presented problem entails the need to conduct an objective analysis of existing solutions for representing textual information in vector space, in order to form a holistic view of the advantages and disadvantages of the analyzed approaches, as well as the formation of criteria that allow one to implement their own approach, devoid of identified weaknesses. The presented work is analytical, and allows you to get an idea of the current state and elaboration of the identified problem within a limited subject area. Clustering of text data is the automatic formation of subsets, the elements of which are instances of documents of some researched, unstructured sample of a fixed dimension. This process can be classified as unsupervised learning, which implies the absence of an expert who personally assigns class indices to the original sample of documents. However, the implementation of cluster analysis of text data without any pre-processing is impossible. To do this, it is necessary to ensure standardization and reduction of input data to a single format and form. Within the framework of this stage of the implementation of cluster analysis, the presented publication discusses methods for preprocessing text data. The novelty of the presented publication lies in the formation of the theoretical basis of the main methods of text data vectorization, by systematizing and objectifying the proposed assumptions, by conducting a series of experimental studies. The main difference of this work from the already published scientific works is the systematization and analysis of modern solutions, as well as the hypotheses about the relevance and effectiveness of our own hybridized approach designed for text data vectorization.*

*Big data; clustering; cluster analysis; data mining; vectorization; text data clustering; k-means; Word2Vec; TF-IDF; Bag-of-Words;*

**Введение.** Большие данные – массивы информации большой размерности, обладающие преимущественно разветвленной и сложной структурой [1]. Подобные массивы данных встречаются в различных областях научной и коммерческой деятельности человека, связанных с необходимостью обработки и анализа входной информации. К таким областям можно отнести: анализ и обработка данных социальных сетей, экономика и менеджмент, медицина и биология, аналитика и статистика и т.п [2]. Применение вышеупомянутых массивов данных в информационных, аналитических, поисковых и т.п. системах, способствует возникновению проблемы, связанной с обработкой и анализом входящей информации, однако, за счет сложности формируемой структуры, достижение подобной цели – является нетривиальной и объемной задачей.

Для решения выше сформулированной проблемы предпринимались попытки создания альтернативных методов обработки, анализа и хранения информации в противовес уже классическим методам Business Intelligence и различным СУБД. Так, к современным подходам можно отнести внедрение и применение: NoSQL

[3], библиотечные решения проекта Hadoop [4], алгоритмы семейства MapReduce [5], различные алгоритмы машинного обучения [6, 7] и т.п. Представленный список алгоритмов не является конечным и может расширяться в зависимости от условий конкретно сформулированной задачи. Однако, невзирая на столь обширный каскад методов обработки, основной проблемой данных подходов является невозможности работы с текстовыми данными в явном виде. Кластеризация текстовых данных – автоматическое формирование подмножеств, элементами которых выступают экземпляры документов некоторой исследуемой, неструктурированной выборки фиксированной размерности. Данный процесс является одним из наиболее актуальных и значимых задач в области машинного обучения и интеллектуального анализа данных в частности. Актуальность сформулированной проблемы обусловлена неконтролируемым и постоянно возрастающим объемом генерируемой информации, представляемой преимущественно в текстовом формате. Основным источником подобного рода информации, на данный момент выступает глобальная сеть Интернет, позволяющая распространять данные в любом виде, без задания какой-либо стандартизированной структуры. Следствием вышеуказанного факта является большое количество разрозненной информации, скрывающей в себе полезные данные, обладающие ценностью для того или иного пользователя.

Для современных поисковых и рекомендательных систем основной проблемой выступает сложность извлечения полезных данных из общего входного потока информации, поступающего из открытых источников. В попытке решения данной проблемы представлено большое количество методов и алгоритмов структуризации и классификации данных, вне зависимости от их содержания или формата, однако, до сих пор, какого-либо универсального и эффективного решения найдено не было. Применительно к сформулированной задаче, на сегодняшний день можно выделить два основных класса алгоритмов, позволяющих представить текстовую информацию, в виде, пригодном для осуществления процесса кластеризации:

1. Алгоритмы основанные на представлении исходной текстовой информации в векторном формате многомерного пространства признаков, применяющие при этом некоторую заранее определенную метрику вычисления коэффициентов схожести элементов исследуемого множества.

2. Алгоритмы использующие в качестве признаков – коэффициенты частоты встречаемости терминов в текстах или массивах словосочетаний, с последующим определением и формированием кластеров на основе алгоритмов частичного обучения.

Основная задача представленной публикации заключается в систематизации и обобщении информации, касающейся методов представления текстовых данных, поскольку объективизированный выбор алгоритмов, позволяет повлиять на итоговую эффективность и точность результатов проводимой кластеризации.

В рамках данной работы представлены основные теоретические сведения о наиболее популярных и часто применяемых алгоритмах представления текстовых данных, с последующим сравнением коэффициентов влияния данных алгоритмов на итоговый результат кластерного анализа заданной выборки данных. В качестве основного метода кластеризации используется алгоритм дивизимной кластеризации *k-means*, поскольку представленный метод обладает хорошими показателями точности и эффективности для большинства задач подобного характера. Экспериментальные исследования в данной работе проводятся на выборке текстовых документов полученных из открытой научной библиотеки Elibrary, представленной 2 тыс. экземпляров научной направленности в гуманитарной и технической области.

**Формальная постановка задачи кластеризации документов, содержащих текстовую информацию.** Первоначально при постановке задачи кластеризации каскада документов содержащих текстовую информацию необходимо разделить данный процесс на два характерных этапа:

- ◆ Определение и формирование первичного множества кластеров ограниченного множества экземпляров исходной выборки;
- ◆ Итоговое группирование всех подмножеств и элементов в соответствии с полученными кластерами;

Однако, стоит отметить, что, для осуществления вышеперечисленных этапов кластеризации наиболее важным параметром выступает не только размерность исходной выборки документов, но также объективизированный выбор метрики схожести элементов необходимой для выполнения кластерного анализа.

*Постановка задачи определения и формирования центроидов кластеров.* Пусть задано некоторое конечное множество объектов  $W = \{w_1, \dots, w_m\}$ , где  $w_m$  – документ, содержащий текстовые данные. При этом каждый элемент множества  $W$  формализуется  $n$ -мерным признаковым вектором вида  $(t_{g1}, \dots, t_{gn})$ , где  $g = 1, \dots, m$ , или выступает точкой, принадлежащей  $n$ -мерному пространству признаков. Следующим этапом, необходимо задать метрику расстояния удовлетворяющую условию:  $dist(x^i, \omega)$ , где  $x^i$  – точка признакового пространства, характеризующая центроид  $i$ -го кластера;  $\omega$  – некоторая точка, принадлежащая исследуемому множеству объектов. При этом, заданному количеству кластеров  $I_k$  требуется сопоставить  $I_c$  центроидов, с соблюдением условия минимального значения метрики расстояния  $R$  (1):

$$R = \sum_{i=1}^l \sum_{x \in L_i} dist(x^i, \omega) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $L_i$  – множество экземпляров  $i$ -го класса.

Стоит отметить, что для решения данной задачи, предполагается, что пользователь самостоятельно определяет итоговое количество кластеров, основываясь на характерных чертах исследуемой предметной области, или отталкиваясь от предварительного эмпирического или теоретического опыта. В случае когда количество итоговых кластеров определить заранее невозможно, определение данного значения осуществляется экспериментальным путем. В данном исследовании параметр количества кластеров определяется на основе последовательного, попарного объединения схожих экземпляров объектов с последующим усреднением характерных параметров данных объектов, применение данного подхода обосновано автоматизацией процесса подбора количества кластеров, тем самым обеспечивая одинаковые условия работы тестируемых алгоритмов.

*Алгоритм группирования экземпляров исследуемого множества.* В общем случае алгоритм группирования экземпляров некоторого множества можно сопоставить с задачей распределения [8], формулируемой следующим образом: пусть задано некоторое конечное множество объектов  $X = \{x_i\}$ , при условии, что данное множество  $X$  возможно разделить на конечное количество подмножеств  $\theta_t, t = 1, \dots, r, \cup_{t=1}^r \theta_t = X$ . При этом, объекты принадлежащие данному множеству определяются значениями признаков:  $x_j, j = 1, \dots, m$ , где общность параметров признаков  $x_j$  характеризует представление объекта  $I(w) = \{x_1, \dots, x_n\}$ . В то же время информация о принадлежности объекта  $w$  какому-либо классу, определяется в форме вектора  $\{I_1(w), \dots, I_p(w)\}$ , где  $I_p(w)$  содержит в себе данные о принадлежности экземпляра  $w$  к некоторому подмножеству  $\theta_p$  (2):

$$I_p(w) = \begin{cases} 1, & \text{если } w \in \theta_p \\ 0, & \text{если } w \notin \theta_p \\ \Delta, & \text{если неопределенность} \end{cases} \quad (2)$$

Принадлежность того или иного объекта  $w$  к некоторому классу  $\theta_p$  определяется основываясь на сравнении значений метрики расстояния между экземплярами множеств и самими множествами.

*Выбор метрики расстояния.* Первоначально, необходимо сформулировать полное и всеобъемлющее определение термина «метрики расстояния». Метрика расстояния – величина  $R(X_i, X_j)$ , удовлетворяющая следующим положениям:

- ◆  $R(X_i, X_j) \geq 0$  для всякого  $X_i$  и  $X_j$  из  $E_z$  (расстояние не должно быть отрицательным);
- ◆  $R(X_i, X_j) = R(X_j, X_i)$  (симметричность расстояния, вне зависимости от порядка точек измерения);
- ◆  $R(X_i, X_j) \leq R(X_i, X_k) + R(X_k, X_j)$ , где  $X_k, X_i, X_j$  – векторы принадлежащие  $E_z$  (удовлетворение правилу неравенства треугольника);
- ◆  $R(X_i, X_j) = 0$  тогда и только тогда, когда  $X_i = X_j$  (удовлетворение правилу различимости тождественных объектов);

Параметр  $R(X_i, X_j)$  для исследуемых  $X_i$  и  $X_j$  именуется как величина расстояния между  $X_i$  и  $X_j$  и эквивалентна расстоянию между  $U_i$  и  $U_j$  соответственно выбранным атрибутам  $G=(G_1, \dots, G_z)^T$  [9].

В классической и современной литературе посвященной исследованиям в области интеллектуального анализа данных, в частности алгоритмам и методам кластерного анализа, определено более пятидесяти различных метрик, предназначенных для вычисления параметра метрики расстояния. Наиболее классическим и популярным методом вычисления расстояния является «евклидово расстояние» или «евклидова метрика», вычисляемая в соответствии с формулой [10] (3):

$$d(X_i, X_j) = (\sum_{k=1}^z (x_{ki} - x_{kj})^2)^{1/2}. \quad (3)$$

При этом метрика расстояния «Евклида» достаточно схожа с метрикой расстояния «Минковского» [11], с отличием в степени. В общем случае в метрике «Минковского» степень уравнения определяется при помощи параметра  $p$ . Обобщенно, данную метрику можно представить в виде (4):

$$d(X_i, X_j) = (\sum_{k=1}^z (x_{ki} - x_{kj})^2)^{1/p}. \quad (4)$$

Однако, несмотря на вышеописанные подходы вычисления расстояния, также существуют и другие, часто встречаемые и применяемые в исследованиях метрики: «Расстояние городских кварталов» [12], «Махаланобиса» [13] и т.п.

Также, следует отметить, важность объективного выбора метрики расчета расстояния между элементами исследуемого множества, поскольку корректность выбранного подхода влияет на конечные результаты скорости работы предлагаемого решения, а также на точность получаемых значений. Исходя из представленного краткого обзора метрик вычисления расстояния между объекта, в качестве основного метода расчета в проводимых исследованиях выбрано «Евклидово расстояния».

**Векторизация.** Для осуществления кластерного анализа применительно к текстовой информации, существующие алгоритмы машинного обучения оперируют в пространстве числовых атрибутов, т.е. для их функционирования, необходимо на вход предоставить двумерный массив данных, представляющий из себя матрицу, столбцами которой являются признаки данных, при этом строки матрицы, содержат в себе конкретные экземпляры данных. Векторизация – процесс представления исходной текстовой информации в векторном пространстве признаков для осуществления дальнейшей кластеризации [14]. Выполнение данного процесса – первый и наиболее важный этап анализа информации представленной в текстовом формате. Подобное преобразование документов, позволяет анализировать, обрабатывать и создавать экземпляры данных, с которыми впоследствии смогут

работать существующие подходы кластерного анализа. К преимуществам подхода векторизации, также можно отнести то, что изначально на вход поступают документы различной размерности, однако, формируемые в ходе преобразования векторы, всегда будут одинаковой длины, что позволяет стандартизировать входные данные и оптимизировать дальнейший процесс кластеризации.

В векторном пространстве каждое слово принадлежащее обрабатываемому тексту представляется в виде признаков, в последствии формирующих признаковое пространство, поступающее на вход алгоритму кластеризации. Таким образом, осуществляется переход от отдельных предложений и словосочетаний к точкам в многомерном семантическом пространстве, расположенным на расстоянии друг от друга, в соответствии со смысловой схожестью анализируемых предложений. Следовательно, при векторизации текстовых документов, с последующим вычислением величины меры схожести множества точек, возможно удостовериться или опровергнуть принадлежность того или иного текста к имеющимся кластерам.

*Частота векторизации (Bag-of-Words)*. Одним из способов векторизации входного текстового массива данных является вычисление частоты появления термина в каждом предложении с последующим определением зависимости данного значения к набору терминов исходного текста [15]. Первоначально, необходимо сформировать словарь терминов, принадлежащих исследуемому массиву данных, с присвоением каждому слову собственного индекса. Данное действие необходимо выполнить для последующей векторизации предложений, при этом итоговый вектор каждого предложения впоследствии равен длине сформированного словаря, включающего в себя количество повторений того или иного термина в конкретном предложении. Массив тестовых предложений для выполнения частотной векторизации представлен на рис. 1.

```
source_text_array = [
'Кластеризация - задача группировки множества объектов на подмножества (кластеры) таким образом, чтобы объекты из одного кластера были более похожи друг на друга, чем на объекты из других кластеров по какому-либо критерию',
'Кластерный анализ - многомерная статистическая процедура, выполняющая сбор данных, содержащих информацию о выборке объектов, и затем упорядочивания объекты в сравнительно однородные группы',
'Кластер - объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определенными свойствами',
'Кластер - это графическая форма организации информации, когда выделяются основные смысловые единицы, которые фиксируются в виде схемы обозначением всех связей между ними']
```

*Рис. 1. Массив тестовых предложений*

После формирования массива исследуемых предложений, для осуществления частотной векторизации, возможно использование готовой библиотеки `scikit-learn`, обладающей соответствующими методами, такими как «`countvectorizer`».

Результатом выполнения частотной векторизации выступает словарь уникальных терминов, принадлежащих исходному множеству предложений. В дальнейшем возможно осуществление преобразования полученного множества терминов в векторы исходных предложений, отображающие частоту вхождений того или иного элемента сформированного словаря в каждом конкретном предложении исходного массива.

Подобный подход является достаточно распространенным в области предварительной обработки текстовых массивов данных для осуществления последующей кластеризации. В технической литературе подобные методы называются «*Bag-of-Words*» (т.е. каждый текстовый документ исходного массива текстовых данных представляется в виде вектора).

Из недостатков данного подхода стоит отметить зависимость размерности формируемых векторов исходного множества от размерности текстов принадлежащих входному массиву данных. Таким образом, формируемые векторы будут обладать высокой размерностью и сильной разреженностью, как следствие увеличивая объемы памяти для их хранения, а также повышая вычислительные затраты. Для исправления подобного недостатка необходимо осуществить предварительную обработку текстовых данных, устранив «стоп-слова», а также осуществив процесс лемматизации и т.п. Выполнение подобных действий позволит сократить размерность исследуемого множества, как следствие сократив размерность итоговых векторов.

**Метрика TF-IDF.** Метрика TF-IDF – применяется для вычисления коэффициента весомости некоторого термина, принадлежащего исходному множеству терминов  $X$  [16]. Данная метрика определяется для каждого термина принадлежащего исследуемой выборке, при этом, чем выше показатель данной метрики для некоторого термина, тем весомей данное слово является в контексте исследуемого массива или множества.

Основная идея данного подхода заключается в нормализации и структуризации частоты слов некоторого текстового документа, с учетом множества терминов всего исследуемого множества текстовых файлов. Таким образом, если некоторый термин  $j$  часто встречается в некотором документе  $X_m$ , однако редко встречается в оставшихся текстовых документах, тогда, термин  $j$  обладает высоким коэффициентом значимости для текста  $X_m$  и является более приоритетным в сравнении с остальными терминами принадлежащими общему корпусу документов.

Метрика TF-IDF рассчитывается в соответствии со следующими положениями: первоначально осуществляется вычисление параметра TF – величина отношения количества вхождений исследуемого термина в рамках одного конкретного множества (документа). Данный параметр рассчитывается в соответствии с формулой (5):

$$TF = \frac{m_j}{\sum_n m_n}, \quad (5)$$

где  $n_i$  – количество вхождений исследуемого термина  $j$ ;  $\sum_n m_n$  – общее количество терминов в исследуемом документе.

Параметр IDF – величина отношения количества вхождений исследуемого термина в рамках всего корпуса терминов исходного множества документов. Данный параметр при этом рассчитывается по формуле (6):

$$IDF = \log \frac{I}{DF_j}, \quad (6)$$

где  $I$  – количество исследуемых документов в исходном множестве;  $DF$  – количество документов принадлежащих исходному множеству где встречается исследуемый термин  $j$ .

После вычисления двух вышеописанных параметров, осуществляется вычисление метрики TF-IDF в соответствии с формулой (7):

$$TF - IDF = TF * IDF. \quad (7)$$

В рамках демонстрации работы данного подхода на исходном множестве предложений представленных в предыдущем методе осуществим вычисление метрики TF-IDF. Результаты полученные метрикой TF-IDF приведены на рис. 2.

	упорядочивающая	задача	и	-	кластерный	кластеризация	объектов	чем
0	0.000000	0.044719	0.000000	0.0	0.000000	0.044719	0.044719	0.044719
1	0.013076	0.000000	0.013076	0.0	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.013076	0.000000	0.013076	0.0	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.013076	0.000000	0.013076	0.0	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000

	содержащих	группировки	образом	по	данных	множества	друга	из
0	0.000000	0.044719	0.044719	0.044719	0.000000	0.044719	0.044719	0.089438
1	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000

	Объектов,	одного	(кластеры)	друг
0	0.000000	0.044719	0.044719	0.044719
1	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.013076	0.000000	0.000000	0.000000

Рис. 2. Результаты полученные метрикой TF-IDF

К преимуществам данного подхода можно отнести игнорирование проблемы удаления стоп-слов, поскольку данные термины зачастую в большом количестве присутствуют во всех исследуемых массивах текстовых документах, тем самым присваиваемые значения метрики TF-IDF данным терминам будут достаточно низкими.

К недостаткам данного подхода можно отнести:

1. Отсутствие возможности отслеживания уровней вложенности документов.
2. Ненадежность первоначальной идеи данного подхода. Значение коэффициента встречаемости, особенно в русском языке достаточно низкое, за счет большого количества синонимов.
3. Получаемая оценка является статичной.

**Word2Vec.** Основной подход вышеизложенных методов заключается в представлении экземпляра исходного множества в векторной форме, тем самым формируя при этом единый вектор объектов, однако, зачастую оправданно осуществить векторизацию основанную не только на внутреннем сходстве элементов некоторого документа, принадлежащего исходному множеству файлов, но также учесть показатели внешнего сходства между экземплярами, в контексте самого векторного пространства.

Представленные ранее методы формируют векторы исключительно с положительными элементами, тем самым не позволяя осуществлять сравнение документов, не обладающих общими терминами [17]. Данное ограничение обосновано тем, что в случае если значение косинуса угла между парой векторов равно единице, это не позволит однозначно констатировать схожесть исследуемых документов.

В ситуации, когда схожесть документов обладает высоким приоритетом для проводимого исследования, возможно провести векторизацию текстовых данных при помощи подхода распределенного представления. В данном подходе вектор способен не только отобразить позиции терминов, но также сформировать каскад признаков, способных задать сходство тех или иных слов, при этом, размерность пространства признаков и как следствие длина вектора определяется качеством проводимого обучения алгоритма, и не зависима от размерности исследуемого документа.

В данном разделе публикации рассматривается алгоритм, за основу которого взят подход распределенного представления – Word2Vec. Word2Vec – нейронная сеть, основное назначение которой заключается в осуществлении обработки и анализа текстовой информации. Данная нейронная сеть разработана группой исследователей компании Google в 2013 году [18]. Невзирая на то, что ранее уже существовали схожие векторно-семантические методы, Word2Vec является первым наиболее популярным и часто применяемым алгоритмом представления текстовой информации в векторном пространстве. Данная нейронная сеть представляет из себя гибрид двух моделей обучения: K-Skip-n-Gram и Continuous Bag of Words.



Continuous Bag of Words (CBOW) – нейросетевая архитектура, предназначенная для определения основных принципов обучения и хранения представления терминов исследуемого множества. Данная модель выступает подходом Bag-of-Words, способного учитывать две пары ближайших соседей исследуемого термина (пара предшествующих и пара последующих терминов), пренебрегая при этом порядком следования.

К-Skip-n-Gram – нейросетевая архитектура, позволяющая формировать предсказания контекста, основываясь на исследуемом термине. В общем виде, данный подход можно описать следующим образом: пусть рассматриваемая модель представляет из себя последовательность размерности  $n$ , в которой всякий принадлежащий ей элемент располагается на расстоянии  $k$  от соседнего элемента.

В общем виде метод Word2Vec можно представить в виде гибридизированной нейронной сети, основанной на двух основных нейронных архитектурах. Визуализация данного подхода представлена на рис. 3.

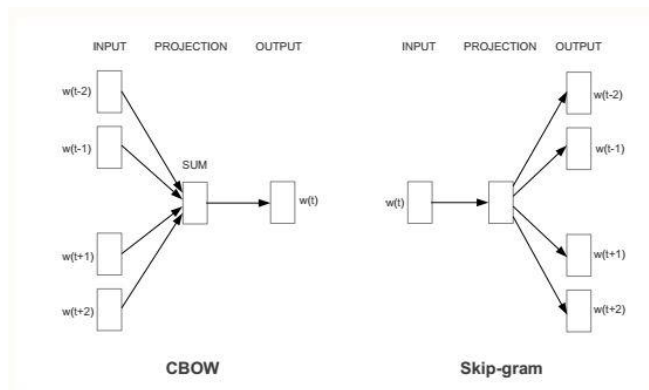


Рис. 3. Общая архитектура метода Word2Vec

Данная нейронная сеть в качестве входных данных принимает корпус текстовых документов размерности  $X$  в котором каждому термину  $t$ ,  $t \in X$  сопоставляется вектор  $v_t$ , при этом, алгоритм работы данного подхода, выглядит следующим образом: первоначально выполняется формирование словаря терминов, включающего в себя термины некоторого исследуемого документа, далее формируется векторное пространство слов, основанное на контекстной близости терминов, вычисляемых при помощи расчета частоты встречаемости терминов в тексте. Близость терминов в данном алгоритме определяется за счет косинусного сходства, и рассчитывается в соответствии с формулой (8):

$$\text{similarity}(A, B) = \cos(\vartheta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \cdot \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (8)$$

С целью ускорения обучения представленных моделей, в данной работе применяется модификация **softmax** – **hierarchical softmax** и **negative sampling**. Данные модификации позволяют обеспечить прирост вычисления значения распределения вероятностей.

Однако, для полноценного функционирования представленного метода, необходимо осуществить обучение нейронной сети. Процесс обучения алгоритма Word2Vec осуществляется следующим образом:

1. Выполняем предварительную обработку документа  $T$ , исключая из данных «шумовые» символы (знаки пунктуации и т.п.).

2. Формируем словарь терминов  $W$  основываясь на полученном тексте  $\tilde{T}$ ;
3. Для каждого слова  $w_i \in T$  формируем контекст, т.е. набор слов  $C_i \subset T$ , удалённых от  $w_i$  не более чем на  $s$  позиций в последовательности слов  $T$ .  $C_i = \{w_j \in T: (i - s) \leq j \leq (i + s), j \neq i\}$ .
4. Осуществляем унитарное кодирование (one-hot encoding) словаря  $W$ , т.е. каждому слову  $w_i \in W$  ставится в соответствие вектор  $u_i \in U$ , длина вектора  $u_i$  равна размеру словаря  $W$ , позиция единицы в векторе  $u_i$  соответствует номеру слова в словаре  $W$ .
5. Заменяем слова в тексте  $T$  и контекстах  $C$  соответствующими кодами  $P$  и  $Q$  принадлежащими  $U$ .

Таким образом, получаем два множества – кодированный текст  $P$  и наборы кодированных слов контекста  $Q$ .

Для эффективной генерации векторов слов необходимо применить модель Skip-gram, поскольку данная модель обладает улучшенными показателями к обучению в сравнении с моделью CBOW (без учета скорости вычисления). На вход модели skip-грамм подается одно слово  $w_i$ , а на выходе мы получаем слова  $w_i$  в контексте  $\{w_{o,1}, \dots, w_{o,c}\}$ , определяемом размером окна слов. После обучения каждому слову сопоставляется вектор, с последующим построением матрицы большой размерности, где каждая строка представляет каждый пример обучения, а столбцы выступают сгенерированными векторами слов. Как следствие, термин обладает несколькими степенями подобия.

**Алгоритм кластеризации.** В качестве основного алгоритма кластерного анализа применяемого в рамках проводимого исследования выбран алгоритм – K-Means. Данный алгоритм является одним из наиболее популярных и модифицируемых подходов для осуществления кластерного анализа. Основная идея данного подхода заключается в произвольном разбиении исходного множества элементов на группы (кластеры), с последующим итеративным перерасчетом центроидов для каждого кластера, сформированного на предыдущей итерации алгоритма.

Математическое описание алгоритма формулируется так: пусть дано некоторое множество элементов  $X$  разделяемое на  $k$  подмножеств  $X = \{G_1, \dots, G_k\}$ , где  $G_k$  – подмножество исходного множества  $X$  (кластер), таким образом, чтобы суммарное значение квадратов расстояний от экземпляра кластера к его центроиду являлось минимальным [19] (9):

$$\arg \min_G \sum_{i=1}^k \sum_{x \in G_i} \rho(x, \mu_i)^2, \quad (9)$$

где,  $\mu_i$  – центроиды кластеров,  $i \in \{1, \dots, k\}$ ;  $\rho(x, \mu_i)$  – метрика вычисления расстояния между  $x$  и  $\mu_i$ ;

Этапы выполнения данного алгоритма можно представить в виде следующей последовательности:

1. *Формирование кластеров*  
Случайным образом выбирается некоторое количество точек  $\mu_i, i \in \{1, \dots, k\}$ , равное итоговому количеству кластеров. Данные точки рассматриваются в качестве начальных центроидов будущих кластеров:  $\mu_i^{(0)} = \mu_i, i \in \{1, \dots, k\}$ ;
2. *Выполнение группирование векторов в соответствующие кластеры*  
 $\forall x_i \in X, i = 1, \dots, n: x_i \in G_j \Leftrightarrow j = \arg \min_k \rho(x_i, \mu_k^{(t-1)})^2$ .
3. *Пересчет центроидов кластеров*  
На данном этапе пересчет центроидов кластеров осуществляется в соответствии с формулой вычисления центров масс (10):

$$\mu_i = \frac{1}{|G|} \sum_{x \in G} x. \quad (10)$$

#### 4. Проверка условия остановки алгоритма

Если  $\exists i \in \overline{1, k}: \mu_i^{(t)} \neq \mu_i^{(t-1)}$  тогда  $t = t + 1$ , необходимо вернуться к шагу 2, в противном случае, остановить выполнение алгоритма;

Представленная выше информация касающаяся основных аспектов работы алгоритма k-means позволяет получить полное представление о базовых принципах и методах работы данного алгоритма, однако стоит также упомянуть некоторые свойства данного алгоритма. Рассматриваемый алгоритм является итерационным, т.е. численность итераций алгоритма не фиксирована и зависит исключительно от изначальной локализации экземпляров исследуемого множества в пространстве, величины  $k$  (заданного количества кластеров), а также от изначального значения метрики расстояния центроидов кластера  $\mu_1, \dots, \mu_k$ . Исходя из вышеперечисленного каскада параметров, можно констатировать высокую вариативность качества получаемых результатов по окончании работы данного алгоритма. В случае неудачного подбора стартовых параметров итерационный процесс способен сойтись к локальному оптимуму, в связи с этим данный алгоритм является слабо детерминированным.

Однако, несмотря на вышесказанное, к преимуществам данного алгоритма можно отнести: хорошее соотношение показателей эффективности, относительно к скорости выполнения; высокий уровень качества получаемых результатов кластеризации; способность работы алгоритма в параллельном режиме; перспективы и широкие возможности модификации и модернизации;

**Экспериментальные исследования.** Основная задача данного исследования заключается в определении наиболее оптимального и эффективного подхода для векторизации текстовых данных с последующим осуществлением кластерного анализа. В данном блоке представленной публикации рассматриваются результаты экспериментальных исследований, позволяющие оценить итоговые показатели скорости работы реализованных алгоритмов, а также конечные результаты кластеризации.

В качестве тестового набора данных из открытой научной библиотеки Elibrary получены публикации технической и гуманитарной направленности в количестве 2 тыс. экземпляров, в качестве основного метода кластеризации выступает алгоритм K-means. Для обучения Word2Vec применялся набор данных, полученный из открытых источников [20], данный каскад документов включает в себя новостные публикации различной тематики, в том числе публикации научной направленности.

Основными методами векторизации текстовых данных сравниваемыми в данном исследовании выступают методы, рассмотренные ранее в публикации: TF-IDF, Bag-of-Words и Word2Vec. Основными критериями оценки эффективного того или иного подхода выступают показатели скорости формирования векторного представления исследуемого множества документов, а также показатели эффективности кластеризации, выраженные в процентном соотношении.

Экспериментальные исследования проводимые в данной работе осуществлялись следующим образом: на вход методам векторизации текстовых данных передавались сформированные множества текстовых документов, предварительно проанализированные с помощью модуля предварительной обработки [19]. Далее, преобразованные множества передаются алгоритму k-means, с помощью которого формируются кластеры документов, основываясь на информации, содержащейся внутри документов.

Экспериментальные исследования проводились на наборах данных различной размерности, что позволяет обеспечить анализ эффективности работы того или иного подхода на массивах данных большой и малой размерности. Результаты скорости выполнения векторизации текстовых документов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Скорость векторизации входного множества документов**

Размер данных	Скорость векторизации (мс.)		
	TF-IDF	Word2Vec	Bag-of-Words
2000	$4 * 10^3$	$9 * 10^3$	$7 * 10^3$
1500	$12 * 10^2$	$8 * 10^2$	$10 * 10^2$
1000	$5 * 10^2$	$6 * 10^2$	$4 * 10^2$
500	$6 * 10^2$	$4 * 10^2$	$8 * 10^2$
250	$5 * 10^2$	$3 * 10^2$	$6 * 10^2$

Исходя из данных представленных в табл. 1 можно констатировать эффективность предложенного алгоритма Word2Vec при векторизации множества документов большой размерности, однако при этом, во множествах малой размерности, показатели скорости работы выше у подхода TF-IDF. Как говорилось ранее, еще одним, немаловажным показателем при проведении данной серии экспериментов является оценка точности проводимой кластеризации. Результаты оценки точности кластеризации представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Показатели эффективности кластеризации**

Размер данных	Эффективность кластеризации (%)		
	k-means (TF-IDF)	k-means (Word2Vec)	k-means (Bag-of-Words)
2000	60.127	64.452	64.125
1500	68.462	69.784	68.584
1000	71.985	75.987	76.123
500	72,654	74.254	71.965
250	75,771	77.320	75.786

Основываясь на данных представленных в табл. 2, можно констатировать влияние векторизации текстовых данных на конечный результат кластеризации. В среднем метод Word2Vec позволил повысить процент точности предсказания от 2 до 4 %.

**Заключение.** Проведенные исследования посвящены рассмотрению и анализу проблемы векторизации текстовых данных для последующего осуществления кластерного анализа. Итогом написания данной работы является определение основных положений и задач существующих методов векторизации текстовых данных. Серия экспериментальных исследований демонстрирует эффективность применения подхода Word2Vec для осуществления векторизации данных, поскольку показатели скорости и качество итоговой кластеризации, в сравнении с иными методами оказались выше.

Резюмируя все вышесказанное, можно выделить следующие основные положения: подходы и алгоритмы предварительной обработки текстовой информации оказывают непосредственное влияние на конечный результат кластеризации; подбор методов векторизации текстовых данных, необходимо осуществлять ответственно, в силу оказания влияния на конечный результат работы; гибридизация подхода Word2Vec демонстрирует прирост показателей по всем выделенным пунктам оценки качества, что подтверждает предположения об увеличении показателей эффективности.

Новизна представленной работы заключается в систематизации и обработки информации касающейся современных и популярных методов кластерного анализа, а также в представлении авторского подхода к модернизации, уже существующих решений.

**Благодарность:**

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Parkhomenko D.A.* Data vizualization makes sense of Big data // *Big Data and Advanced Analytics*. – 2021. – No. 7-1. – P. 416-417.
2. *Есауленко А.С., Никоненко Н.Д.* Большие данные. Реальность и перспективы // *Управление инновациями: теория, методология, практика*. – 2016. – № 17. – С. 74-79.
3. *Гродель Ю.В., Лагун Д.А.* Проблема Big Data и NoSQL подход к её решению // *Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: Сб. научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 5 ч.* – М., 2014. – С. 31-32.
4. *Абашин В.Г., Жолобова Г.Н., Горохова Р.И., Никитин П.В., Семенов А.М., Зараев Р.Э.* Подготовка студентов к работе с большими данными с применением кластера Hadoop // *Современные наукоемкие технологии*. – 2022. – № 6. – С. 78-82.
5. *Денисенко В.В., Евтеева К.С., Савченко И.И., Скрыпников А.В., Берестовой А.* Распределенные вычислительные модели Mapreduce и Mapreduce-алгоритма // *Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса: Матер. V Международной научно-практической конференции, в рамках реализации Ассоциации «Технологическая платформа «Технологии пищевой»*. – 2021. – С. 319-326.
6. *Мамедова Г.А., Зейналова Л.А., Меликова Р.Т.* Технологии больших данных в электронном образовании // *Открытое образование*. – 2017. – Т. 21, № 6. – С. 41-48.
7. *Трофимов И.Е.* Распределенные вычислительные системы для машинного обучения // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2017. – № 3. – С. 56-69.
8. *Журавлёв Ю.И.* Об алгебраическом подходе к решению задачи распознавания или классификации // *Проблемы кибернетики*. – 1978. – Т. 33. – С. 5-68.
9. *Рабинович Ю.И.* Кластерный анализ детализации телефонных переговоров // *Системы и средства информатики*. – 2007. – Т. 17, № 1. – С. 52-78.
10. *Лушиников Н.Д., Исмаилова А.С.* Евклидово расстояние как основа программного комплекса по многофакторной биометрической аутентификации // *Математическое моделирование процессов и систем: Матер. XI Международной молодежной научно-практической конференции*. – Стерлитамак, 2021. – С. 53-55.
11. *Рузибаев О.Б., Эшметов С.Д.* Исследование и анализ алгоритмов на основе нечеткого метода k ближайших соседей с применением различных метрик при диагностике рака молочной железы // *Наука и мир*. – 2016. – № 5-1 (33). – С. 102-107.
12. *Ле Минь Таун, Шукуров И.С., Нгуен Тхи Май.* Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки // *Строительство: наука и образование*. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 54-65.
13. *Шумская А.О.* Оценка эффективности метрик расстояния Евклида и расстояния Махаланобиса в задачах идентификации происхождения текста // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2013. – № 3 (29). – С. 141-145.
14. *Шерстнев П.А.* Исследование методов векторизации документов на основе векторизации слов // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сб. материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т.* – Красноярск, 2021. – С. 216-218.
15. *Tian L., Huang R., Wang Y.* Metric learning in codebook generation of bag-of-words for person re-identification // *ICPRAM 2019 - Proceedings of the 8th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*. – Prague. 2019. – P. 298-306.

16. Булыга Ф.С., Курейчик В.М. Алгоритмы агломеративной кластеризации применительно к задачам анализа лингвистической экспертной информации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6 (223). – С. 73-88.
17. Nartsev A.D. Text classification by means of word2vec model and a convolutional neural network // Presenting Academic Achievements to the World. Natural Science: Матер. X научной конференции молодых ученых. Саратов, 16 апреля 2019 года. – Saratov, 2020. – Vol. 9. – P. 71-77.
18. Левченко С.В. Разработка метода кластеризации слов по смысловым характеристикам с использованием алгоритмов Word2Vec // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – № 20. – С. 44-46.
19. Булыга Ф.С., Курейчик В.М. Кластеризация корпуса текстовых документов при помощи алгоритма k-means // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 3 (215). – С. 33-40.
20. Newsgroups // Qwone: [сайт]. – 2019. – URL: <http://qwone.com/~jason/20Newsgroups/> (дата обращения: 15.08.2022).

#### REFERENCES

1. Parkhomenko D.A. Data vizualization makes sense of Big data, *Big Data and Advanced Analytics*, 2021, No. 7-1, pp. 416-417.
2. Esaulenko A.S., Nikonenko N.D. Bol'shie dannye. Real'nost' i perspektivy [Big data. Reality and prospects], *Upravlenie innovatsiyami: teoriya, metodologiya, praktika* [Management of innovations: theory, methodology, practice], 2016, No. 17, pp. 74-79.
3. Grodel' Yu.V., Lagun D.A. Problema Big Data i NoSQL podkhod k ee resheniyu [The problem of Big Data and NoSQL approach to its solution], *Nauka, obrazovanie, obshchestvo: tendentsii i perspektivy. Sb. nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference]: in 5 part. Moscow, 2014, pp. 31-32.
4. Abashin V.G., Zholobova G.N., Gorokhova R.I., Nikitin P.V., Semenov A.M., Zaraev R.E. Podgotovka studentov k rabote s bol'shimi dannymi s primeneniem klastera Hadoop [Preparing students to work with big data using the Hadoop cluster], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2022, No. 6, pp. 78-82.
5. Denisenko V.V., Evteeva K.S., Savchenko I.I., Skrypnikov A.V., Berestovoy A. Raspredelemnnye vychislitel'nye modeli Mapreduce i Mapreduce-algoritma [Distributed computational models of Mapreduce and Mapreduce-algorithm], *Sistemnyy analiz i modelirovanie protsessov upravleniya kachestvom v innovatsionnom razvitiy agropromyshlennogo kompleksa: Mater. V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, v ramkakh realizatsii Assotsiatsii «Tekhnologicheskaya platforma «Tekhnologii pishchevoy»* [System analysis and modeling of quality management processes in the innovative development of agro-industrial complex: Materials of the V International Scientific and Practical Conference, within the framework of the Association "Technological Platform" Food Technologies"], 2021, pp. 319-326.
6. Mamedova G.A., Zeynalova L.A., Melikova R.T. Tekhnologii bol'shikh dannykh v elektronnom obrazovanii [Big data technologies in e-education], *Otkrytoe obrazovanie* [Open education], 2017, Vol. 21, No. 6, pp. 41-48.
7. Trofimov I.E. Raspredelemnnye vychislitel'nye sistemy dlya mashinnogo obucheniya [Distributed Computing Systems for Machine Learning], *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technologies and Computing Systems], 2017, No. 3, pp. 56-69.
8. Zhuravlev Yu.I. Ob algebraicheskom podkhode k resheniyu zadachi raspoznavaniya ili klassifikatsii [On the algebraic approach to solving the problem of recognition or classification], *Problemy kibernetiki* [Problems of Cybernetics], 1978, Vol. 33, pp. 5-68.
9. Rabinovich Yu.I. Klasternyy analiz detalizatsii telefonnykh peregovorov [Cluster analysis of the details of telephone conversations], *Sistemy i sredstva informatiki* [Systems and means of informatics], 2007, Vol. 17, No. 1, pp. 52-78.
10. Lushnikov N.D., Ismagilova A.S. Evklidovo rasstoyaniye kak osnova programmnoy kompleksa po mnogofaktornoy biometricheskoy autentifikatsii [Euclidean distance as the basis of a software package for multi-factor biometric authentication], *Matematicheskoe modelirovanie protsessov i sistem: Mater. XI Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Mathematical modeling of processes and systems: Proceedings of the XI International Youth Scientific and Practical Conference]. Sterlitamak, 2021, pp. 53-55.

11. Ruzibaev O.B., Eshmetov S.D. Issledovanie i analiz algoritmov na osnove nechetkogo metoda k blizhayshikh sosedey s primeneniem razlichnykh metrik pri diagnostike raka molochnoy zhelezy [Research and analysis of algorithms based on the fuzzy k nearest neighbors method using various metrics in the diagnosis of breast cancer], *Nauka i mir* [Nauka i mir], 2016, No. 5-1 (33), pp. 102-107.
12. Le Min' Taun, Shukurov I.S., Nguen Tkhi May. Issledovanie intensivnosti gorodskogo ostrova tepla na osnove gorodskoy planirovki [Study of the intensity of the urban heat island based on urban planning], *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: science and education], 2019, Vol. 9, No. 3, pp. 54-65.
13. Shumskaya A.O. Otsenka effektivnosti metrik rasstoyaniya Evklida i rasstoyaniya Makhalanobisa v zadachakh identifikatsii proiskhozhdeniya teksta [Estimation of Efficiency Metrics of Euclid Distance and Mahalanobis Distance in Problems of Identification of Text Origin], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2013, No. 3 (29), pp. 141-145.
14. Sherstnev P.A. Issledovanie metodov vektorizatsii dokumentov na osnove vektorizatsii slov [Investigation of document vectorization methods based on word vectorization], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики: Sb. materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchenoy Dnyu kosmonavтики* [Actual problems of aviation and astronautics: Collection of materials of the VII International scientific and practical conference dedicated to Cosmonautics Day]: in 3 vol. Krasnoyarsk, 2021, pp. 216-218.
15. Tian L., Huang R., Wang Y. Metric learning in codebook generation of bag-of-words for person re-identification, *ICPRAM 2019 - Proceedings of the 8th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*. Prague. 2019, pp. 298-306.
16. Bulyga F.S., Kureychik V.M. Algoritmy aglomerativnoy klasterizatsii primenitel'no k zadacham analiza lingvisticheskoy ekspertnoy informatsii [Algorithms of agglomerative clustering in relation to the problems of analysis of linguistic expert information], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Technical science], 2021, No. 6 (223), pp. 73-88.
17. Nartsev A.D. Text classification by means of word2vec model and a convolutional neural network, *Presenting Academic Achievements to the World. Natural Science: Mater. X nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh. Saratov, 16 aprelya 2019 goda* [Presenting Academic Achievements to the World. Natural Science: Proceedings of the X scientific conference of young scientists, Saratov, April 16, 2019]. Saratov, 2020, Vol. 9, pp. 71-77.
18. Levchenko S.V. Razrabotka metoda klasterizatsii slov po smyslovym kharakteristikam s ispol'zovaniem algoritmov Word2Vec [Development of a method for clustering words by semantic characteristics using Word2Vec algorithms], *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems], 2017, No. 20, pp. 44-46.
19. Bulyga F.S., Kureychik V.M. Klasterizatsiya korpusa tekstovykh dokumentov pri pomoshchi algoritma k-means [Clusterization of text document corpus using the k-means algorithm], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science], 2022, No. 3 (215), pp. 33-40.
20. Newsgroups, *Qwone*. 2019. Available at: <http://qwone.com/~jason/20Newsgroups/> (accessed 15 August 2022).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Прокопенко.

**Бulyga Филип Сергеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: bulyga@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79001330866; кафедра САПР; аспирант.

**Куреичик Виктор Михайлович** – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; тел.: +79282132730; кафедра САПР; д.т.н.; профессор.

**Bulyga Philip Sergeevich** – Southern Federal University; e-mail: bulyga@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79001330866; the department of computer-aided design; graduate student.

**Kureichik Viktor Mikhailovich** – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; phone: +79282132730; the department of computer-aided design; dr. of eng. sc; professor.

**Р.М. Ауси, Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян**

### **ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ МЕТОДАМ ЗАЩИТЫ ОТ АТАК**

*В последние годы алгоритмы машинного обучения, а точнее алгоритмы глубокого обучения, широко используются во многих областях, включая кибербезопасность. Однако системы машинного обучения уязвимы для атак со стороны злоумышленников, и это ограничивает применение машинного обучения, особенно в нестационарных средах со враждебными действиями, таких как область кибербезопасности, где существуют настоящие злоумышленники (например, разработчики вредоносных программ). С быстрым развитием методов искусственного интеллекта (ИИ) и глубокого обучения (ГО) важно обеспечить безопасность и надежность реализованных алгоритмов. В последнее время уязвимость алгоритмов глубокого обучения к конфликтующим паттернам получила широкое признание. Изготовленные сфабрикованным образом образцы для анализа могут привести к различному нарушению поведения моделей глубокого обучения, в то время как люди будут считать их безопасными для использования. Успешная реализация атак противника в реальных физических ситуациях и сценариях реального физического мира еще раз доказывает их практическую ценность. В результате методы состязательной атаки и защиты привлекают все большее внимание со стороны сообществ безопасности и машинного обучения и стали горячей темой исследований в последние годы не только на территории России, но и других странах. Компании «Сбербанк», «Яндекс», «Группа Т1», «Медицинский центр Атлас» и многие другие ведут разработку конкурентоспособных решений, в том числе и на международном рынке. К сожалению, в списке 10 крупнейших ИТ-компаний направление Big Data, в частности и защита от атак представлено только компанией «Группа Т1», но потенциал роста рынка огромный. В данной работе представляются теоретические основы, алгоритмы и применение методов состязательных атак противника. Затем описывается ряд исследовательских работ по методам защиты, охватывающих широкий спектр исследований в этой области. В этой статье исследуются и обобщаются состязательные атаки и средства защиты, которые представляют собой самые современные исследования в этой области и отвечают последним требованиям, предъявляемым к информационной безопасности.*

*Состязательное машинное обучение; глубокая нейронная сеть; состязательная атака; информационная безопасность; кибербезопасность.*

**R.M. Aushi, E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan**

### **DEEP TRAINING IN METHODS OF PROTECTION AGAINST ATTACKS**

*In recent years, machine learning algorithms, or rather deep learning algorithms, have been widely used in many fields, including cybersecurity. However, machine learning systems are vulnerable to attacks by attackers, and this limits the use of machine learning, especially in non-stationary environments with hostile actions, such as the cybersecurity field, where real attackers exist (for example, malware developers). With the rapid development of artificial intelligence (AI) and deep learning (GO) methods, it is important to ensure the safety and reliability of the implemented algorithms. Recently, the vulnerability of deep learning algorithms to conflicting patterns has been widely recognized. Fabricated samples for analysis can lead to various violations of the behavior of deep learning models, while people will consider them safe to use. The successful implementation of enemy attacks in real physical situations and scenarios of the real physical world once again proves their practicality. As a result, methods of adversarial attack and defense are attracting increasing attention from the security and machine learning communities and have become a hot topic of research in recent years not only in Russia, but also in other countries. Sberbank, Yandex, T1 Group, Atlas Medical Center and many others are developing competitive solutions, including on the international market. Unfortunately, in the list of the 10 largest IT companies, the direction of Big Data, in particular, and protection against attacks is represented only by the T1 Group company, but the market growth potential is huge. In this paper, the theoretical foundations, algorithms and application of methods of adversarial attacks of the enemy are*



*presented. Then a number of research papers on protection methods are described, covering a wide range of research in this area. This article explores and summarizes adversarial attacks and defenses, which represent the most up-to-date research in this field and meet the latest requirements for information security.*

*Adversarial machine learning; deep neural network; adversarial attack; information security; cybersecurity.*

**Введение.** Многомиллиардное увеличение вычислительной мощности популяризировало использование глубокого обучения (ГО) для обработки многих задач машинного обучения (МО), таких как классификация изображений [1], обработка естественного языка и теория игр. Тем не менее, серьезная угроза безопасности современных алгоритмов ГО была обнаружена исследовательским сообществом: взломщики могут легко обмануть модели ГО, нарушив искажая доброкачественные образцы, не будучи обнаруженными человеком [2]. Возмущения, которые незаметны для человеческого зрения / слуха, достаточны, чтобы заставить модель делать ложные прогнозы с высокой степенью достоверности. Это явление, известное как состязательный паттерн (состязательная выборка), считается основным препятствием для массового развертывания моделей ГО в производстве. Для изучения этой открытой проблемы были предприняты значительные исследовательские усилия.

В соответствии с моделью угроз, существующие состязательные атаки можно классифицировать на атаки белого ящика, серого ящика и черного ящика. Разница между тремя моделями заключается в знании противников. В модели угроз атак «белого ящика» предполагается, что противники обладают полными знаниями о своей целевой модели, включая архитектуру и параметры модели. Следовательно, они могут напрямую создавать состязательные образцы на целевой модели любыми способами. В модели угроз «серого ящика» знания противников ограничены структурой целевой модели. В модели угроз черного ящика злоумышленники могут прибегать к доступу к запросам только для создания состязательных образцов. В рамках этих моделей угроз был предложен ряд алгоритмов атаки для генерации состязательной выборки, таких как алгоритм Бройдена-Флетчера Гольдфарба Шанно с ограниченной памятью (limited-memory Broyden–Fletcher Goldfarb Shanno – L-BFGS), метод быстрого градиентного знака (fast gradient sign method – FGSM), базовый итерационный метод (basic iterative method – BIM) / проектируемый градиентный спуск (projected gradient descent – PGD), распределенно-состязательная атака [3, 4], атаки Карлини и Вагнера (C&W) [5], атака карты значимости на основе Якобиана (Jacobian based saliency map attack – JSMA). Эти алгоритмы атак разработаны в модели угроз белого ящика. Тем не менее, они также эффективны во многих настройках серого и черного ящиков из-за переносимости состязательных образцов между моделями [1].

Между тем, недавно были предложены различные защитные методы для обнаружения/классификации состязательных атак, включая эвристические и сертифицированные средства защиты. Эмпирическая защита относится к защитному механизму, который успешно защищает от определенных атак без теоретической гарантии точности. В настоящее время наиболее эффективной защитной эвристикой является состязательное обучение, которое пытается повысить надежность модели ГО путем введения нежелательных образцов на этапе обучения.

Другие эвристические средства защиты в значительной степени полагаются на переходы ввода/функции и шумоподавление для смягчения неблагоприятных последствий в областях данных/функций. С другой стороны, сертифицированные системы защиты всегда могут засвидетельствовать свою минимальную точность против четко определенного типа атаки противника. В последнее время популяр-

ным подходом к сертификации сети является построение состязательного многогранника и определение его верхней границы с помощью выпуклых расширений. Ослабленная верхняя граница – это сертификация для обученных моделей ГО, которая гарантирует, что ни одна атака с определенными ограничениями не может превышать приблизительный стандартизированный уровень успеха атаки, аппроксимированный верхней границей. Тем не менее, фактические результаты этих сертифицированных защит были все еще намного хуже, чем обучение [3, 4].

В этой статье исследуются и обобщаются состязательные атаки и средства защиты, которые представляют собой самые современные исследования в этой области.

**Общие сведения.** В этом разделе описываются определения и обозначения, используемые в этой статье. В частности, набор данных определяется как  $\{X_i, Y_i\}_{i=1}^N$ , где  $X_i$  – образец данных с меткой  $y_i$ ,  $N$  – размер набора данных. Нейронная сеть обозначается как  $f(\cdot)$  с входом  $x$  и предсказанием  $f(x)$ . Соответствующие потери оптимизации (также называемые состязательными потерями) обозначаются  $J(\theta, x, y)$ , где  $\theta$  обозначает веса модели. Для задачи классификации перекрестная энтропия между  $f(x)$  и меткой  $y$  всегда применяется как потеря оптимизации, которая обозначается  $J(f(x); y)$ . Образец данных  $x'$  считается состязательным образцом  $x$ , когда  $x'$  близок к  $x$  при определенной метрике расстояния, в то время как  $f(x') \neq y$ . Формально состязательный образец  $x$ .

$$x': D(x, x') < \eta, f(x') \neq y, \quad (1)$$

где  $D(\cdot, \cdot)$  метрика расстояния и  $\eta$  предопределенное ограничение расстояния, которое также известно как разрешенное возмущение. Эмпирически, а значение  $\eta$  принято для обеспечения сходимости между  $x$  и  $x'$  такой, что  $x'$  неотличим от  $x$ .

По определению, состязательный образец  $x'$  должен находиться близко к состязательному образцу  $x$  под определенной метрикой расстояния. Наиболее часто используемой метрикой расстояния является  $L_p$  метрика расстояния [8].  $L_p$  расстояние между  $x$  и  $x'$  обозначается как:

$$\|v\|_p = (|v_1|^p + |v_2|^p + \dots + |v_d|^p)^{1/p}, \quad (2)$$

где  $p$  – вещественное число;  $d$  – размерность вектора расстояния  $v$ .

Конкретно,  $L_0$  расстояние соответствует количеству элементов в выборке  $x$ , измененной состязательной атакой.  $L_2$  расстояние измеряется по формуле Евклидова расстояния между  $x$  и  $x'$ . Самая популярная метрика расстояния –  $L_\infty$  расстояние измеряет максимальную поэлементную разницу между доброкачественными и состязательными образцами. Существует также несколько состязательных атак на дискретные данные, которые применяются к другим метрикам расстояния, таким как количество выпавших точек и семантическое сходство [6].

**Модели угроз.** Существует три основные модели угроз для состязательных атак и защиты: модели «черного ящика», «серого ящика» и «белого ящика». Эти модели определяются в соответствии со знанием противников. В модели «черного ящика» злоумышленник не знает структуру целевой сети или параметры, но может взаимодействовать с алгоритмом глубокого обучения для запроса прогнозов для конкретных входных данных. Противники всегда создают состязательные образцы на суррогатном классификаторе, обученном приобретенными парами данных, прогнозировании и другими доброкачественными /состязательными выборками. Из-за переносимости состязательных образцов атаки «черного ящика» всегда могут поставить под угрозу естественно обученную незащищенную модель [6–8].

В модели «серого ящика» предполагается, что злоумышленник знает архитектуру целевой модели, но не имеет доступа к весам в сети. Противник также может взаимодействовать с алгоритмом ГО. В этой модели угроз ожидается, что противник создаст состязательные образцы на суррогатном классификаторе той же архитектуры. Из-за дополнительной информации о структуре противник «серого ящика» всегда показывает лучшую производительность атаки по сравнению с противником «черного ящика». Самый сильный противник, то есть противник «белого ящика», имеет полный доступ к целевой модели, включая все параметры, что означает, что противник может адаптировать атаки и напрямую создавать состязательные образцы на целевой модели. В настоящее время многие методы защиты, которые были продемонстрированы как эффективные против атак «черного ящика» / «серого ящика», уязвимы для адаптивной атаки «белого ящика» [5, 7].

**Состязательные атаки.** В этой части статьи представлено несколько типичных алгоритмов и методов состязательной атаки. Эти методы могут быть использованы для атаки на другие модели ГО, а также на модели классификации изображений ГО. Подробно описаны конкретные состязательные атаки на другие модели ГО.

1. АЛГОРИТМ L-BFGS. Первое сообщение об уязвимости глубоких нейронных сетей (ГНС) к состязательным выборкам появляется в 2013 году. В частности, изображение подвергается едва заметным состязательным возмущениям, чтобы повлиять на результат классификации ГНС. Для выявления состязательных возмущений с минимальной нормой  $L_p$  предлагается следующая формулировка метода:

$$\min_x \|x - x'\|_p, f(x') \neq y', \quad (3)$$

где  $\|x - x'\|_p - l_p$  норма состязательных возмущений и  $y'$  – это состязательная метка цели ( $y' \neq y$ ). Однако эта проблема оптимизации неразрешима.

Можно минимизировать гибридные потери, то есть  $c\|x - x'\|_p + J(\theta, x', y')$ , где  $c$  – параметр, определяется, как приближение к решению задачи оптимизации, где оптимальное значение  $c$  можно найти с помощью линейного поиска по сетке [9].

2. МЕТОД СО ЗНАКАМИ БЫСТРОГО ГРАДИЕНТА. Предлагается создать эффективную нецелевую атаку, называемую FGSM. Для создания данной атаки  $L_\infty$  необходимо состязательные образцы добавить в доброкачественные образцы, как показано на рис. 1. FGSM – типичный алгоритм одношаговой атаки, который выполняет одношаговое обновление по направлению (т.е. знаку) градиента состязательного проигрыша  $j(\theta, x, y)$ , что позволяет увеличить потери в самом большом направлении. Формально сгенерированная FGSM состязательная выборка формулируется следующим образом:

$$x' = x + \epsilon \cdot \text{sign}[\nabla_x J(\theta, x, y)], \quad (4)$$

где  $\epsilon$  – является величиной возмущения. FGSM может быть легко расширен до алгоритма целенаправленной атаки путем погружения в градиент  $J(\theta, x, y')$ , в котором  $y'$  – это метка цели. Эта стратегия обновления может уменьшить перекрестную энтропию между ожидаемым вектором вероятности и объективным вектором вероятности, если перекрестная энтропия применяется в качестве антагонистической потери. Правило обновления для целевого FGSM можно сформулировать следующим образом:

$$x' = X - \epsilon \cdot \text{sign}[\nabla_x J(\theta, x, y')]. \quad (5)$$

Кроме того, было обнаружено, что случайное возмущение перед выполнением FGSM на доброкачественных образцах может повысить производительность и разнообразие состязательных образцов FGSM.

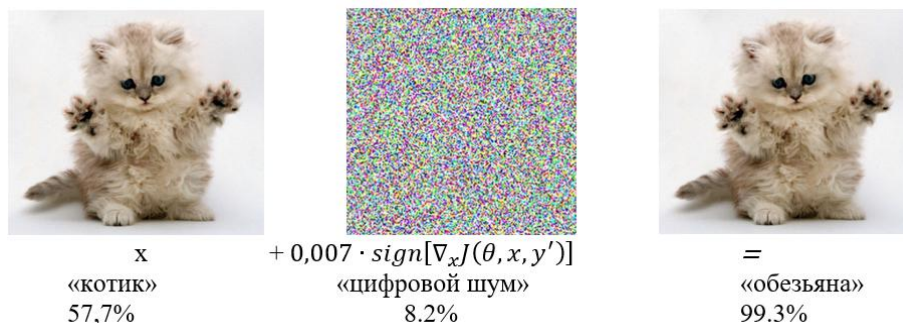


Рис. 1. Демонстрация состязательного образца, сгенерированного путем применения FGSM к GoogleNet [10]

3. BIM и PGD. BIM дополняет FGSM с меньшим размером шага и обрезает обновленный состязательный образец в допустимый диапазон для итераций  $T$ ; то есть в  $t$ -й итерации правило обновления выглядит следующим образом:

$$x'_{t+1} = CLIP\{x'_t + \alpha \cdot sign[\nabla_x J(\theta, x'_t, y)]\}, \quad (6)$$

где  $\alpha T = \epsilon$  и  $\alpha$  – величина возмущения на каждой итерации. PGD можно рассматривать, как обобщенную версию BIM без ограничения в  $\alpha T = \epsilon$ . Чтобы ограничить конфликтные возмущения, PGD проецирует конфликтные выборки, извлеченные из каждого  $\epsilon - L_\infty$  в соседний. Следовательно, размер враждебного возмущения меньше, чем  $\epsilon$ . Формально процедура обновления выполняется следующим образом

$$x'_{t+1} = Proj\{x'_t + \alpha \cdot sign[\nabla_x J(\theta, x'_t, y)]\}, \quad (7)$$

где  $Proj$  проецирует обновленный состязательный образец в  $\epsilon - L_\infty$  допустимый диапазон [10].

4. ИМПУЛЬСНАЯ ИТЕРАТИВНАЯ АТАКА. Предлагается интеграция импульсной памяти в итеративный процесс BIM и разрабатывается новый итеративный алгоритм, называемый итеративным импульсным FGSM (MI-FGSM). В частности, MI-FGSM итеративно обновляет шаблон противника следующим образом:

$$x^1_{t+1} = clip\{x^1_t + \alpha \cdot sign(g_{t+1})\}, \quad (8)$$

где градиент  $g$  обновляется по формуле:  $g_{t+1} = \xi g_t + \frac{\nabla_x J(\theta, x^1_t, y)}{\|\nabla_x J(\theta, x^1_t, y)\|}$ ,  $\xi$  – является фактором распада данных.

Предлагается также план, который означает изготовление группы моделей, чтобы исследовать модель в настройках «черного ящика» / «серого ящика». Основная идея состоит в том, чтобы рассмотреть градиенты нескольких моделей по отношению к входным данным и определить направление градиента, которое с большей вероятностью будет передано другим моделям. Комбинация MI-FGSM и ансамблевой схемы атаки заняла первые места в соревнованиях по нецелевой атаке противника и целевой атаке противника (настройка черного ящика) [11].

5. ДИСТРИБУТИВНО-АНТАГОНИСТИЧЕСКАЯ АТАКА. Предлагается новая состязательная атака, действующая в пространстве вероятностных мер, известная как распределенная состязательная атака (DAA). В отличие от PGD, где конфликтующие образцы генерируются независимо для каждого доброкачественного образца, DAA выполняет оптимизацию потенциально конфликтующих распределений. Кроме того, предлагаемая цель состоит в том, чтобы сначала включить расхождение Крафта-Макмиллана (KL) между диссоциирующим и доброкаче-

ственным распределением данных в расчет потерь несоответствия, чтобы увеличить риск противоречивых обобщений в процессе. оптимизатор. Эта задача оптимизации распределения сформулирована следующим образом:

$$\max_{\mu} \int_{\mu} J(\theta, x', y) d\mu + kl[\mu(x') \parallel \pi(x)], \tag{9}$$

где  $\mu$  обозначает состязательное распределение данных и доброкачественное  $\pi(x)$  распространение данных.

Поскольку прямая оптимизация над распределением неразрешима, авторы используют два метода оптимизации частиц для аппроксимации. По сравнению с PGD, DAA исследует новые состязательные паттерны, как показано на рис. 2 [12–14]. Данная модель считается одной из самых эффективных атак на несколько оборонительных моделей  $l_{\infty}$ .

6. АТАКИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ. Предлагается набор состязательных атак на основе оптимизации (C&W атак), которые могут генерировать  $l_0, l_1$ , и  $l_{\infty}$  нормы измеренных состязательных образцов, а именно:  $CW_0, CW_1, CW_{\infty}$ . Похожий на L-BFGS, формулируется цель оптимизации следующим образом:

$$\min_{\delta} D(x, x + \delta) + c.F(x + \delta), \text{ при условии } x + \delta \in [0,1]. \tag{10}$$

где  $\delta$  обозначает состязательное возмущение,  $D(\cdot, \cdot), l_0, l_1, l_{\infty}$  – матричное расстояние, и  $f(x + \delta)$  обозначает настройку состязательно потери, которая удовлетворяет  $f(x + \delta) \leq 0$ , если методика DNNs является прогнозом, то – это цель атаки для обеспечения  $(x + \delta)$ , что выдает допустимое изображение, вводит новый заменитель переменной  $\delta$  следующим образом:

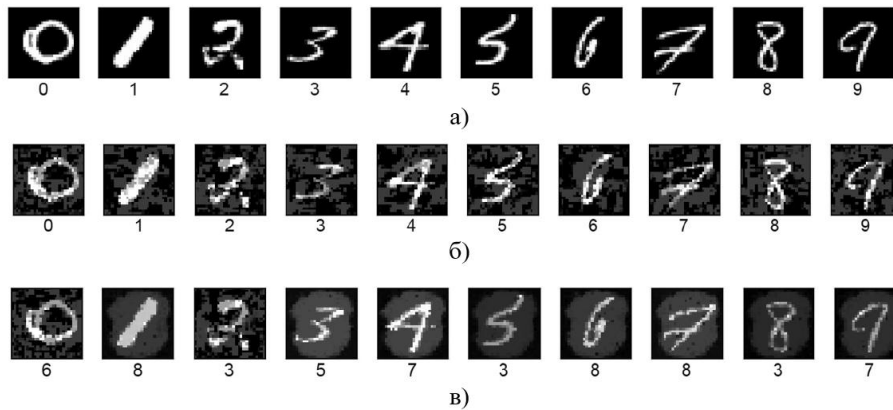


Рис. 2. Сравнение между PGD и DAA. DAA имеет тенденцию генерировать более структурированные возмущения [7] а – изначальные значения, б – после применения PGD, в – после применения DAA

$$\delta = \frac{1}{2} [\tanh(k) + 1], \tag{11}$$

так что  $x + \delta = \frac{1}{2} [\tanh(k) + 1]$ , который всегда находится в диапазоне  $[0,1]$  в процессе оптимизации.

Атаки C&W обеспечивают 100-процентный прогресс атаки на нормально подготовленных DNN для MNIST, CIFAR-10 и ImageNet. Они также компрометируют охраняемые утонченные модели, на которых L-BFGS и Deep Fool пренебрегают поиском недоброжелательных результатов.

7. **ОСНОВАННЫЙ НА ПОДХОДЕ К КАРТЕ ЗНАЧИМОСТИ.** Предложено эффективная целевая атака под названием JSMA, которая может обмануть DNN с маленькими  $l_0$  возмущений. Метод сначала вычисляет матрицу:

$$\nabla l(x) = \frac{\partial(x)}{\partial x} = \left[ \frac{ax_j(x)}{ax_y} \right], y \in 1, \dots, M_{in}, j \in 1, M_{out}, \quad (12)$$

где  $M_{in}$  – число нейронов во входном слое;  $M_{out}$  – количество нейронов на выходном слое;  $s$  – индекс для входного компонента  $x$ ;  $j$  – индекс для выходного компонента  $l$ .

Матрица определяет, как элементы ввода влияют на выходы различных классов. Согласно якобианской матрице, карта связательности  $xS(X, Y^1)$  определяется для выбора объектов/пикселей, которые должны быть возмущены для получения желаемых изменений в выходных данных [11, 12]. В частности, предлагаемый алгоритм возмущает элемент  $X[Y]$  с наибольшим значением  $S(X, Y^1)[y]$  и значительно увеличивает/уменьшает выходы целевого/другого состояния. Следовательно, возмущения на небольшой части элементов уже могут влиять на  $l(x)$  и обмануть нейронную сеть.

8. **УНИВЕРСАЛЬНАЯ СОСЯЗАТЕЛЬНАЯ АТАКА.** Во всех упомянутых выше атаках искусственно созданные враждебные возмущения специфичны для доброкачественных образцов. Другими словами, враждебные возмущения не передаются по доброкачественным выборкам.

Здесь возникает прямой вопрос: существует ли универсальное возмущение, которое может обмануть сеть на большинстве доброкачественных выборок?

Такой вектор возмущения путем итеративного обновления возмущения с использованием всех целевых доброкачественных выборок существует. На каждой итерации для безвредных выборок, которые текущее возмущение не может обмануть, решается задача оптимизации, которая аналогична L-BFGS [15] и которая направлена на обнаружение минимального дополнительного возмущения, необходимого для компрометации выборок. Затем дополнительное возмущение добавляется к текущему возмущению. В конечном счете, возмущение позволяет большинству доброкачественных выборок обмануть сеть. Эксперименты показывают, что этот простой итеративный алгоритм эффективен для атаки на глубокие сети. Удивительно, но эта переносимость между выборками также сохраняется в разных моделях; например, универсальные возмущения, созданные на VGG, также могут достигать коэффициента обманчивости выше 53% , чем в других моделях.

**Враждебные атаки на широко распространенные приложения, представляющие промышленный интерес.**

1. Модели семантической сегментации являются объектом состязательных атак. Предложен систематический алгоритм - для генерации состязательных образцов для задач обнаружения объектов и сегментации. Основная идея данного алгоритма заключается в рассмотрении всех целей в задаче обнаружения/сегментации одновременно и оптимизации общих потерь. Более того, чтобы справиться с большим количеством предложений в задаче обнаружения объектов на уровне пикселей, алгоритм сохраняет увеличенное, но разумное количество предложений, изменяя скорость пересечения над объединением в процессе оптимизации. Отмечается, что для задачи сегментации связь между широко используемыми состязательными потерями и точностью не так хорошо установлена, как в задаче классификации. Поэтому предлагается новая альтернативную потерю, чтобы оценить истинные потери противника, которые являются продуктом случайных ошибок и потерь миссии. Случайная ошибка характеризуется разницей между предсказанной вероятностью, лежащей в основе истины и вероятностью предсказания цели. Независимые от модели потери соответствуют цели максимизации.

Кроме того, выводится новое приближение градиента потерь замещения для входных данных, чтобы обеспечить оптимизацию на основе градиента на входе. Эксперименты показывают, что предложенный алгоритм достигает наивысшей производительности атаки при сегментировании семантики.

#### Методы состязательной защиты

1. Состязательное обучение. Состязательное обучение, которое направлено на повышение надежности нейронной сети путем обучения ее с помощью состязательных образцов, является интуитивно понятной защитой. Официально это игра min-max, которую можно спланировать следующим образом:

$$\min_{\theta} \max_{D(x^1, x^1)} J(\theta, x^1, y), \quad (13)$$

где  $J(\theta, x^1, y)$  – состязательная потеря, с сетевым весом  $h$ , состязательный ввод  $x^1$ , и метка истинности  $y$ .  $D(x, x')$  представляет определенную метрику расстояния между  $x$  и  $x'$ . Задача внутренней максимизации заключается в поиске наиболее эффективных состязательных образцов, что решается хорошо продуманной состязательной атакой, такой как FGSM [5] и PGD [6]. Внешняя минимизация является стандартной процедурой обучения для минимизации потерь. Предполагается, что полученная сеть должна быть устойчивой к состязательной атаке, используемой для генерации состязательной выборки на этапе обучения. Противоборствующая подготовка является одной из наиболее эффективных защит от состязательных атак. В частности, он достигает самой высокой точности по нескольким критериям.

2. Случайный шум. Предлагается использовать случайный механизм шумоподавления, известный как случайный (RSE), для защиты от состязательных возмущений. Чтобы стабилизировать выходы DNN, RSE исследуются результаты прогнозирования над случайными шумами и добавляется шумовой слой перед каждым сверточным слоем во время фаз обучения и тестирования. Предлагается защита на основе методов глубокого обучения. Чтобы обеспечить границы ГО по изменению распределения по сравнению с его прогнозами входных данных разработанный метод можно использовать для защиты  $L_1/L_2$  атаки с использованием механизмов ГО. Далее предлагается напрямую добавлять случайный шум к пикселям состязательных примеров перед классификацией, чтобы устранить последствия состязательных возмущений. Этот простой метод может превышать размер состязательного возмущения, к которому он устойчив, что зависит от первой и второй по величине вероятностей распределения выходной вероятности (вектора).

3. Шумоподавление. Шумоподавление является очень простым методом для уменьшения шумовых / контрастных эффектов. Есть два направления проектирования таких защит: входное шумоподавление и шумоподавление функций. Первая составляющая удаляет некоторые или все конфликтующие возмущения из входных данных, а вторая пытается свести к минимуму влияние конфликтующих возмущений на высокоуровневые функции.

Чтобы свести к минимуму конфликтующие эффекты сначала используются два метода сжатия (шумоподавления) уменьшения битов и размытия изображения – для снижения степеней свободы и устранения шумов столкновения, как показано на рис. 3. Обнаружение импульсных паттернов выполняется путем сравнения прогнозов модели на исходном и сжатом изображении. Если исходные и сжатые входные данные производят отличать выходные данные от модели, исходные входные данные могут быть конфликтующим образцом. Предполагается, что методы сжатия признаков, могут смягчить C&W-атаку. После каждого шага процесса оптимизации доступно промежуточное изображение. Уменьшенная глубина цвета версии этого промежуточного изображения проверяется системой обнару-

жения [16]. Такой процесс оптимизации выполняется несколько раз, и все промежуточные образцы конкурентов, которые могут пройти систему, агрегируются. Все эти адаптивные атаки могут нарушить систему сжатия входных данных с гораздо меньшими шумами.

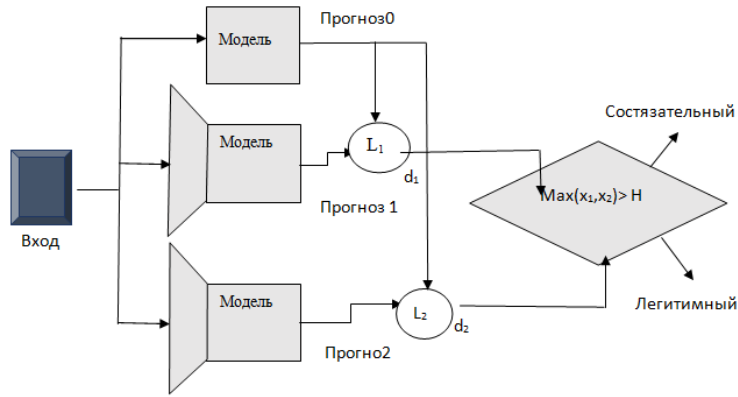


Рис. 3. Структура для сжатия признаков.  $d_1$  и  $d_2$  - разница между прогнозом модели на исходном входе и сжатым входе;  $H$  - порог, который используется для поиска примеров состязательного поведения

4. Очистка входов на основе методологии GAN. GAN является мощным инструментом для изучения обобщенной модели распределения данных. Поэтому многие задачи целесообразно решать с использованием GAN для изучения доброкачественного распределения данных для создания доброкачественной проекции для состязательного ввода. Защита GAN и устранение помех со стороны противника GAN (APE-GAN) являются двумя типичными алгоритмами среди всех аналогичных. Защита-GAN образует генератор для моделирования распределения доброкачественных изображений, как показано на рис. 4 [17]. На этапе тестирования защита-GAN очищает состязательный ввод, ища изображение, близкое к состязательному входу в его изученном распределении, и передает это доброкачественное изображение в классификатор. Эта стратегия может быть использована для защиты от различных вражеских атак. В настоящее время наиболее эффективная схема атаки против защиты-GAN основана на обратном дифференциальном приближении [18], что позволяет снизить его точность до 55% при возмущении противника  $0,005 L_2$ . APE-GAN [80] непосредственно учит генератор очищать противоречивый образец, используя его в качестве входных данных, и генерирует доброкачественный аналог.

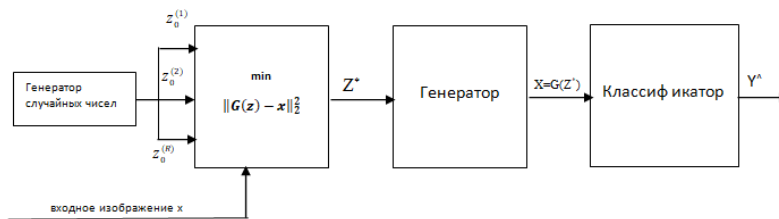


Рис. 4. Защита-GAN.  $G$  – общая модель может отбирать высокоразмерные входные данные из низкоразмерного  $z$ -вектора;  $R$  – случайное векторное число, сгенерированное генератором случайных чисел



**Выводы:**

1. Атаки «белого ящика» и «черного ящика». С точки зрения оппонента, основное различие между настройками «белого» и «черного ящика» заключается в их уровне подхода к целевой модели. В настройках «белого ящика» злоумышленники могут получить доступ к структуре и весам модели, чтобы они могли рассчитать наклон реальной модели или оценить уклон с помощью методов [19]. Кроме того, противники могут корректировать свои методы атаки с помощью методов и настроек защиты. В этом контексте большинство ранее введенных эвристических защит неэффективны против таких мощных адаптивных противников. Однако в настройках «черного ящика» структура модели и веса являются секретными для противника. В этом контексте, чтобы применить вышеуказанные алгоритмы атаки на основе градиента, противник должен вывести значения модели из ограниченной информации. Без какой-либо информации, специфичной для модели, непредвзятая оценка параметров модели является ожиданием набора предварительно обученных моделей с различными случайными частицами. Таким образом, противник может вывести параметры из выхода целевой модели с хорошо спроектированными входами. В этом контексте предлагаемая конструкция может применять метод нулевого порядка, чтобы дать гораздо лучшую оценку параметров модели. Однако недостатком этого метода является то, что он требует большого количества целевых попаданий.

2. Различия между потоками состязательной атаки и защиты. Поток исследовательский состязательной атаки охватывает два основных направления. Первое направление заключается в разработке более эффективных и сильных атак для оценки различных систем защиты. Важность этого направления интуитивно понятна, поскольку ожидается понять все угрозы для потенциальных противников. Второе направление – это трансляция атак противника в физический мир. До сих пор эта тема исследования была сосредоточена на том, представляют ли эти вражеские атаки реальную угрозу в физическом мире. Некоторые исследователи предположили, что конфликтующие атаки, первоначально разработанные в цифровых пространствах, не будут эффективны в физическом мире из-за влияния определенных факторов окружающей среды. Недавно Cao et al. [20–25] удалось создать противоположные цели, чтобы обмануть систему обнаружения на основе LiDAR, еще раз подтвердив существование противоположных физических образцов. Когда дело доходит до обороны, сообщество начинает фокусироваться на сертифицированной безопасности, поскольку большинство эвристических мер безопасности не обеспечивают защиту от адаптивных атак белого ящика, а сертифицированная защита должна гарантировать, что защита эффективна в некоторых ситуациях, независимо от ситуации.

Однако до сих пор масштабируемость была распространенной проблемой для большинства сертифицированных систем безопасности. Например, доменно-коррелированный анализ является популярным новым направлением для сертификации DNN, но он не масштабируется до очень глубоких нейронных сетей и больших данных. Конечно, развитие защиты сталкивается с большими проблемами по сравнению с нападением. Это происходит главным образом потому, что атака может быть нацелена только на одну категорию защиты, но защита должна быть сертифицирована, т.е. должна быть эффективной против всех возможных методов нападения в определенных ситуациях.

В этой статье предоставлен обзор новейших репрезентативных методов защиты и атаки, которые более подробно будут рассматриваться при исследовании атак на предприятиях, используемых нейронные сети для работы. Рассмотрены идеи и методы предложенных методов и алгоритмов. К сожалению, в настоящее время нет никакого защитного механизма, который был бы эффективным и действенным против состязательных атак.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E.* ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Proceedings of the 26th Conference on Neural Information Processing Systems; 2012 Dec 3–6; Lake Tahoe, NV, USA; 2012. – P. 1097-105.
2. *Чо К., ван Мерриенбург Б., Гюльсехре С., Бахданау Д., Бугарес Ф., Швенк Х. и др.* Изучение фразовых представлений с использованием кодировщика-декодера RNN для статистического машинного перевода. 2014. arXiv:1406.1078.
3. *Szegedy C., Zaremba W., Sutskever I., Bruna J., Erhan D., Goodfellow I., et al.* Intriguing properties of neural networks. 2013. arXiv:1312.6199.
4. *Goodfellow I.J., Shlens J., Szegedy C.* Explaining and harnessing adversarial examples. 2014. arXiv:1412.6572.
5. *Заргарян Ю.А.* Задача управляемости в адаптивной автоматной обучаемой системе управления // Матер. X Международной научно-технической конференции "Технологии разработки информационных систем". – 2020.
6. *Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Kapc I.V., Sakharova O.N., Kalyakina I.M and Dmitrieva I.A.* Method of estimating the Pareto-optimal solutions based on the usefulness. International Conference on Advances in Material Science and Technology - CAMSTech-2020 // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 919 (2). – P. 022027 (1-8). – DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022027.
7. *Zheng T., Chen C., Ren K.* Distribution ally adversarial attack. 2018. arXiv:1808.05537.
8. *Карлини Н., Вагнер Д.* К оценке надежности нейронных сетей // Матер. симпозиума IEEE 2017 года по безопасности и конфиденциальности; 22–26 мая 2017 г. Сан-Хосе, Калифорния, США, 2017. – С. 39-57.
9. *Papernot N., McDaniel P., Jha S., Fredrikson M., Celik Z.B., Swami A.* The limitations of deep learning in adversarial settings // Proceedings of the 2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy; 2016 Mar 21–24; Saarbrücken, Germany, 2016. – P. 372-87.
10. *Moosavi-Dezfooli S.M., Fawzi A., Frossard P.* DeepFool: a simple and accurate method to fool deep neural networks // Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2016 Jun 27–30. Las Vegas, NV, USA, 2016. – P. 2574-82.
11. *Papernot N., McDaniel P., Goodfellow I.* Transferability in machine learning: from phenomena to black-box attacks using adversarial samples. 2016. arXiv:1605.07277.
12. *Liu Y., Chen X., Liu C., Song D.* Delving into transferable adversarial examples and black-box attacks. 2016. arXiv:1611.02770.
13. *Madry A., Makelov A., Schmidt L., Tsipras D., Vladu A.* Towards deep learning models resistant to adversarial attacks. 2017. arXiv: 1706.06083.
14. *Аламир Х.С., Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А.* Модель прогнозирования транспортного потока на основе нейронных сетей для предсказания трафика на дорогах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6 (223). – С. 124-132.
15. *Zheng T., Chen C., Yuan J., Li B., Ren K.* Point Cloud saliency maps. 2018. arXiv:1812.01687.
16. *Beloglazov D., Sharovalov I., Soloviev V., Zargaryan E.* The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12, No. 23. – P. 6762-6772.
17. *Атали А., Карлини Н., Вагнер Д.* Запутанные градиенты дают ложное чувство безопасности: обход защиты к состязательным примерам. 2018. arXiv:1802.00420.
18. *Zargaryan E.V., Zargaryan Ju.A., Finaev V.I.* Information support for the training of fuzzy production account balance in the conditions of incomplete data // Innovative technologies and didactics in teaching (ITDT-2016): Collected papers. – 2016. – P. 128-138.
19. *Чен Ю., Шарма Ю., Чжан Х., И Дж., Се С.Дж.* EAD: атаки эластичной сети на глубокие нейронные сети на состязательных примерах // Матер. тридцать второй конференции AAAI по искусственному интеллекту; 2–7 февраля 2018 г. Новый Орлеан, Лос-Анджелес, США, 2019.
20. *Пушнина И.В.* Система управления подвижным объектом в условиях неопределенности // Наука и образование на рубеже тысячелетий: Сб. научно-исследовательских работ. – Кисловодск, 2018. – С. 65-74.
21. *Xiao C., Li B., Zhu J.Y., He W., Liu M., Song D.* Generating adversarial examples with adversarial networks. 2018. arXiv:1801.02610.

22. Роннебергер О., Фишер., Брокс Т. U-net: сверточные сети для сегментации биомедицинских изображений // Матер. Международной конференции по вычислительной технике медицинских изображений и компьютерному вмешательству; 5–9 октября 2015 г. Мюнхен, Германия, 2015. – С. 234-41.
23. Qi C.R., Su H., Mo K., Guibas L.J. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation // Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2017 Jul 21–26; Honolulu, HI, USA, 2017. – P. 652-60.
24. Финаев В.И., Заргарян Ю.А., Заргарян Е.В., Соловьев В.В. Формализация групп подвижных объектов в условиях неопределённости для выбора управляющих решений // Информатизация и связь. – 2016. – № 3. – С. 56-62.
25. Бехзадан В., Мунир А. Уязвимость глубокого обучения с подкреплением к атакам с целью индукции политики // Матер. Международной конференции по машинному обучению и интеллектуальному анализу данных в распознавании образов; 15–20 июля 2017 г. Нью-Йорк, Нью-Йорк, США, 2017. – С. 262-75.

## REFERENCES

1. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks, *Proceedings of the 26th Conference on Neural Information Processing Systems; 2012 Dec 3–6; Lake Tahoe, NV, USA; 2012*, pp. 1097-105.
2. Cho K., van Merriënbur B., Gyul'sekhre S., Bakhdanau D., Bugares F., Shvenk Kh. i dr. Izuchenie frazovykh predstavleniy s ispol'zovaniem kodirovshchika-dekodera RNN dlya statisticheskogo mashinnogo perevoda [The study of phrasal representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation], 2014. arXiv:1406.1078.
3. Szegedy C., Zaremba W., Sutskever I., Bruna J., Erhan D., Goodfellow I., et al. Intriguing properties of neural networks, 2013, arXiv:1312.6199.
4. Goodfellow I.J., Shlens J., Szegedy C. Explaining and harnessing adversarial examples. 2014. arXiv:1412.6572.
5. Zargaryan Yu.A. Zadacha upravlyaemosti v adaptivnoy avtomatnoy obuchaemoy sisteme upravleniya [The problem of controllability in an adaptive automatic trainable control system], *Mater. X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem"* [Materials of the X International Scientific and Technical Conference. "Information Systems Development Technologies"], 2020.
6. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Kapc I.V., Sakharova O.N., Kalyakina I.M and Dmitrieva I.A. Method of estimating the Pareto-optimal solutions based on the usefulness. International Conference on Advances in Material Science and Technology - CAMSTech-2020, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919 (2), pp. 022027 (1-8). DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022027.
7. Zheng T., Chen C., Ren K. Distribution ally adversarial attack. 2018. arXiv:1808.05537.
8. Karlini N., Vagner D. K otsenke nadezhnosti neyronnykh setey [To assess the reliability of neural networks], *Mater. simpoziuma IEEE 2017 goda po bezopasnosti i konfidentsial'nosti; 22–26 maya 2017 g. San-Khose, Kaliforniya, SShA, 2017* [Proceedings of the 2017 IEEE Symposium on Security and Privacy; May 22-26, 2017; San Jose, California, USA; 2017], pp. 39-57.
9. Papernot N., McDaniel P., Jha S., Fredrikson M., Celik Z.B., Swami A. The limitations of deep learning in adversarial settings, *Proceedings of the 2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy; 2016 Mar 21–24; Saarbrücken, Germany, 2016*, pp. 372-87.
10. Moosavi-Dezfooli S.M., Fawzi A., Frossard P. DeepFool: a simple and accurate method to fool deep neural networks, *Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2016 Jun 27–30. Las Vegas, NV, USA, 2016*, pp. 2574-82.
11. Papernot N., McDaniel P., Goodfellow I. Transferability in machine learning: from phenomena to black-box attacks using adversarial samples. 2016. arXiv:1605.07277.
12. Liu Y., Chen X., Liu C., Song D. Delving into transferable adversarial examples and black-box attacks. 2016. arXiv:1611.02770.
13. Madry A., Makelov A., Schmidt L., Tsipras D., Vladu A. Towards deep learning models resistant to adversarial attacks. 2017. arXiv: 1706.06083.
14. Alamir K.H.S., Zargaryan E.V., Zargaryan Yu.A. Model' prognozirovaniya transportnogo potoka na osnove neyronnykh setey dlya predskazaniya trafika na dorogakh [A traffic flow prediction model based on neural networks for predicting traffic on the roads], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6 (223), pp. 124-132.

15. Zheng T., Chen C., Yuan J., Li B., Ren K. Point Cloud saliency maps. 2018. arXiv:1812.01687.
16. Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E. The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields, *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, Vol. 12, No. 23, pp. 6762-6772.
17. Аталу А., Карлини Н., Вагнер Д. Запутанные градиенты дают ложное чувство безопасности: обход защиты к состязательным примерам. 2018. arXiv:1802.00420.
18. Zargarjan E.V., Zargarjan Ju.A., Finaev V.I. Information support for the training of fuzzy production account balance in the conditions of incomplete data, *Innovative technologies and didactics in teaching (ITDT-2016): Collected papers*, 2016, pp. 128-138.
19. Chen Yu., Sharma Yu., Chzhan Kh., I Dzhan, Se S.Dzh. EAD: ataki elastichnoy seti na glubokie neyronnye seti na sostyazatel'nykh primerakh [EAD: Elastic network attacks on deep neural networks on adversarial examples], *Mater. tridtsat' vtoroy konferentsii AAAI po iskusstvennomu intellektu; 2–7 fevralya 2018 g. Novyy Orlean, Los-Andzheles, SShA, 2019* [Proceedings of the Thirty-second AAAI Conference on Artificial Intelligence; February 2-7, 2018; New Orleans, Los Angeles, USA; 2019].
20. Pushnina I.V. Sistema upravleniya podvizhnym ob'ektom v usloviyakh neopredelennosti [The control system of a moving object in conditions of uncertainty], *Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletiy: Sb. nauchno-issledovatel'skikh rabot* [Science and Education at the turn of the Millennium. Collection of research papers]. Kislovodsk, 2018, pp. 65-74.
21. Xiao C., Li B., Zhu J.Y., He W., Liu M., Song D. Generating adversarial examples with adversarial networks. 2018. arXiv:1801.02610.
22. Ronneberger O., Fisher., Broks T. U-net: svtochnye seti dlya segmentatsii biomeditsinskih izobrazheniy [U-net: convolutional networks for segmentation of biomedical images], *Mater. Mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitel'noy tekhnike meditsinskih izobrazheniy i kompyuternomu vmeshatel'stvu; 5–9 oktyabrya 2015 g. Myunkhen, Germaniya, 2015* [Proceedings of the International Conference on Medical Imaging Computing and Computer Intervention; October 5-9, 2015; Munich, Germany; 2015], pp. 234-41.
23. Qi C.R., Su H., Mo K., Guibas L.J. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation, *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2017 Jul 21–26; Honolulu, HI, USA, 2017*, pp. 652-60.
24. Finaev V.I., Zargaryan Yu.A., Zargaryan E.V., Solov'ev V.V. Formalizatsiya grupp podviznykh ob'ektov v usloviyakh neopredelennosti dlya vybora upravlyayushchikh resheniy [Formalization of groups of mobile objects under uncertainty for the choice of control solutions], *Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and Communication]*, 2016, No. 3, pp. 56-62.
25. Bekhzadan V., Munir A. Uyazvimost' glubokogo obucheniya s podkrepleniem k atakam s tsel'yu induktsii politiki [Vulnerability of deep learning with reinforcement to attacks for the purpose of policy induction], *Mater. Mezhdunarodnoy konferentsii po mashinnomu obucheniyu i intellektual'nomu analizu dannykh v raspoznavanii obrazov; 15–20 iyulya 2017 g. N'yu-York, N'yu-York, SShA, 2017* [Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition; July 15-20, 2017. New York, New York, USA, 2017], pp. 262-75.

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

**Ауси Рим Мохаммед Худхейр** – Южный федеральный университет; e-mail: ausi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

**Заргарян Елена Валерьевна** – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Заргарян Юрий Артурович** – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Aussi Rim Mohammed Hedhair** – Southern Federal University; e-mail: ausi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; postgraduate student.

**Zargaryan Elena Valerevna** – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Zargaryan Yuri Arturovich** – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**П.А. Воронин, А.М. Белевцев, С.С. Александрова**

**РАЗРАБОТКА ОБЩЕГО АЛГОРИТМА И СТРУКТУРЫ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ  
ПОДДЕРЖКИ ПРЕДПРИЯТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПРОФИЛЯ**

*Условия постоянно растущей конкуренции требуют экономии не только материальных или финансовых ресурсов, но также интеллектуальных, информационных и временных. Особую роль в решении этой задачи играют информационные технологии, применяемые на всех стадиях жизненного цикла изделий, от стратегического анализа и производства до модернизации и утилизации. Развитие современных информационных технологий, характеризующееся стремлением к объединению информационных ресурсов, кооперации при создании информационных систем, к совместному использованию информации, к автоматизации и регламентации процессов предприятия, сыграло важную роль в решении группы задач по экономии ресурсов. Производство сложных изделий сегодня немыслимо без обеспечения их информационной поддержки на всех стадиях жизненного цикла. Информационная поддержка – это целый комплекс вопросов, включающий автоматизацию процессов проектирования, обеспечение технологических процессов производства, автоматизацию управленческой деятельности предприятий, создание электронной конструкторской и эксплуатационной документации, внедрение автоматизированных систем заказа запасных частей и т.д. В данной статье рассматривается разработка общего алгоритма и структуры автоматизированной системы информационного обеспечения предприятия радиолокационного профиля, что является важным шагом на пути повышения эффективности и результативности деятельности этих предприятий. Разработка и внедрение такой системы требует тщательного планирования, проектирования и тестирования, а также постоянного обслуживания и поддержки. Однако потенциальные преимущества такой системы значительны и могут помочь предприятиям, работающим с радиолокационными профилями, оставаться конкурентоспособными и успешными во все более сложной и сложной деловой среде. В документе обсуждается внедрение системы, включая различные этапы проектирования и разработки, процедуры тестирования и проверки.*

*Процессное управление; автоматизированное рабочее место; бизнес-процесс; информационная система.*

**P.A. Voronin, A.M. Belevtsev, S.S. Aleksandrova**

**DEVELOPMENT OF A GENERAL ALGORITHM AND STRUCTURE  
OF AUTOMATED SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT FOR A RADAR  
PROFILE ENTERPRISE**

*The conditions of ever-growing competition require saving not only material or financial resources, but also intellectual, informational and temporary ones. Information technologies used at all stages of the product life cycle, from strategic analysis and production to modernization and disposal, play a special role in solving this problem. The development of modern information technologies, characterized by the desire to combine information resources, cooperation in the creation of information systems, information sharing, automation and regulation of enterprise processes, has played an important role in solving a group of tasks to save resources. The production of complex products today is unthinkable without providing them with information support at all stages of the life cycle. Information support is a whole range of issues, including automation of design processes, provision of technological processes of production, automation of management activities of enterprises, creation of electronic design and operational documentation, implementation of automated systems for ordering spare parts, etc. This article discusses the development of a general algorithm and structure of an automated information support system for a radar profile enterprise, which is an important step towards improving the efficiency and effectiveness of these enterprises. The development and implementation of such a system requires careful planning, design and testing, as well as continuous maintenance and support. However, the potential bene-*

*fits of such a system are significant and can help enterprises working with radar profiles to remain competitive and successful in an increasingly complex and complex business environment. The document discusses the implementation of the system, including the various stages of design and development, testing and verification procedures.*

*Process management; automated workplace; business process; information system.*

**Введение.** На сегодняшний день одной из самых перспективных концепций управления компанией и возможным средством улучшения деятельности организации является процессный подход к управлению, который тесно связан с внедрением информационной поддержки изделия на всех стадиях жизненного цикла [1]. Важной составляющей процесса, которая не отражена в этом определении, является систематичность действий. Действия процесса должны быть повторяющимися, а не случайными [2].

Принципиальным отличием процессного подхода от других (например, функционального) является концентрированность на результате и оптимальном способе его достижения.[3] Выделение части деятельности как отдельного объекта – бизнес процесса – дает возможность управлять этим объектом: проектировать, регламентировать, оптимизировать, планировать и контролировать показатели результативности и эффективности процесса.

Показатели процесса необходимы для получения информации о его работе и принятии соответствующих управленческих решений. Показатели процесса это набор количественных или качественных параметров, характеризующих сам процесс и его результат (выход) [4].

**Основная часть.** В процессе выполнения работы был разработан и опробован алгоритм построения системы распределенной обработки данных (рис. 1).

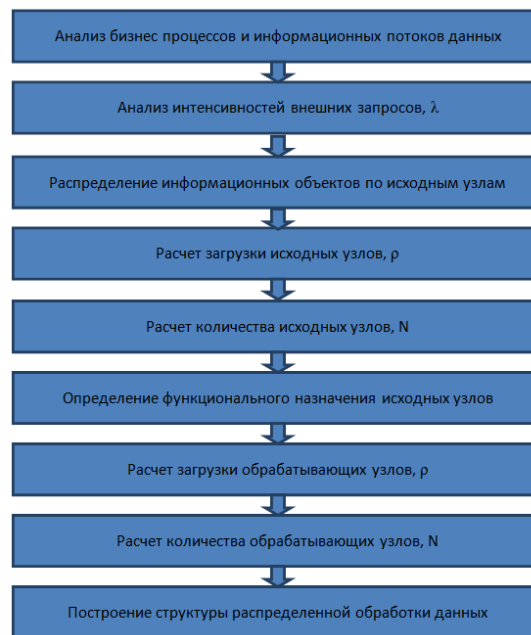


Рис. 1. Алгоритм построения системы распределенной обработки данных

В ходе исследования были выявлены типовые запросы, приходящие в отдел главного конструктора от внешних источников и на основе проведенного анализа бизнес-процессов был определен перечень конкретных работ, проходящие в отдел

главного конструктора (ОГК). За результатом некоторых процессов приходит внешний запрос, такие информационные объекты называются головными [5]. Существуют процессы в ОГК, необходимые для поддержания головных процессов, эти процессы называются вспомогательными.

Таблица 1

## Перечень работ

№ ИО	Наименование работ	Внешний запрос
A1	Внесение изменений в КД	Цех
A2	Анализ возможности замены материала	Цех
A3	Модернизация выпускаемых изделий	-
A4	Разработка ведомости ЗИП	-
A5	Доработка новых изделий	ОКБ
A6	Подготовка к серийному производству	Цеха
A7	Разработка конструкторской документации	-
A8	Разработка эксплуатационной документации	-
A9	Создание каталога поставки	-
A10	Поиск аналогов импортных элементов	-
A11	Разработка схемы транспортировки	-
A12	Согласование договора	СКД
A13	Корректировка договоров на закупку	СОП
A14	Разработка программы и методики испытаний	-

Для реализации автоматизированной системы информационной поддержки ОГК необходимо объединить взаимосвязанные работы по функциональному признаку и по интенсивности взаимодействий. Для распределения информационных объектов по информационным узлам воспользуемся эвристическим алгоритмом численного решения математической модели разбиения системы распределенной обработки данных (СРОД) на подсистемы или подсети [6]. Для этого необходимо определить интенсивности взаимодействия ИО между собой.

Таблица 2

## Матрица интенсивностей взаимодействия ИО ОГК

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
A1	-	-	5	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	1
A2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A3	5	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	1
A4	-	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-	1	-	-
A5	-	-	5	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
A6	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	7
A8	-	-	-	1	-	-	-	-	2	-	7	7	-	-
A9	-	-	-	2	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
A10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
A11	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	7	-	-
A12	-	-	-	1	-	-	7	7	-	-	7	-	-	-
A13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-
A14	1	-	1	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-

В результате проведенного исследования ОГК были определены интенсивности обращений внешних подразделений и внутренних запросов за период 8 часов (один рабочий день). Для определения наиболее сильно взаимодействующих между собой объектов необходимо определить загрузку каждого информационного объекта [7]. Загрузка определяется по формуле  $\rho_i = \lambda_i * t_i$ , где  $\lambda$  – интенсивность запросов к  $A_i$  (ИО) и определяется как отношение количества запросов за время за которое они поступили, а  $t$  – время обработки запроса было получено в результате проведенного анализа.

Результаты расчета загрузки представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Расчет загрузки информационных объектов.**

№ ИО	Наименование ИО	Кол-во запросов за 8ч, N	Интенсивность запросов, $\lambda$ , шт/сек	Время обработки запроса, t, ч	Загрузка, $\rho$
A1	Внесение изменений в КД	35	0,0012	1	4,32
A2	Анализ возможности замены материала	70	0,0024	0.5	4,32
A3	Модернизация выпускаемых изделий	5	0,00017	8	4,8
A4	Разработка ведомости ЗИП	1	0,000035	8	1,008
A5	Доработка новых изделий	10	0,00035	4	5,04
A6	Подготовка к серийному производству	1	0,000035	24	3,02
A7	Разработка конструкторской документации	12	0,00041	6	8,86
A8	Разработка эксплуатационной документации	7	0,00024	8	6,91
A9	Создание каталога поставки	2	0,00007	12	3,02
A10	Поиск аналогов импортных элементов	5	0,00017	4	2,45
A11	Разработка схемы транспортировки	7	0,00024	8	6,91
A12	Согласование договора	7	0,00024	2	1,73
A13	Корректировка договоров на закупку	10	0,00035	4	5,04
A14	Разработка программы и методики испытаний	9	0,00031	4	4,46

В общем случае СРОД можно выделить на две категории узлов – обрабатывающие и исходные узлы.

В обрабатывающих узлах (ОУ) сосредоточены основные ресурсы системы, обеспечивающие ее функционирование.



Исходные узлы (ИУ), обладая менее значительными ресурсами, чем ОУ, обеспечивают выполнение функций входа в систему, и предварительную, (а иногда и окончательную) обработки вопросов к автоматизированной системе информационной поддержки [8].

В СРОД роль обрабатывающих узлов играют узлы, в которых размещены, например серверы системы, а роль ИУ – узлы, являющимися рабочими станциями ПК (АРМ) [5].

В серверах, как правило, хранятся наиболее емкие информационные массивы и выполняются процедуры, требующие значительных затрат вычислительных ресурсов [9].

В ИУ хранится наиболее часто используемая информация небольшого объема и решаются задачи, не требующие больших затрат вычислительных ресурсов [10].

Одной из основных задач при построении любой распределенной системы является задача определения рационального числа центров, или узлов системы, как обрабатывающих, так и исходных [11].

Эта задача решается последовательно для ИУ и ОУ.

При построении и организации функционирования СРОД большое значение приобретает рациональное распределение нагрузки между узлами системы [12]. При этом необходимо учитывать, в общем случае, технологические возможности как обрабатывающих, так и исходных узлов. Это связано с тем, что стремление переложить работу только на обрабатывающий узел (ОУ) зачастую приводит к возрастанию непроизводительных затрат и как следствие – к снижению производительности системы в целом.[13] Математическое моделирование процессов функционирования системы в такой ситуации позволяет получить рекомендации по рациональному распределению нагрузки в системе.

Для разработки системы распределенной обработки данных необходимо распределить определенные ранее информационные объекты (работы) по автоматизированным рабочим местам (исходным узлам) [14]. Информационные объекты с наибольшими интенсивностями взаимодействия будут рационально реализовать в рамках одного автоматизированного рабочего места.

Существо предлагаемого подхода заключается в последовательном подборе «близких», т.е. наиболее активно взаимодействующих узлов в одну подсеть (подсистему).

При этом смысловая сторона процедуры состоит в том, что объединение в один исходный узел (с учетом существующий ограничений) ИО (пользователей), характеризующихся значительным воздействием, позволяет снизить нагрузку на ресурсы системы.[15]

Предлагаемая эвристика положена в основу следующего алгоритма:

а) Осуществляется некоторая (произвольная) нумерация узлов, так что каждому  $I$  узлов приписывается некоторое натуральное число  $i'$ ,  $i' = \overline{1, I}$ . (это есть множество  $M_i$ ). Формируется матрица интенсивностей взаимодействия узлов  $\lambda = \{\lambda_{ij}\}, I \times I$

б) Вводится переменная  $i$  определяющая номер очередного узла. Начальное значение  $i=1$

в) Формируется текущее множество узлов  $M_i$ . Начальное значение  $M_i$  есть  $i$ .

г) Определяется значение переменной  $j$ , для которой  $\lambda_{ij}$  – максимально:  $\max_j \lambda_{ij}$ .

Если  $\max_j \lambda_{ij} = 0$  то осуществляется переход к п. (з).

В противном случае – к п. (д).

д) Проверяется наличие вхождения  $j \in M_i$ . Если вхождение имеется, то  $j$  временно исключается из рассмотрения и снова выполняется п. (г). В противном случае – переход к п. (е)

е) Осуществляется проверка ограничений на возможность включения  $j$  в  $M_i$ . При положительном результате – переход к п. (ж).

При отрицательном результате текущее  $j$  временно исключается из рассмотрения и происходит переход к п. (г).

ж) Узел  $j$  включается в множество  $M_i$ . Осуществляется присвоение  $i:=j$  и происходит переход к п. (г).

з) Сформированное множество  $M_i$  запоминается как очередное подмножество узлов, формирующих отдельную подсеть.

Эти узлы исключаются из множества  $M_i$ . Проверяется условие  $M_i$  – пусто. При выполнении условия- переход к п.(и).

В противном случае – к п. (а).

и) Алгоритм завершает свою работу. Вариант разбиения  $M_i$  на подмножества формирует структуру системы [5].

Блок схема алгоритма представлена на рис. 2.

Для того, что бы результаты работы алгоритма можно было применить на практике, необходимо ввести ограничения, обусловленные существующими в ОГК устоявшимися связями и организационной структурой. А так же исходя из принципов построения систем информационной поддержки [16], на автоматизированном рабочем месте должны быть реализованы работы, выполняемые в рамках одного бизнес процесса, поэтому необходимо добавить проверку очередного информационного объекта на принадлежность к одному бизнес процессу с уже добавленными в исходный узел объектами [17]. Ограничения, применяемые при работе с алгоритмом [18], так же включают в себя ограничение по загрузке.

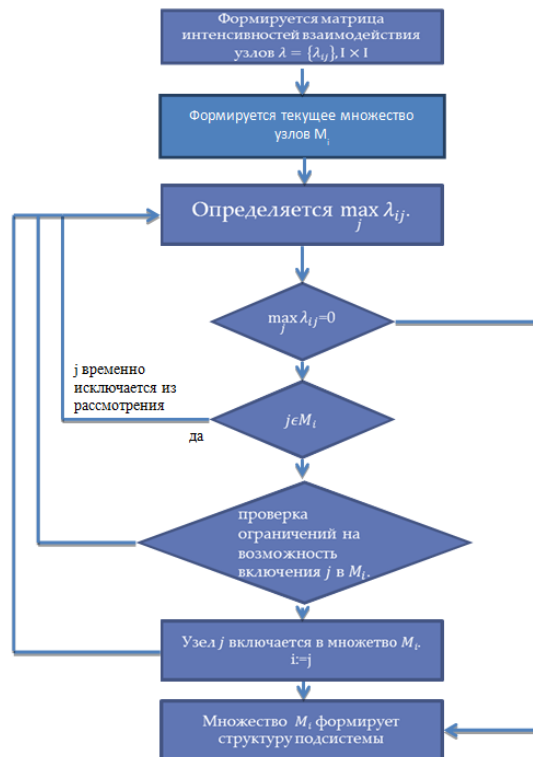


Рис. 2. Алгоритм численного решения математической модели разбиение СРОД на подсистемы

В результате работы алгоритма получаем такое распределение работ для реализации в рамках информационных узлов системы.

ИУ 1 – A1, A2, A3, A5, A6, A7;

ИУ 2 – A9;

ИУ 3 – A4, A8, A10, A11, A14;

ИУ 4 – A12, A13.

После распределения работ по исходным узлам произведем расчет общей загрузки исходных узлов [19] и определим необходимое количество автоматизированных рабочих мест для реализации работы системы без очередей в период пиковой нагрузки [20].

Общая загрузка информационных узлов:

ИУ 1 – 30,36;

ИУ 2 – 3,02;

ИУ 3 – 21,74;

ИУ 4 – 6,77.

Исходя из существующего ограничения по максимальной загрузке одного узла  $\rho_0 = 0,6$ , для функционирования системы без создания очередей в период пиковой нагрузки будет необходимо увеличить количество АРМ каждого из типов в соответствии с расчетами:  $N = \rho / \rho_0$ .

$N_1 = 30,36 / 0,6 = 51$ ;

$N_2 = 3,02 / 0,6 = 5$ ;

$N_3 = 21,74 / 0,6 = 36$ ;

$N_4 = 6,77 / 0,6 = 11$ .

Опираясь на данные, полученные в результате анализа, можем уменьшить количество рекомендованных к установке АРМ, для обеспечения работы при 80% от пиковой нагрузки. Таким образом, получим количество АРМ, рекомендованных к внедрению в ОГК, и исходя из распределенных по АРМ работ определим типы АРМ, предлагаемые к установке.

АРМ «Сопровождение в производстве» (ИУ 1) – 41;

АРМ «Информационная система каталогизации предметов снабжения (ИСКПС)», «Электронный формуляр» (ИУ 2) – 4;

АРМ «Разработка ЭД» (ИУ 3) – 29;

АРМ «Система учета договоров» (ИУ 4) – 9.

Графически полученный результат можно представить в следующем виде:

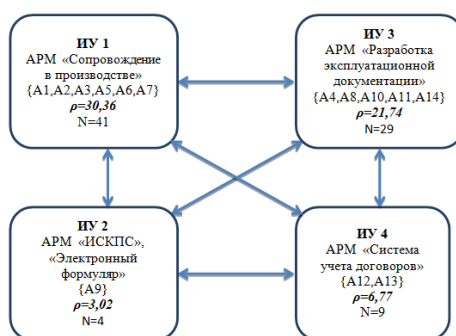


Рис. 3. Распределение информационных объектов по ИУ системы

Для оценки количества серверов определим интенсивность взаимодействия обрабатывающих узлов [18] с исходными узлами и между собой. Результаты представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

**Матрица интенсивностей взаимодействия исходных узлов (ИО) и обрабатывающих узлов (ОУ)**

№ АРМ	№ ОУ					
	1	2	3	4	5	6
1	135	125	-	-	-	37
2	-	50	50	10	-	5
3	14	23	10	10	14	-
4	-	-	5	-	17	-

Таблица 5

**Матрица интенсивностей взаимодействия обрабатывающих узлов (ОУ)**

№ ОУ	1	2	3	4	5	6
1	-	-	-	-	-	35
2	-	-	-	-	-	35
3	-	-	-	5	-	5
4	-	-	5	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	35	35	5	-	-	-

Исходя из полученных данных, произведем расчет загрузки серверов. Загрузка обрабатывающего узла определяется из интенсивности внешних запросов, интенсивности внутренних дозапросов и интенсивности корректировок данных. При этом необходимо учитывать объем передаваемых данных на сервер и из него [21].

$$p = \sum_i \lambda \sum_k a_{ik} (1 - x_{kj}) \tau_k + \sum_i \sum_j \lambda_{ij} \tau_i. \quad (1)$$

Результаты произведенного расчета представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Расчет загрузки обрабатывающих узлов.**

Номер узла	Количество запросов	Интенсивность запросов, $\lambda$	Загрузка, $p$
1	184	0,0064	0,032
2	233	0,008	0,4
3	75	0,0026	0,032
4	25	0,0009	0,011
5	31	0,0011	0,006
6	117	0,0039	0,098

**Выводы.** Представленный алгоритм позволяет распределить информационные запросы по автоматизированным рабочим местам. Данное распределение необходимо для предприятий при переходе на процессное управление в рамках цифровизации производства. Алгоритм учитывает бизнес-процессы, взаимосвязи ИО, интенсивность запросов и взаимодействие ИО друг с другом. В результате можно получить информацию по количеству и распределению обрабатывающих узлов, загрузке обрабатывающих узлов и загрузке серверов для построения системы распределенной обработки данных. Это упростит задачу определения необходимого количества ИО и серверов при внедрении в работу предприятия автоматизированных рабочих мест.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгих Э.А., Сарафанов А.В., Трезубов С.И. Основы применения CALS-технологий в электронном приборостроении: электрон. учеб. пособие. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 134 с.
2. Абдикеев Н.М., Данько Т.П., Ильдеменов С.В., Киселев А.Д. Реинжиниринг бизнес-процессов: учебник. – 2-е изд., испр. – М.: Эксмо, 2007. – 592 с.
3. Блинов А.О., Рудакова О.С., Захаров В.Я., Захаров И.В. Реинжиниринг бизнес-процессов. – М.: Юнити-Дана, 2010. – 344 с.
4. Елиферов, В.Г., Ретин В.В. Бизнес-процессы: Регламентация и управление. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 319 с.
5. Бальбердин В.А., Белевцев А.М., Степанов О.А. Оптимизация информационных процессов в автоматизированных системах с распределенной обработкой данных. – М.: Технология, 2002. – 279 с.
6. Шалумов А.С., Никишкин С.И., Носков В.Н. Введение в CALS-технологии: учеб. пособие. – Ковров: КГТА, 2002. – 137 с.
7. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф. Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения. Принципы, системы и технологии CALS/ИПИ: учеб. пособие. – М.: Академия, 2007. – 304 с. – ISBN 978-5-7695-3003-6.
8. Чернявский Д.И., Рудаков Д.В. Моделирование и реинжиниринг бизнес-процессов: учеб. пособие. – Омск: ОмГТУ, 2010. – 84 с.
9. Кондратьев В.В., Кузнецов М.Н. Показываем бизнес-процессы от модели процессов компании до регламентов процедур. – М.: Эксмо, 2008. – 256 с.
10. Громов А.И., Чеботарев В.Г., Горчаков Я.В., Бойко О.И. Учебно-методический комплекс «Анализ и моделирование бизнес-процессов»: учеб. пособие. – М., 2007. – 157 с.
11. Ретин В.В. Бизнес-процессы: моделирование, внедрение, управление. – М.: Инфра-М, 2004.
12. Ретин, В.В. Бизнес-процессы компании: построение, анализ, регламентация. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2007.
13. Ретин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004.
14. Тельнов Ю.Ф. Реинжиниринг бизнес-процессов: учеб. пособие. Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права. – М.: МЭСИ, 2004. – 116 с.
15. Черемных О.С., Черемных С.В. Стратегический корпоративный реинжиниринг: процессно-стоимостной подход к управлению бизнесом. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 736 с.
16. Щенников С.Ю. Реинжиниринг бизнес-процессов. Экспертное моделирование, управление, планирование и оценка. – М.: Ось-89, 2004. – 288 с.
17. Румянцев М.И. Средства имитационного моделирования бизнес-процессов // Корпоративные системы. – 2007. – № 2.
18. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий (CALS-технологии). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 284 с.
19. Колчин А.Ф., Овсянников М.В., Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В. Управление жизненным циклом продукции. – М.: Анахарсис, 2002. – 304 с.
20. Колчин А.Ф., Овсянников М.В. Применение информационных технологий ИПИ/CALS технологий для автоматизации инженерной деятельности // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 5 (11). – С. 5-56.
21. Ватулин Я.С., Подклетнов С.Г., Свитин В.В. и др. Автоматизированное проектирование в ИПИ-технологиях: учеб. пособие. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 126 с.

## REFERENCES

1. Dolgikh E.A., Sarafanov A.V., Tregubov S.I. Osnovy primeneniya CALS-tekhnologiy v elektronnom priborostroenii: elektron. ucheb. Posobie [Fundamentals of the use of CALS technologies in electronic instrumentation: electron. studies. Stipend]. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2008, 134 p.
2. Abdikeev N.M., Dan'ko T.P., Il'demenov S.V., Kiselev A.D. Reinzhiniring biznes-protsessov: uchebnik [Reengineering of business processes: textbook]. 2nd ed. Moscow: Eksmo, 2007, 592 p.

3. *Blinov A.O., Rudakova O.S., Zakharov V.Ya., Zakharov I.V.* Reinzhiniring biznes-protsessov [Reengineering of business processes]. Moscow: Yuniti-Dana, 2010, 344 p.
4. *Eliferov, V.G., Repin V.V.* Biznes-protsessy: Reglamentatsiya i upravlenie [Business processes: Regulation and management.]. Moscow: INFRA-M, 2004, 319 p.
5. *Balyberdin V.A., Belevtsev A.M., Stepanov O.A.* Optimizatsiya informatsionnykh protsessov v avtomatizirovannykh sistemakh s raspredelennoy obrabotkoy dannykh [Optimization of information processes in automated systems with distributed data processing]. Moscow: Tekhnologiya, 2002, 279 p.
6. *Shalumov A.S., Nikishkin S.I., Noskov V.N.* Vvedenie v CALS-tehnologii: ucheb. posobie [Introduction to CALS Technologies: a textbook]. Kovrov: KGTA, 2002, 137 p.
7. *Kovshov A.N., Nazarov Yu.F.* Informatsionnaya podderzhka zhiznennogo tsikla izdeliy mashinostroeniya. Printsipy, sistemy i tehnologii CALS/IPI: ucheb. posobie [Information support of the life cycle of mechanical engineering products. Principles, systems and technologies of CALS/IPI: textbook]. Moscow: Akademiya, 2007, 304 p. ISBN 978-5-7695-3003-6.
8. *Chernyavskiy D.I., Rudakov D.V.* Modelirovanie i reinzhiniring biznes-protsessov: ucheb. posobie [Modeling and reengineering of business processes: a textbook]. Omsk: OmGTU, 2010, 84 p.
9. *Kondrat'ev V.V., Kuznetsov M.N.* Pokazyvaem biznes-protsessy ot modeli protsessov kompanii do reglamentov protsedur [We show business processes from the company's process model to the rules of procedures]. Moscow: Eksmo, 2008, 256 p.
10. *Gromov A.I., Chebotarev V.G., Gorchakov Ya.V., Boyko O.I.* Uchebno-metodicheskiy kompleks «Analiz i modelirovanie biznes-protsessov»: ucheb. posobie [Educational and methodical complex "Analysis and modeling of business processes": textbook]. Moscow, 2007, 157 p.
11. *Repin V.V.* Biznes-protsessy: modelirovanie, vnedrenie, upravlenie [Business processes: modeling, implementation, management]. Moscow: Infra-M, 2004.
12. *Repin, V.V.* Biznes-protsessy kompanii: postroenie, analiz, reglamentatsiya [Business processes of the company: construction, analysis, regulation]. Moscow: RIA «Standarty i kachestvo», 2007.
13. *Repin V.V., Eliferov V.G.* Protsessnyy podkhod k upravleniyu. Modelirovanie biznes-protsessov [Process approach to management. Modeling of business processes]. Moscow: RIA «Standarty i kachestvo», 2004.
14. *Tel'nov Yu.F.* Reinzhiniring biznes-protsessov: ucheb. posobie [Business process Reengineering: a textbook]. Moscow International Institute of Econometrics, Informatics, Finance and Law. Moscow: MESI, 2004, 116 p.
15. *Cheremnykh O.S., Cheremnykh S.V.* Strategicheskiy korporativnyy reinzhiniring: protsessno-stoimostnyy podkhod k upravleniyu biznesom [Strategic corporate reengineering: a process-cost approach to business management]. Moscow: Finansy i statistika, 2005, 736 p.
16. *Shchennikov S.Yu.* Reinzhiniring biznes-protsessov. Ekspertnoe modelirovanie, upravlenie, planirovanie i otsenka [Business process reengineering. Expert modeling, management, planning and evaluation]. Moscow: Os'-89, 2004, 288 p.
17. *Rumyantsev M.I.* Sredstva imitatsionnogo modelirovaniya biznes- protsessov [Business process simulation tools], *Korporativnye sistemy* [Corporate systems], 2007, No. 2.
18. *Norenkov I.P., Kuz'mik P.K.* Informatsionnaya podderzhka naukoemkikh izdeliy (CALStehnologii) [Information support of high-tech products (CALStehnologies)]. Moscow: Izdvo MGTU im. N.E. Baumana, 2002, 284 p.
19. *Kolchin A.F., Ovsyannikov M.V., Strekalov A.F., Sumarokov S.V.* Upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii [Product lifecycle management]. Moscow: Anakharsis, 2002, 304 p.
20. *Kolchin A.F., Ovsyannikov M.V.* Primenenie informatsionnykh tekhnologiy IPI/CALS tekhnologiy dlya avtomatizatsii inzhenernoy deyatelnosti [Application of information technologies IPI/CALS technologies for automation of engineering activities], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2005, No. 5 (11), pp. 5-56.
21. *Vatulin Ya.S., Podkletnov S.G., Svitin V.V. i dr.* Avtomatizirovannoe proektirovanie v IPI-tehnologiyakh: ucheb. posobie [Computer-aided design in IPI technologies: study guide]. St. Petersburg: PGUPS, 2010, 126 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.М. Бородянский.

**Воронин Павел Александрович** – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: heyholyrampage@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79857048284; ассистент.

**Белевцев Андрей Михайлович** – e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

**Александрова Светлана Сергеевна** – e-mail: sweta.sergeeva@gmail.com; тел.: +79859907055; к.т.н.

**Voronin Pavel Aleksandrovich** – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: heyholyrampage@yandex.ru assistant; Moscow, Russia; phone: +79857048284; assistant.

**Belevtsev Andrey Michailovitch** – e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; phone: +79037691788; dr. of eng. of sc.; professor.

**Aleksandrova Svetlana Sergeevna** – e-mail: sweta.sergeeva@gmail.com; phone: +79859907055; cand. of eng. sc.

УДК 681.3.068:796.01

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-250-263

**В.В. Альчаков, В.А. Крамарь****ОЦЕНКА МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЕЗОННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ**

*Временные ряды с сезонной изменчивостью получили широкое распространение для описания процессов в различных областях, таких как торговля, анализ финансовых рынков, прогнозирование пассажирских авиаперевозок, описание климатических изменений. В последнее время широкое применение данный подход стал применяться и для описания технологических процессов. В связи с чем стало возможным применять прогнозирующие модели в системах управления сложными техническими объектами. Методы машинного обучения могут быть эффективно использованы для построения прогнозирующих моделей рядов такого типа. При этом для построения прогноза в качестве входных данных используются лишь исторические данные, накопленные за несколько периодов сезонных наблюдений, знание других параметров, как правило, не требуется. В статье рассмотрено построение прогнозирующей модели временного ряда с сезонной изменчивостью, описывающего технологический процесс, в качестве которого выбран входной поток завода по очистке сточных вод. Описана общая методология построения модели, требования к входным массивам данных, алгоритмы предварительной обработки для формирования выборок, используемых для обучения и тестирования моделей. Для построения прогнозирующей модели в работе использовались классические методы (SARIMA, Holt-Winters Exponential Smoothing, ETS), а также новые алгоритмы (Facebook Prophet, XGBoost, Long Short Term Memory). Реализация алгоритмов выполнена на языке Python, в работе даны рекомендации по использованию существующих библиотек и функций этого языка. Приводится сравнительный анализ точности полученных моделей на основе расчета набора статистических метрик. Также проведен анализ быстродействия методов, поскольку время, затраченное на создание модели и получение прогноза, играет немаловажную роль при запуске модели в реальных условиях на производстве. По совокупности оценок выбран лучший метод для решения поставленной задачи для применения в системах управления реального времени. В заключении даны рекомендации по повышению точности прогноза и обозначены направления будущих исследований в данной области.*

*Временные ряды с сезонной изменчивостью; машинное обучение; прогнозирующие модели; SARIMA; экспоненциальное сглаживание Хольта-Винтерса; Error Trend Seasonal (ETS); Facebook Prophet; XGBoost; Long Short-Term Memory (LSTM).*

V.V. Alchakov, V.A. Kramar

**THE MACHINE LEARNING TECHNIQUE FOR FORECASTING  
THE SEASONAL TIME SERIES**

*Time series with seasonal variability is widely used to describe processes in various fields, such as trade, analysis of financial markets, forecasting of passenger air transportation, and description of climatic changes. Recently, this approach has been widely used to describe technological processes as well. In this regard, applying predictive models in control systems of complex technical objects has become possible. Machine learning methods can be effectively used to build predictive models of series of this type. In this case, only historical data accumulated over several periods of seasonal observation is used as input data for constructing the forecast. Knowledge of other parameters, as a rule, is not required. The article considers creating a predictive time series model with seasonal variability, describing a technological process, the inlet flow of a wastewater treatment plant being chosen as a model. The general methodology of model building, requirements for the input data sets, and algorithms of preprocessing to form samples used for model training and testing are described. Classical methods (SARIMA, Holt-Winters Exponential Smoothing, ETS), as well as new algorithms (Facebook Prophet, XGBoost, Long Short Term Memory), were used to build the predictive model. The implementation of the algorithms is done in the Python language, and recommendations for the use of existing libraries and functions of this language are given in the work. The comparative analysis of the accuracy of the obtained models is given on the calculation of a set of statistical metrics. Analysis of methods performance is also carried out since the time it takes to create a model and get a forecast plays an important role when running the model in real production conditions. The best method for solving the set task for application in real-time control systems was chosen based on the sum of estimates. In conclusion, recommendations for improving forecast accuracy were given, and future research directions were outlined.*

*Seasonal time series; machine learning; forecasting; SARIMA; Holt-Winters exponential smoothing; Error Trend Seasonal (ETS); Facebook Prophet; XGBoost; Long Short-Term Memory (LSTM).*

**Введение.** В настоящее время анализ и прогнозирование временных рядов с сезонной изменчивостью чаще всего встречается в области финансовых рынков для получения моделей прогноза цен на товары и курса криптовалют и торговли [1–4]. В работах [5, 6] прогнозируется величина туристического потока в зависимости от времени года. В свою очередь туристические потоки оказывают влияние на изменение трафика пассажирских перевозок различными видами транспорта, что показано в работах [7, 8]. Также сезонным изменениям подвержены процессы, оказывающие влияние на климат [9, 10], экологию [11, 12] и медицину [13, 14]. Еще одно применение временные ряды с сезонной изменчивостью нашли в области промышленности и энерго- и ресурсопотребления [15–18].

Во всех перечисленных работах используется практически один и тот же набор методов и алгоритмов. Прежде всего это методы для получения авторегрессионных моделей ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) и SARIMA (Seasonal ARIMA), которые известны достаточно давно и математический аппарат которых хорошо проработан. Первое упоминание метода было сделано еще в 1970-х годах Джорджем Боксом и Гвиллимом Дженкинсом. Методы ARIMA/SARIMA позволяют получить основной класс моделей, которые используются для анализа и прогнозирования временных рядов. В экономических задачах широкое применение находят методы экспоненциального сглаживания Holt-Winters (Holt-Winters Exponential Smoothing), разработанный в 1950-х годах Чарльзом Хольтом, а также его современная модификация – Exponential Smoothing Algorithm (ETS). Помимо перечисленных методов, которые уже можно отнести к классическим, в последние годы появились новые алгоритмы и подходы, которые



также успешно справляются с задачей построения прогнозирующих моделей временных рядов с сезонной изменчивостью. Это методы Facebook Prophet [19], XGboost [20] а также набор методов Artificial Neural Network (ANN), в частности, метод Long Short-Term Memory (LSTM) [21].

В общем случае временной ряд представляет собой набор данных, упорядоченных во времени. Каждому элементу временного ряда ставится в соответствие уникальный индекс – Timestamp ( $TS$ ). Расстояние между индексами может составлять секунды, часы, дни, месяцы и даже годы. При этом значение временного интервала между соседними индексами, как правило, принимается одинаковым и обозначается  $T_s = TS[k] - TS[k - 1]$ . Например, изменение котировок на бирже может быть описано набором вещественных чисел  $Y[k]$  с интервалом  $T_s = 1$  минута, при этом котировки накапливаются в наборе данных от момента начала торгов на бирже, до ее закрытия. Т.е. рассматривается некоторая конечная выборка  $Y(t_k)$  на определенном промежутке времени  $t_k \in [t_0, t_0 + T_s, \dots, t_f]$ .

В общем виде, временной ряд может быть представлен функцией вида:

$$Y(t) = T(t) + S(t) + R(t), \quad (1)$$

где  $T(t)$  – компонент трендового цикла (Trend),  $S(t)$  – сезонный компонент (Seasonal),  $R(t)$  – остаток (Residuals).

Временные ряды, которые содержат сезонный компонент  $S(t)$ , обладают свойством периодичности. Т.е. характер изменчивости временного ряда повторяется время от времени. Примером может служить рост покупательской способности в праздничный сезон или рост пассажирских перевозок в сезон отпусков. Для такого типа временных рядов могут быть построены прогнозирующие модели, которые позволят вычислить оценку (прогноз) параметра на несколько шагов вперед, относительно текущего момента времени (горизонт прогноза). При этом для обучения модели, необходимо лишь знание истории изменения параметра, который описывается временным рядом, т.е. исторические данные на временном интервале, длина которого соответствует нескольким периодам сезонной изменчивости  $m$ . Знание других параметров, как правило, не требуется. Таким образом, возникает задача построения моделей, которые могут генерировать оценку некоторого наблюдаемого параметра с сезонной изменчивостью на требуемом горизонте прогноза, основываясь на информации о предыдущих и настоящих значениях этого параметра (historical data).

В данной статье представлены результаты применения всех перечисленных выше методов для построения модели, предназначенной для предсказания входного потока сточных вод завода очистных сооружений. Данная модель может быть использована для расчета оптимальной загрузки оборудования и обеспечения заданного качества очистки, что в свою очередь позволит значительно сократить потребление электрической энергии оборудованием завода. Описана методика подготовки данных, специфика применения каждого из методов, выполнен статистический анализ полученных результатов и даны рекомендации для повышения качества прогноза. Все численные расчеты и реализация алгоритмов выполнены с помощью языка Python и специализированных библиотек [22].

Методология. В работе использовались реальные данные, полученные от системы мониторинга роботизированного завода очистных сооружений. Датчики системы мониторинга осуществляют сбор основных параметров, таких как величина входного и выходного потока, концентрация кислорода, содержание аммиака и др. Численные значения, соответствующие текущим измерениям параметров, от датчиков поступают на OPC-сервер (Open Platform Communications – семейство программных технологий, предоставляющих единый интерфейс для управления

объектами автоматизации и технологическими процессами), после чего осуществляется их сохранение в базу данных. Регистрация данных осуществляется с частотой 1 раз в секунду в синхронном и асинхронном режимах. Система мониторинга работает в круглосуточном режиме, что позволяет получить данные для исследования и построения моделей за любой интересующий период времени в виде файла в csv-формате. Выбор формата экспортируемых данных обусловлен спецификацией используемых python-библиотек.

Информация от датчиков системы мониторинга хранятся в базе в так называемом «сыром виде» («raw data»). Это означает, что простая выгрузка интересующего параметра за определенный интервал времени не может быть использована как набор входных данных для обучения модели, требуется предварительная обработка и фильтрация. Формат данных, который должен быть использован в подавляющем числе методов может быть представлен в общем виде:

$$YYYY - MM - DD HH:MM:SS \quad VALUE,$$

где *YYYY* – четырехразрядный код года, *MM* – двухразрядный код текущего месяца, *DD* – двухразрядный код дня, *HH* – двухразрядный код часа, *MM* – двухразрядный код минут, *SS* – двухразрядный код секунд, *VALUE* – вещественное число, соответствующее величине параметра, полученное с помощью датчика.

Как было сказано выше, регистрация параметров осуществляется с частотой 1 раз в секунду. Поскольку ресурсы системы мониторинга являются ограниченными, в базу данных записываются данные, усредненные за 1 минуту, по каждому наблюдаемому параметру. Для задачи построения модели прогнозирования входного потока такая частота также является избыточной, поэтому сырые данные, полученные из базы данных, проходят процедуру предварительной обработки. Прежде всего, отбрасываются значения параметра, которые содержат явные выбросы и аномальные значения. На следующем этапе обработки производится усреднение данных за интервал времени, соответствующий 1 часу (data resampling). При проведении эксперимента, была сформирована выборка данных за 19 дней наблюдений, в которой каждый день был представлен набором из 24 значений наблюдаемого параметра. Набор данных, соответствующий первым 17 дням наблюдений, использовался в качестве массива обучающих данных, оставшиеся данные использовались для проверки качества моделей. Вся предварительная обработка выполнена с помощью библиотеки Pandas (Python Data Analysis Library) [24].

Ниже представлен пример таблицы итогового набора данных, полученного после завершения процедуры предобработки.

Таблица 1

**Таблица итогового набора данных**

Full dataset (457 rows)			
	YYYY-MM-DD	HH:MM:SS	Y
	timestamp		
0	2022-12-12	00:00:00	6.305967
1	2022-12-12	01:00:00	5.355895
2	2022-12-12	02:00:00	4.122726
...	...	...	...
456	2022-12-31	00:00:00	6.322228

На рис. 1 четко видна периодичность процесса, период повторения составляет 24 часа. Данные, находящиеся в зеленой зоне (Тест), использовались для тестирования качества модели, данные слева от зеленой зоны – для обучения модели. Задача формулируется следующим образом: по имеющемуся набору данных для обучения построить прогнозирующую модель и с помощью модели построить

прогноз входного потока завода на ближайшие 48 часов. Дальнейшие шаги сводятся к построению и проверке полученных моделей с помощью методов машинного обучения, о которых шла речь в начале статьи.



Рис. 1. Исходный набор данных с разбивкой на обучающую и тестовую выборки

В общем случае процесс разработки модели может быть представлен в виде технической дорожной карты, изображенной на рис. 2. Выделяется два уровня: уровень данных и уровень модели. Каждый уровень условно разбит на три шага. Уровень данных (шаги 1-3) реализует предварительную обработку и подготовку данных как это описано выше.

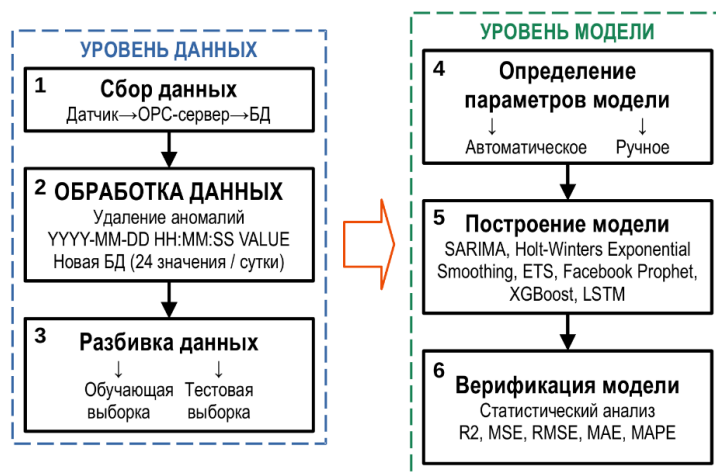


Рис. 2. Техническая дорожная карта построения прогнозирующей модели

Уровень модели подразумевает процедуру выбора параметров модели (шаг 4), который может быть реализован двумя способами: автоматически и вручную. Способ выбора зависит от возможности библиотеки, которая используется для построения модели. На следующем шаге (шаг 5) происходит построение модели, включающее задание параметров, определенных на предыдущем шаге и обучение модели на основе данных из обучающей выборки. В общем случае все действия с моделью на данном шаге можно назвать построением модели. На последнем шаге (шаг 6) происходит валидация модели. Под валидацией будем понимать процесс получения прогноза и сравнение оценок параметра с их истинными значениями.

Для оценки качества модели будет использован набор статистических метрик, описание которых будет приведено ниже. В случае, если метрики модели удовлетворяют заданным критериям, то модель сохраняется и может быть использована для построения прогноза. Если метрики не удовлетворяют заданным, необходимо вернуться на шаг 4 и выполнить все последующие шаги, находящиеся на уровне модели.

Далее будут изложены основные теоретические положения и особенности реализации каждого из перечисленных методов.

**Разработка модели SARIMA.** SARIMA – метод построения модели на основе использования сезонного авторегрессионного интегрированного значения скользящего среднего. SARIMA или Seasonal ARIMA, является расширением ARIMA метода, явно поддерживающим одномерные данные временных рядов с сезонным компонентом. В соответствии с [25] сезонная модель ARIMA включает авторегрессию и скользящее среднее с запаздыванием  $s$ . Сезонная модель ARIMA  $(p, d, q)(P, D, Q)_s$  может быть наиболее кратко выражена с использованием оператора обратного сдвига

$$\theta_p(B^s)\theta_p(B)(1 - B^s)^D(1 - B)^d x_i = \Phi_Q(B^s)\phi_q(B)\omega_t, \quad (1)$$

где  $\theta_p, \theta_p, \Phi_Q$  и  $\phi_q$  – полиномы порядков  $P, p, Q$  и  $q$  соответственно.

В общем случае модель является нестационарной, хотя, если  $D = d = 0$  и все корни характеристического уравнения (многочлены в левой части уравнения (2)) превышают единицу по модулю, результирующая модель будет быть стационарной.

Таким образом, перед использованием метода необходимо проверить исходный набор данных на стационарность. Сделать это можно с помощью Augmented Dickey–Fuller (ADF) теста. Этот тест основан на гипотезе, согласно которой, если значение параметра  $p$  меньше 0,05, то можно считать, что временной ряд является стационарным, а если значение  $p$  больше 0,05, то временной ряд является нестационарным.

Для выполнения ADF теста и реализации метода SARIMA была использована библиотека *statmodels* [26]. Результат ADF теста имеет вид:

```

1. ADF: -6.162488723252326
2. P-Value: 7.118446442706881e-08
3. Num Of Lags: 18
4. Num Of Observations Used For ADF Regression: 389
5. Critical Values:
1%: -3.447272819026727
5%: -2.868998737588248
10%: -2.5707433189709294
    
```

Таким образом, по результатам ADF теста исходный временной ряд является стационарным.

Подбор параметров  $(p, d, q)(P, D, Q)$  может быть выполнен в автоматическом режиме с помощью функции *auto\_arima* библиотеки *pmdarima* [27].

Процедура поиска оптимальной комбинации параметров занимает достаточно продолжительный промежуток времени, и это необходимо учитывать при использовании метода в системах реального времени.

При поиске параметров, есть возможность выводить лог операций, в соответствии с которым видно, что некоторые комбинации параметров в конце концов отбрасываются алгоритмом. Выбор оптимальной комбинации осуществляется по минимальному значению параметра AIC:

ARIMA (3, 0, 1) (0, 1, 2) [24] intercept: AIC=177.139, T=63.80 sec  
 ARIMA (3, 0, 3) (0, 1, 2) [24] intercept: AIC=181.003, T=78.64 sec  
 ARIMA (2, 0, 3) (0, 1, 2) [24] intercept: AIC=177.237, T=77.82 sec  
**ARIMA (3, 0, 2) (0, 1, 2) [24] : AIC=169.442, T=72.05 sec**  
 ARIMA (3, 0, 2) (0, 1, 1) [24] : AIC=185.525, T=8.53 sec  
 ARIMA (3, 0, 2) (1, 1, 2) [24] : AIC=inf, T=82.20 sec  
 ARIMA (3, 0, 2) (1, 1, 1) [24] : AIC=inf, T=9.30 sec

Результат работы функции имеет вид:

Best model: ARIMA (3, 0, 2) (0, 1, 2) [24]

где  $s = 24$  – период сезонного временного ряда в отсчетах.

После построения модели с учетом полученных оптимальных параметров, для построения прогноза достаточно воспользоваться методом *get\_forecast* объекта модели, передав в качестве параметра количество временных отсчетов, для которых необходимо получить предсказание. Поскольку интервал между отсчетами в исходном датасете равен одному часу, а прогноз составляется на 48 часов, то необходимо определить входной параметр  $steps = 48$ .

На рис. 3. представлен график временного ряда, полученный с помощью модели SARIMA (сплошная линия на графике) и истинные значения измерений из тестового набора данных (dark bullet marker).

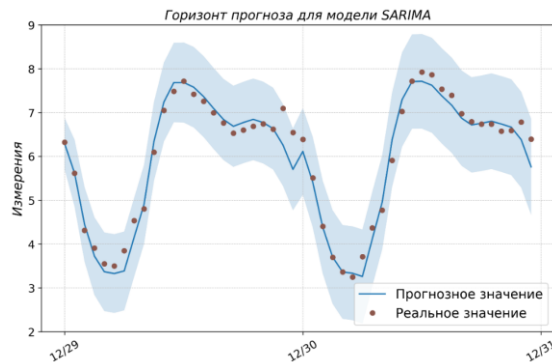


Рис. 3. Результат предсказания с помощью SARIMA модели и истинные значения из тестового набора данных

Количественная оценка качества этой и последующих прогнозирующих моделей будет дана в разделе анализа результатов.

**Разработка модели экспоненциального сглаживания Holt-Winters.** Модель *Holt-Winters* включает уравнение прогноза и три уравнения сглаживания – одно для уровня  $\ell_t$ , одно для тренда  $b_t$  и одно для сезонного компонента  $s_t$  с соответствующими параметрами сглаживания  $\alpha$ ,  $\beta^*$  и  $\gamma$ . Параметр  $m$  используется для обозначения периода сезонности [28]. Существует два варианта этого метода, отличающихся характером сезонной составляющей – аддитивный метод и мультипликативный метод.

Компонентная форма для аддитивного метода имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_{t+h|t} &= \ell_t + hb_t + s_{t+h-m(k+1)} \\
 \ell_t &= \alpha(y_t - s_{t-m}) + (1 - \alpha)(\ell_{t-1} + b_{t-1}) \\
 b_t &= \beta^*(\ell_t - \ell_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1} \\
 s_t &= \gamma(y_t - \ell_{t-1} - b_{t-1}) + (1 - \gamma)s_{t-m} .
 \end{aligned} \tag{3}$$

Компонентная форма для мультипликативного метода имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{t+h|t} &= (\ell_t + hb_t)s_{t+h-m(k+1)} \\ \ell_t &= \alpha \frac{y_t}{s_{t-m}} + (1 - \alpha)(\ell_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t &= \beta^*(\ell_t - \ell_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1} \\ s_t &= \gamma \frac{y_t}{\ell_{t-1} + b_{t-1}} + (1 - \gamma)s_{t-m}. \end{aligned} \quad (4)$$

В соотношениях (3) и (4)  $k$  это целая часть  $(h - 1)/m$ .  $\ell_t$  показывает средневзвешенное значение между сезонно скорректированным наблюдением  $(y_t - s_{t-m})$  и несезонным прогнозом  $(\ell_t - \ell_{t-1})$  для  $t$ . Уравнение тренда  $b_t$  идентично линейному методу Холта. Сезонное уравнение показывает средневзвешенное значение между текущим сезонным индексом  $(y_t - \ell_{t-1} - b_{t-1})$  и сезонным индексом того же сезона  $m$  периодов назад.  $s_t$  — это уравнение для сезонной составляющей.

Для создания прогнозирующей модели на основе метода экспоненциального сглаживания Holt-Winters, была использована функция *ExponentialSmoothing* библиотеки *statmodels* [26]. На вход функция принимает три параметра: набор данных для обучения, тип сезонной компоненты *add/mul*, и значение параметра  $m$  из уравнений (3) и (4) — значение периода сезонности выборки. Результат прогнозирования с помощью модели Holt-Winters представлен на рис. 4.

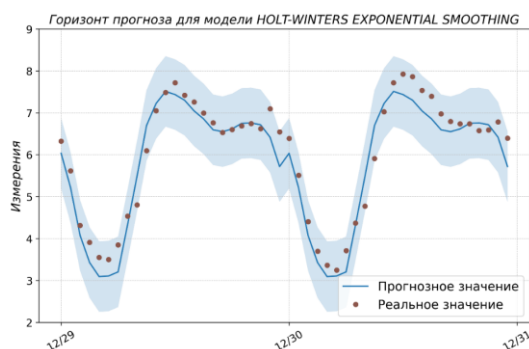


Рис. 4. Результат предсказания с помощью модели экспоненциального сглаживания Holt-Winters и истинных значений из тестового набора данных

**Разработка ETS модели.** Модель *ETS* представляют собой семейство моделей временных рядов с базовой моделью пространства состояний, состоящей из компонента уровня, компонента тренда (Т), сезонного компонента (S) и ошибки (E). Точечные прогнозы можно получить из моделей путем повторения уравнений для  $t = T + 1, \dots, T + h$  и установки всех  $\varepsilon_t = 0$  для  $t > T$ . Например, для модели ETS (M, A, N)  $y_{T+1} = (\ell_T + b_T)(1 + \varepsilon_{T+1})$ . Поэтому  $\hat{y}_{T+1|T} = \ell_T + b_T$ . Таким образом, можно записать:

$$\begin{aligned} y_{T+2} &= (\ell_{T+1} + b_{T+1})(1 + \varepsilon_{T+2}) = \\ &[(\ell_T + b_T)(1 + \alpha\varepsilon_{T+1}) + b_T + \beta(\ell_T + b_T)\varepsilon_{T+1}](1 + \varepsilon_{T+2}). \end{aligned} \quad (5)$$

Следовательно,  $\hat{y}_{T+2|T} = \ell_T + 2b_T$  и так далее. Эти прогнозы идентичны прогнозам линейного метода Холта, а также прогнозам модели ETS (A, A, N). Таким образом, точечные прогнозы, полученные с помощью метода и двух моделей, лежащих в основе метода, идентичны (при условии, что используются одни и те же значения параметров). Построенные таким образом точечные прогнозы ETS равны средним значениям прогнозных распределений, за исключением моделей с мультипликативной сезонностью [28].

Аналогично модели Holt-Winters, ETS модель может быть получена с помощью библиотеки *statmodels*. Функция *ETSModel* принимает в качестве входных параметров массив данных с отсчетами временного ряда, флаг, определяющий тип сезонной компоненты *add/mul* и значение периода сезонности (для рассматриваемого примера *seasonal\_periods = 24*). Для получения прогноза используется метод *get\_prediction* объекта модели, который получает в качестве входных параметров два значения *timestamp*, соответствующие начальному и конечному отсчету времени для желаемого горизонта прогноза. При использовании *pandas*, эти значения могут быть найдены как начальное и конечное значение индекса датафрейма, в котором храниться тестовая выборка временного ряда. Результат прогнозирования с помощью модели ETS представлен на рис. 5.

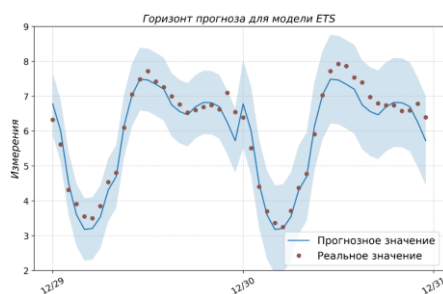


Рис. 5. Результат предсказания с помощью ETS модели и истинные значения из тестового набора данных

**Разработка модели Facebook Prophet.** Модель *Prophet* – это процедура прогнозирования данных временных рядов, основанная на модели аддитивной регрессии, в которой нелинейные тренды соответствуют годовой, еженедельной и ежедневной сезонности, а также праздничным эффектам. Процедура лучше всего работает с временными рядами, которые имеют сильные сезонные эффекты и несколько сезонов исторических данных. *Prophet* устойчив к отсутствующим данным и сдвигам в тренде и обычно хорошо обрабатывает выбросы [29].

Основные положения метода представлены в работе [19]. *Prophet* представляет собой open-source библиотеку, которая распространяется на языках R и Python. Подбор необходимых параметров модели полностью автоматизирован, поэтому для построения модели достаточно передать входной набор данных для обучения. Для создания модели используется функция *Prophet* библиотеки *prophet*. Прогнозные значения параметра могут быть найдены с помощью метода *predict* модели, на вход которого подается датафрейм из временных меток, соответствующих горизонту прогноза. Результат прогнозирования с помощью модели *Prophet* представлен на рис. 6.

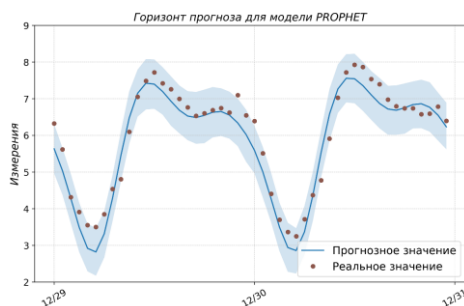


Рис. 6. Результат предсказания с помощью Prophet модели и истинные значения из тестового набора данных

**Разработка модели XGBoost.** Модель *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) – это оптимизированная распределенная гибкая и портативная библиотека повышения градиента. Библиотека реализует алгоритмы машинного обучения в рамках фреймворка Gradient Boosting. XGBoost предоставляет оптимизированный алгоритм параллельного бустинга, также известный как Parallel Gradient Boosting Decision Trees (GBDT), который позволяет получить быстрое и точное решение большого количества задач, которые возникают в области науки о данных. Один и тот же код работает в основных распределенных средах (Hadoop, SGE, MPI) и может решать большое количество проблем различного характера [30].

Основные положения метода представлены в работе [20]. Модель создается с помощью функции *XGBRegressor* библиотеки *xgboost*. Функция содержит достаточно большое количество параметров, с полным списком можно ознакомиться в разделе документации к библиотеке [31]. При построении модели использовался следующий набор параметров:

- ◆  $\text{max\_depth} = 6$  – максимальная глубина дерева решений;
- ◆  $\text{learning\_rate} = 0,05$  – повышение скорости обучения;
- ◆  $\text{n\_estimators} = 5000$  – количество деревьев;
- ◆  $\text{gamma} = 0,1$  – параметр алгоритма;

Результат прогнозирования с помощью модели XGBoost представлен на рис. 7.

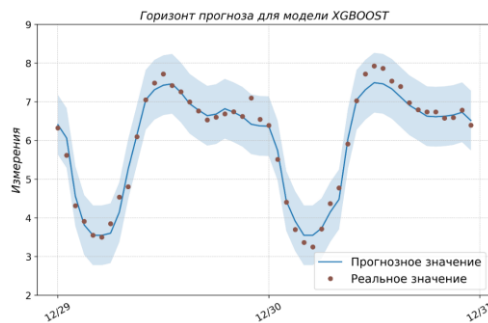


Рис. 7. Результат предсказания с помощью XGBoost модели и истинные значения из тестового набора данных

**Разработка модели LSTM.** Модель *Long Short-Term Memory* (LSTM) – это искусственная нейронная сеть, используемая в области искусственного интеллекта и глубокого обучения. В отличие от стандартных нейронных сетей с прямой связью, LSTM имеет обратные связи. Такая рекуррентная нейронная сеть может обрабатывать не только отдельные точки данных, но и целые последовательности данных. Эта характеристика делает сети LSTM идеальными для обработки и прогнозирования данных, включая временные ряды. Основные положения метода представлены в работе [21].

Для построения LSTM модели была использована библиотека *keras* и набор функций *Sequential*, *Dense*, *LSTM* которые использовались для задания структуры нейронной сети. Для сборки модели были выбраны следующие параметры:

- ◆  $\text{batch\_size} = 16$  – количество выборок на обновление градиента;
- ◆  $\text{epochs} = 200$  – количество эпох для обучения модели;
- ◆  $\text{units} = 32$  – размерность выходного пространства.

В результате применения библиотеки получена модель вида:



LSTM model summary  
Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm (LSTM)	(None, 32)	4352
dense (Dense)	(None, 1)	33

=====  
Total params: 4,385  
Trainable params: 4,385  
Non-trainable params: 0

Результат прогнозирования с помощью модели LSTM представлен на рис. 8.

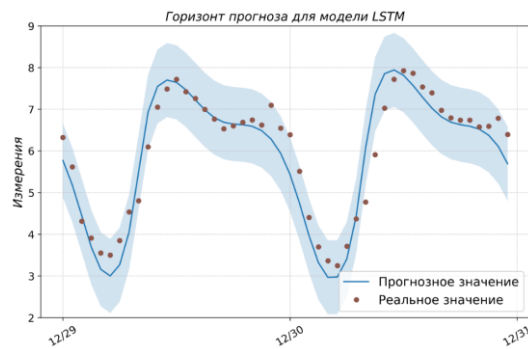


Рис. 8. Результат предсказания с помощью LSTM модели и истинные значения из тестового набора данных

**Результаты.** В этой работе для оценки производительности модели использовались пять статистических метрик: коэффициент корреляции (R2), среднеквадратическая ошибка (MSE), среднеквадратическая ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE) и средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE) [23]. Коэффициент корреляции (R2) использовался для определения степени соответствия прогнозируемых значений общим фактическим значениям. MSE – это среднее изменение фактических и прогнозируемых значений, а RMSE – это квадратный корень из MSE, тогда как MAE предлагается как среднее изменение между фактическими и прогнозируемыми значениями. По сравнению с MAE, RMSE придает большее значение дисперсии между выбросами данных. Эти показатели рассчитываются по следующим формулам

$$\begin{aligned}
 R^2 &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i|^2}{\sum_{i=1}^N \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i - y_i \right|^2}, \\
 MSE &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i|^2 \\
 RMSE &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i|^2}, \\
 MAE &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \\
 MAPE &= 100\% \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{|y_i|},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $y_i$  и  $\hat{y}_i$  – реальное и предсказанное значения, а параметр  $N$  представляет число элементов в выборке.

Для расчета метрик (6), использовались функции библиотеки *sklearn.metrics*. Кроме статистических метрик для каждой модели было рассчитано время, которое потребовался python-скрипту для построения модели и время, которое потребовалось для построения прогноза. Это связано с тем, что при работе с моделями в реальных условиях, когда прогноз модели используется для расчета управляющих сигналов или принятия управленческих решений, точность модели со временем может падать, поскольку условия функционирования объекта управления постоянно меняются. Например, происходит замена оборудования, изменяется количество потребителей, характер сезонности для небольших периодов времени меняется в течение года и др. Поэтому, для сохранения точности прогноза, необходимо переобучать модель время от времени. Это означает, что нужно вновь формировать обучающую и тестовую выборки, осуществлять подбор параметров и собирать новую модель. Если переобучение модели будет происходить раз в месяц, то этим вопросом можно пренебречь. Если переобучение будет происходить раз в сутки, при дискретности шага управления менее 10 секунд, то критерий времени становится существенным и играет такую же роль, как и точность, для выбора лучшей модели.

В табл. 2 представлены результаты расчета статистических метрик для оценки точности созданных моделей и затраты времени на создание модели и получение прогноза.

Таблица 2

## Статистический анализ и анализ затрат времени

Модель	Метрики					Время (сек.)	
	<i>R2</i>	<i>MSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>	<i>Training</i>	<i>Prediction</i>
SARIMA	0,961	0,076	0,276	0,198	0,035	369,717	0,008
Holt-Winters ES	0,921	0,156	0,396	0,324	0,059	0,058	0,002
ETS	0,945	0,109	0,329	0,254	0,043	0,353	0,004
Prophet	0,918	0,162	0,402	0,331	0,062	0,252	0,324
XGBoost	0,975	0,050	0,224	0,163	0,029	7,408	0,006
LSTM	0,962	0,076	0,275	0,212	0,040	86,738	0,469

Явными лидерами по точности являются три модели: SARIMA, LSTM, XGBoost. Однако, модели SARIMA и LSTM значительно проигрывают по времени, необходимому для создания новой модели, что вызвано работой автоматической процедуры поиска оптимальных значений параметров модели. Поэтому оптимальным выбором для решения поставленной задачи является выбор метода XGBoost, обеспечивающего максимальную точность и минимальное время (в группе лидеров) на обучение и получение прогнозного значения.

**Заключение.** В статье рассмотрены различные методы прогнозирования временных рядов с сезонной изменчивостью. Представлены классические и более новые подходы на базе алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей. На основании имеющихся в распоряжении реальных данных, для каждого из рассмотренных методов проведен тест точности прогноза с использованием статистических метрик. Также для выбора лучшего метода использовался критерий быстроты построения модели и получения прогноза, что обусловлено необходимостью переобучения модели время от времени. Лучшим методом по совокупности признаков оказался метод XGBoost. Тем не менее, оптимизация алгоритмов

поиска параметров моделей, может вывести в лидеры и другие алгоритмы, например LSTM. Также можно предположить, что на качество модели будет влиять и структура нейронной сети, которая задается перед обучением модели. Вопросам оптимизации процедуры обучения моделей и поиску оптимальных структур нейронных сетей и будут посвящены дальнейшие исследования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pongdatu G.A.N., Putra Y.H. Time Series Forecasting using SARIMA and Holt Winter's Exponential Smoothing, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, 407 012153.
2. Huang W., Li Y., Zhao Y., Zheng L. Time Series Analysis and Prediction on Bitcoin, *BCP Business & Management*, 2022, Vol. 34, pp. 1223-1234.
3. Kemalbay G., B. Korkmazoglu O. Sarima-arch versus genetic programming in stock price prediction, *Sigma J Eng Nat Sci.*, 2021, Vol. 39, No. 2, pp. 110-122.
4. Paliari I., Karanikola A., Kotsiantis S. A comparison of the optimized LSTM, XGBOOST and ARIMA in Time Series forecasting, *Proceedings of 12th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications, Chania Crete, Greece, 2021*.
5. Andreeski C., Mechkaroska D. Modelling, Forecasting and Testing Decisions for Seasonal Time Series in Tourism, *Acta Polytechnica Hungarica*, 2020, Vol. 17, No. 10, pp. 149-171.
6. Uğuz, Büyükgökoğlan E. A Hybrid CNN-LSTM Model for Traffic Accident Frequency Forecasting During the Tourist Season, *Technical Gazette*, 2022, Vol. 29, pp. 2083-2089.
7. Etuk E. A seasonal time series model for Nigerian monthly air traffic data, *IJRRAS*, 2013, 4 (3), pp. 596-602.
8. Feng T. Tianyu Z., Zheng Y., Jianxing Y. The comparative analysis of SARIMA, Facebook Prophet, and LSTM for road traffic injury prediction in Northeast China // *Frontiers in Public Health*. – July 2022, Vol. 10. DOI: 10.3389/fpubh.2022.946563.
9. Zhu X., Helmer E.H., Gwenz D., Collin M. Characterization of Dry-Season Phenology in Tropical Forests by Reconstructing Cloud-Free Landsat Time Series, *Remote Sens*, 2021, 13, 4736.
10. Figueiredo N., Blanco C. Water level forecasting and navigability conditions of the Tapajós River - Amazon – Brazil, *La Houille Blanche*, 2016. La Houille Blanche, Vol. 102 (3), pp. 53-64.
11. Shen J., Valagolam D., McCalla S. Prophet forecasting model: a machine learning approach to predict the concentration of air pollutants (PM2.5, PM10, O3, NO2, SO2, CO) in Seoul, South Korea, *PeerJ*, 2020, 8.
12. Hasnain A., Sheng Y., Hashmi M.Z. Time Series Analysis and Forecasting of Air Pollutants Based on Prophet Forecasting Model in Jiangsu Province, China Citation, *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10:945628.
13. Luo Z., Jia X., Bao J. A Combined Model of SARIMA and Prophet Models in Forecasting AIDS Incidence in Henan Province, China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19, 5910.
14. Pandit A., Khan D. Z., Hanrahan J. G. Historical and future trends in emergency pituitary referrals: a machine learning analysis, *Pituitary*, 2022, 25 (6), pp. 927-937.
15. Benkachcha S., Benhra J., El Hassani H. Seasonal Time Series Forecasting Models based on Artificial Neural Network, *International Journal of Computer Applications*, 2015, Vol. 116, No. 20, pp. 9-14.
16. Palmroos C., Gieseler J., Morosan N. Solar energetic particle time series analysis with Python, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, 9:1073578.
17. Wan X., Zou Y., Wang J., Wang W. Prediction of shale oil production based on Prophet algorithm, *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, Vol. No. 1.
18. El-Rawy M., Abd-Ellah M.K., Fathi H., Abdella Ahmed A. K. Forecasting effluent and performance of wastewater treatment plant using different machine learning techniques, *Journal of Water Process Engineering*, 2021, Vol. 44.
19. Taylor S., Letham B. Forecasting at scale, *The American statistician*, 2017, Vol. 72, No. 1, pp.37-45.
20. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System, *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference, San Francisco California*, 2016.
21. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-term Memory, *Neural computation*, 1997, Vol. 9, pp. 1735-80.

22. *Zemkoho A.* A Basic Time Series Forecasting Course with Python, *Oper. Res. Forum.*, 2023, 4:2.
23. *Plevris V., Solorzano G., Bakas N., Ben Seghier M.* Investigation of performance metrics in regression analysis and machine learning-based prediction models, *Proceedings of the 8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering Oslo, Norway, 2022.*
24. Pandas - Python Data Analysis Library. Available at: <https://pandas.pydata.org>.
25. *Cowpertwait P.S.P., Metcalfe A. V.* Introductory Time Series with R. Springer, London, 2009.
26. Introduction – statmodels. Available at: <https://www.statsmodels.org/stable/index.html/>.
27. Pmdarima: ARIMA estimators for Python. Available at: <https://alkaline-ml.com>.
28. *Hyndman R.J., Athanasopoulos G.* Forecasting: Principles and Practice, Otexts, Monash University, Australia, 2021.
29. Prophet | Forecasting at scale. Available at: <https://facebook.github.io/prophet/>.
30. XGBoost. Available at: <https://xgboost.ai/about>.
31. Python API Reference – xgboost documentation. Available at: [xgboost.readthedocs.io](https://xgboost.readthedocs.io).

Статью рекомендовала к опубликованию к.ф.-м.н. Н.М. Твердохлеб.

**Альчаков Василий Викторович** – Севастопольский государственный университет; e-mail: [alchakov@mail.ru](mailto:alchakov@mail.ru); г. Севастополь, Россия; тел.: +79787489941; к.т.н.; доцент кафедры «Информатика и управление в технических системах».

**Крамарь Вадим Александрович** – e-mail: [kramarv@mail.ru](mailto:kramarv@mail.ru); тел.: +79787927340; д.т.н.; профессор кафедры «Информатика и управление в технических системах».

**Alchakov Vasily Viktorovich** – Sevastopol State University; e-mail: [alchakov@mail.ru](mailto:alchakov@mail.ru); Sevastopol, Russia; phone: +79787489941; cand. of eng. sc.; associate professor of the department «Informatics and Control in Technical Systems».

**Kramar Vadim Aleksandrovich** – e-mail: [kramarv@mail.ru](mailto:kramarv@mail.ru); phone: +79787927340; dr. of eng. sc.; associate professor of the department «Informatics and Control in Technical Systems».

УДК 004.81

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-263-273

**А.Д. Ульев, Ю.А. Орлова, В.Л. Розалиев, А.Р. Донская**

### **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ СОТРУДНИКОВ И ПОКУПАТЕЛЕЙ ПО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЮ\***

*Из-за стремительного развития сферы торговли особую популярность набирают средства автоматического контроля работы сотрудников, оказывающих услуги клиентам. На данный момент существует множество современных подходов, методов и алгоритмов для автоматического отслеживания покупателей и продавцов в помещении магазина. Современные компании стараются решить подобную проблему разными путями: подсчетом посетителей, приборами контроля, различными нейросетевыми решениями и так далее. Проведя обзор решений с необходимым функционалом, были выявлены основные недостатки, такие как, например, дороговизна, неудобство в использовании и так далее. В результате авторами была поставлена цель: повысить качество отслеживания перемещения сотрудников/покупателей за счет разработанных автоматизированных средств и методов контроля перемещения, межкамерного трекинга и идентификации личности. В статье рассмотрен метод для автоматического распознавания и слежения за сотрудниками магазинов и фирм. Метод основан на каскаде нейросетей и алгоритмов, позволяющих распознавать покупателей и работников в униформе, а также оценивать качество работы сотрудников и удовлетворенность клиентов по голосу. Как результаты работы*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолГТУ в рамках научного проекта № 60/478-22.

*над исследованием в данной статье представлены модели и методы классификации клиентов и продавцов по униформе, методы определения уровня взаимодействия продавцов и клиентов на базе алгоритмов определения удовлетворенности посетителей и клиентов по голосу и лицу и алгоритмов определения качества работы сотрудников. Разработанные методы способны повысить эффективность работы сотрудников, а также увеличить качество предоставляемых услуг. По итогам работы было проведено тестирования было сделано заключение об удовлетворительности работы представленных методов и алгоритмов.*

*Нейронная сеть; искусственный интеллект; распознавание позы человека; мониторинг поведения.*

**A.D. Ulyev, Yu.A. Orlova, V.L. Rozaliev, A.R. Donskaia**

### **METHODS AND MEANS OF TRACKING THE MOVEMENT AND INTERACTION OF EMPLOYEES AND CUSTOMERS BY VIDEO IMAGE**

*Due to the rapid development of the sphere of trade, the means of automatic control of the work of employees providing services to customers are gaining particular popularity. At the moment, there are many modern approaches, methods and algorithms for automatically tracking buyers and sellers in the store. Modern companies are trying to solve this problem in different ways: counting visitors, monitoring devices, various neural network solutions, and so on. After reviewing the solutions with the necessary functionality, the main disadvantages were identified, such as, for example, high cost, inconvenience in use, and so on. As a result, the authors set a goal: to improve the quality of tracking the movement of employees / customers through the development of automated means and methods of movement control, inter-chamber tracking and identification of the individual. The article describes a method for automatic recognition and tracking of employees of stores and firms. The method is based on a cascade of neural networks and algorithms that allow recognizing customers and employees in uniform, as well as evaluating the quality of employees' work and customer satisfaction by voice. As the results of the research, this article presents models and methods for classifying customers and sellers by uniform, methods for determining the level of interaction between sellers and customers based on algorithms for determining the satisfaction of visitors and customers by voice and face, and algorithms for determining the quality of employees' work. The developed methods can improve the efficiency of employees, as well as increase the quality of services provided. Based on the results of the work, testing was carried out and a conclusion was made about the satisfactory performance of the presented methods and algorithms.*

*Neural network; artificial intelligence; human posture recognition; behavior monitoring.*

**Введение.** В стремительно развивающейся торговой сфере уровень клиенто-ориентированности бизнеса, высокий уровень указания услуг является одним из важнейших факторов, влияющий на потребительский спрос. В виду чего особую популярностью набираю средства автоматического контроля работы сотрудников, оказывающих услуги клиентам. Основной проблемой внедрения таких сервисов является человеческий фактор, контроль за которым проблематичен в связи с отсутствием готовых программных продуктов. Обеспечение должного качества оказания услуг становится основной задачей рыночной стратегии развития бизнеса [1, 2].

На данный момент существует множество современных подходов, методов и алгоритмов для автоматического отслеживания покупателей и продавцов в помещении магазина: методы отслеживания с применением GPS трекера, методы отслеживания с применением Bluetooth трекера, методы компьютерного зрения для подсчета количества посетителей на видеопотоке, подходы, применяемые в программных продуктах ShopperTrak, Network Optix, IIS видео аналитика, SVC. Однако Bluetooth и GPS трекеры - экономически затратны, такое решение не универсальное и не позволяет определить случаи мошенничества со стороны сотрудников магазина. ShopperTrak – не может отслеживать действий покупателя и продавца внутри магазина. Для Network Optix основным минусом является отсутствие

идентификации личности людей в кадре, как следствие, невозможность автоматического отличия покупателя от продавца и отсутствие функционала для определения уровня их взаимодействия. В решении компании CVC модули по контролю работы сотрудника и определения удовлетворенности клиента в решении не представлены.

Наибольшую оценку имеет система Network Optix. Однако эта система не умеет следить за покупателями и продавцами внутри магазина. И, как следствие, не умеет обрабатывать информацию о активности сотрудников и покупателей, такую как: время взаимодействия покупателя и продавца, уровень заинтересованности покупателя и другие.

Следовательно, на данный момент не существует единого программного средства и подходов, способных осуществить контроль за перемещением сотрудников/покупателей в магазине, идентификацию их личности с модулем межкамерного трекинга, а также алгоритмами, способными определить уровень оказания услуг продавцом и их покупательской удовлетворенностью.

Научная новизна подобного исследования достигается за счет разработанных оригинальных методов и средств распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению, методов оценки удовлетворенности клиента и методов оценки качества работы сотрудника.

Авторы поставили цель: повысить качество отслеживания перемещения сотрудников/покупателей за счет разработанных автоматизированных средств и методов контроля перемещения, межкамерного трекинга и идентификации личности.

**1. Метод слежения за перемещением и взаимодействием сотрудников и покупателей.** После проведения сравнительного анализа алгоритмов распознавания людей на изображении таких алгоритмов как: Yolo, PoseEstimator, Каскады хаара, ROS People Object Detection, People Counter Application with Intel-OpenVINO-Toolkit. [3, 4]. Было выявлено, что наибольшую оценку имеет PoseEstimator [5, 6], в связи с чем принято решение для задачи распознавания людей на изображении использовать указанный подход.

Метод состоит из группы нейросетевых решений, методов и алгоритмов для решения поставленной задачи (рис. 1).

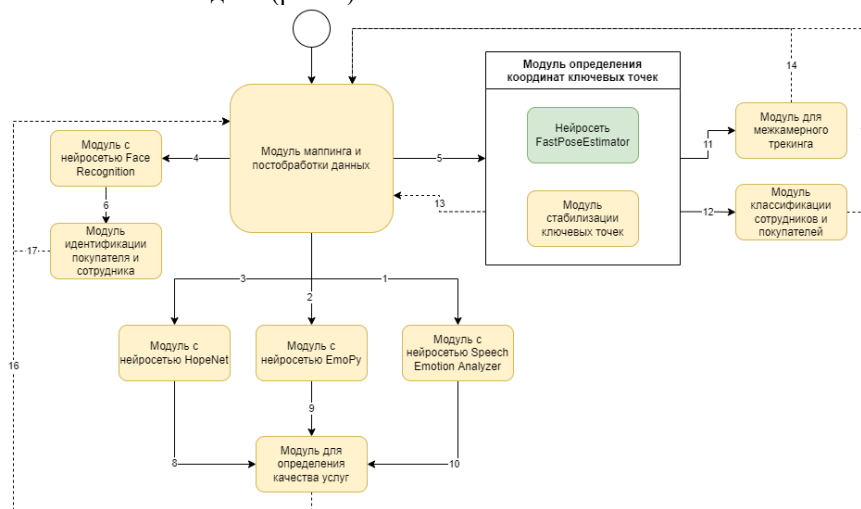


Рис. 1. Метод слежения за перемещением и взаимодействием сотрудников и покупателей

Первым этапом комплексного метода является модуль маппинга и постобработки данных для получения необходимых данных путем параллельного вызова соответствующих модулей. После получения данных происходит их маппинг и расчёт. Модуль является фундаментальным в работе комплексного метода.

Вторым этапом в параллельном режиме вызываются модуль с нейросетью Speech Emotion Analyzer, [7] модуль с нейросетью EmoPy, модуль с нейросетью HopeNet, модуль с нейросетью FaceRecognition[8] и модуль для определения ключевых точек (1, 2, 3, 4 и 5 соответственно).

Третьим этапом в потоке работы модуля FaceRecognition [9] вызывается модуль идентификации покупателя и сотрудника. После чего данные отдаются основному потоку в модуль маппинга и постобработка данных.

Четвертым этапом в потоках 1, 2 и 3 работы с данными переходит в модуль определения качества услуг. Работа модуля осуществляется без ожидания данных от всех потоков, работа начинается с приходов первого скопа данных. При получении каждого нового скопа данных о качестве услугах добавляются/обновляются. Модули с нейронными сетями HopeNet, EmoPy и Speech Emotion Analyzer используется для получения данных о качестве оказываемых услуг. Вышеуказанные модули собирают информацию для передачи в модуль определения оказания услуг с целью определения качества работы сотрудника магазина и удовлетворенность ей покупателем. Модуль с нейронной сетью HopeNet определяет направления взгляда покупателя, после чего передает данные в модуль постобработки данных [2, 10]. Модуль с нейронной сетью EmoPy используется для определения эмоциональной характеристики клиента путем анализа изображения его лица (изображение получено с камеры высокого качества, установленной на выходе из магазина). Модуль с нейронной сетью Speech Emotion Analyzer используется для определения эмоциональной характеристики клиента путем анализа потокового аудиофайла с его голосом (через микрофон, установленный в кассе).

Пятым этапом в потоке модуля определения координат ключевых точек производится работы с определением координат ключевых точек (скрепления костей, а также координаты глаз и ушей) у людей на изображении с камеры наблюдения. После чего данные передаются во внутренний метод для стабилизации ключевых точек с целью определения недостающих точек на основе физиологического строения человека.

Шестым этапом в параллельном режиме в потоке модуля определения координат данные передаются в модуль межкамерного трекинга и модуль классификации сотрудников и покупателей.

**Алгоритм стабилизации «ключевых» точек туловища человека.** Основная задача нейронной сети на данном этапе – распознать позу сотрудника, для последующего нахождения на нем униформы. [11].

Разработанный алгоритм "Оценки позы" на вход принимает изображение человека (продавца, консультанта, и т.д.) магазина, а на выходе после обработки - изображение с распознанной позой человека на нем. Более подробно данный алгоритм описан предыдущем исследовании [1].

Алгоритм нахождения возможного расположения недостающей точки плеча представлен на рис. 2.

На основании разработанного алгоритма возможно определение точек тела консультанта, а именно таза и плечей, которые могут отсутствовать по тем или иным причинам. Поиск таких точек производится за счет понимания анатомии человеческого тела и приведённого выше алгоритма на рис. 2.

В случае, когда есть только одна точка (начальная), и определение позы затрудняется, в таком случае выделяют небольшую область заранее определенного размера на верхней части тела сотрудника, для этого от начальной точки отступают на N количество пикселей вниз.

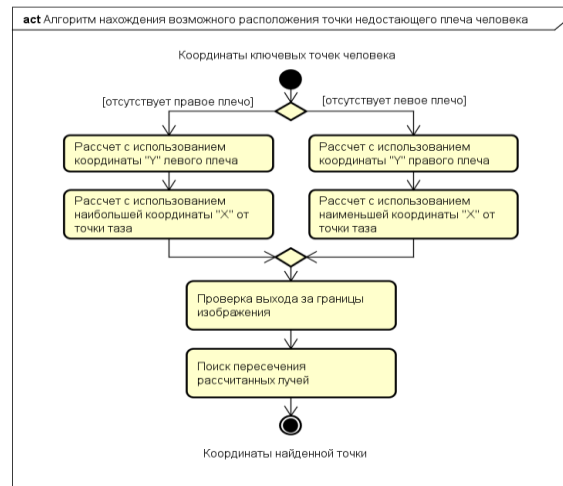


Рис. 2. Алгоритм нахождения возможного расположения точки недостающего плеча человека

**Алгоритм определение доминантного цвета на участке униформы.** Разработан модуль классификации сотрудников и клиентов, основной задачей которого является отнесение человека с изображения к необходимой группе. Нейронная сеть "Fast Pose Estimator" передает в модуль данные о координатах частей человеческого тела в кадре [12–14]. Модуль использует приведенные выше данные для определения области на изображении, отвечающей за сегменты одежды на теле человека. Для вычисления доминирующего цвета в найденной области предлагается использовать метод k-средних [10, 13, 15].

Общий алгоритм обучения программы возможным цветам униформы сотрудника представлен на рис. 3.

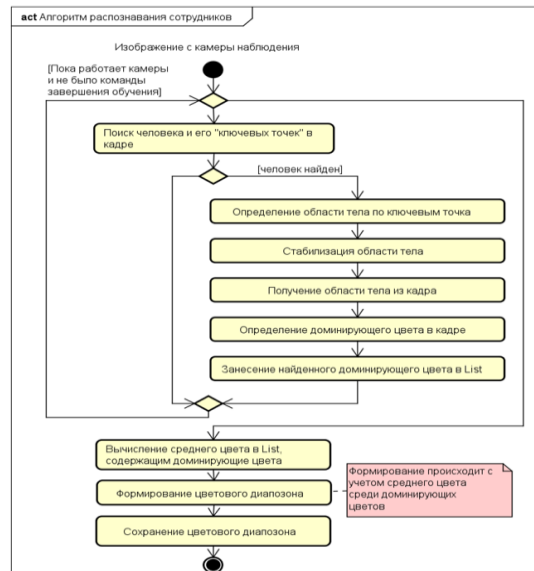


Рис. 3. Общий алгоритм обучения программы возможным цветам униформы сотрудника



**Анализ качества общения продавца с покупателями.** После отнесения людей в кадре к группам покупателей и продавцов программа в автоматическом режиме контролирует качество оказываемых продавцами-консультантами услуг.

Для оценки качества коммуникации продавца [16] с клиентом предлагается использовать набор алгоритмов и каскад нейронных сетей.

Основной задачей алгоритмов является определение нахождения продавца рядом с покупателем, а также контроль за персонализацией обращения сотрудника к покупателю [17].

Алгоритм качества работы сотрудника магазина предполагает собой контроль работы сотрудника путем анализа местонахождения сотрудника рядом с посетителем. В случае нахождения сотрудника рядом с клиентом (расстояние задается администратором) начинается подсчет времени такого взаимодействия. Кроме того, контроль будет устанавливаться с помощью вспомогательных нейросетевых решения для вычисления зрительного контакта при условии близкого нахождения сотрудника и посетителя. Решение позволяет определить градус между направлениями взглядов сотрудника и клиента, и если этот градус находится в пределах от 120 до 200 градусов (значения выставляются администратором) то считает что сотрудник успешно выполняет свою работу. Выходной информацией является рекомендательная оценка работы сотрудника магазина (1).

$$\zeta = F_{qual}(< \tilde{\omega}_j(t); \eta_i(t); t; \gamma >), \quad (1)$$

где  $\zeta$  – рекомендательная оценка работы сотрудника магазина по взаимодействию с клиентом;

$\tilde{\omega}_j(t)$  – стабилизированные ключевые точки человека;

$\eta$  – изображение с камеры;

$t$  – время работы

$\tilde{\omega}_j(t)$  – стабилизированные ключевые точки в разрезе времени

$\eta(t)$  – изображения с камеры в разрезе времени

$i$  – информация о межкамерном трекинге;

$\gamma$  – классификация сотрудников и клиентов;

$F_{qual}$  – алгоритм определения качества работы сотрудника магазина

Алгоритм определения удовлетворённости клиента по голосу подразумевает собой анализ аудиопотока голоса клиента в момент его нахождения на кассе с помощью нейросетевого решения. Кроме того, в решение закладывается консолидация данных с алгоритмов межкамерного трекинга для привязки оценки к текущему посетителю. Данные консолидируются с обработкой информации о ключевых точках. Если в текущий момент времени клиент стоит у кассы, то считается, что именно его запись голоса обрабатывает нейронная сеть. Выходной информацией является рекомендательная оценка работы сотрудника магазина (2).

$$\psi = F_{satvoic}(< \tilde{\omega}_j; \eta_i; \lambda; \gamma >), \quad (2)$$

где  $\psi$  – уровень удовлетворенности клиента по голосу;

$\tilde{\omega}_j$  – стабилизированные ключевые точки человека;

$\eta$  – изображение с камеры;

$\lambda$  – аудиопоток голоса клиента с кассы;

$i$  – информация о межкамерном трекинге;

$\gamma$  – классификация сотрудников и клиентов;

$F_{satvoic}$  – алгоритм определения удовлетворенности клиента по голосу.

В алгоритме определения удовлетворенности клиента по изображению лица происходит установления настроения покупателя путем анализа лица с камеры у выхода из помещения с использованием нейросетевого решения. Выходной информацией служит уровень удовлетворенности клиента по изображению лица (3).

$$k = F_{satisface}(< \mu; i; \gamma >), \quad (3)$$

где  $k$  – уровень удовлетворенности клиента по изображению лица:

$\mu$  – видеопоток с камеры, установленной при входе;

$\gamma$  – классификация сотрудников и клиентов;

$i$  – информация о межкамерном трекинге;

$F_{satisface}$  – алгоритм определения удовлетворенности клиента по изобр. лица.

Для того чтобы следить за качеством общения продавца с покупателем, необходимо проанализировать их расположение друг относительно друга и таким образом определить так называемую их "область обзора". Недопустимо, чтобы сотрудник находился вне этой области, таким образом он должен так или иначе располагаться в «области обзора» для более корректного обращения и лучшей возможности представить товар покупателю. Чтобы реализовать контроль за этим необходимо определять расположение глаз и ушей покупателя и сотрудника, данные о котором алгоритм получает от Fast Pose Estimator [18–20].

После этого становится возможным распознать "области обзора" клиента и сотрудника, а также получить данные об их расположении друг относительно друга. На основании этих данных можно сделать заключение о том, взаимодействует ли продавец с клиентом или нет («области обзора» или не пересекаются или «угол взаимодействия» ниже заранее заданного значения).

**2. Вычислительный эксперимент и анализ полученных результатов.** Была проведена апробация комплексного метода (табл. 1). В ходе тестирования анализировались качества работы ведущих модулей комплексного метода. На апробацию выносились следующие модули:

- ◆ Качество работы модуля классификации сотрудников и посетителей – 1/распознает в некоторых кадрах, 2/распознает в половине кадров, 3/распознает в большинстве кадров.

- ◆ Качество работы модуля идентификации личности сотрудника – 1/идентифицирует в некоторых кадрах, 2/идентифицирует в половине кадров, 3/идентифицирует в большинстве кадров.

- ◆ Качество работы модуля определения качества услуг – 1/определяет не верно, 2/определяет условно верно, 3/определяет неверно.

- ◆ Качество работы модуля стабилизации ключевых точек – 1/определяет не верно, 2/определяет условно верно, 3/определяет неверно.

- ◆ Качество работы модуля межкамерного и межкадрового трекинга – 1/определяет не верно, 2/определяет условно верно, 3/определяет неверно.

- ◆ Качество работы модуля классификации сотрудников и посетителей – 1/определяет не верно, 2/определяет условно верно, 3/определяет неверно.

Таблица 1

**Результаты вычислительного эксперимента**

Критерий	Среднее значение для всех тестов
Качество работы модуля классификации сотрудников и посетителей	2.7
Качество работы модуля идентификации личности	2.6
Качество работы модуля определения качества услуг	2.4
Качество работы модуля стабилизации ключевых точек	2.9
Качество работы модуля межкамерного и межкадрового трекинга	2.9
Качество работы модуля классификации сотрудников и посетителей	2.9

В результате тестирования были получены преимущественно высокие результаты работы. Исключения составляет модуль определения качества услуг ввиду наличия человеческого фактора в процессе оценки качества работы сотрудника учреждения. Отдельно стоит отметить, что в вышеуказанном модуле характеристика «уровень качества услуги» является субъективным фактором, ввиду чего оценка по указанной характеристике является рекомендательной, но не носит итоговый характер.

**Заключение.** Разработаны методы и средства для автоматического контроля за продавцом консультантом, способные определять уровень взаимодействия сотрудника с покупателем, а также уровень удовлетворенности покупателя работой сотрудника магазина.

В результате автоматизированного контроля работы сотрудника значительно повысилось качество его работы и удовлетворенность посетителей. Так, до начала использования автоматизированного решения средняя оценка работы сотрудника варьировалась от 4.1 до 4.3 по 5-ти бальной шкале. А уровень удовлетворенности посетителя такой работой составлял 3.7-4.1. Оценки производились путем анализа работ сотрудника и опроса посетителя. После внедрения автоматизированного решения оценка сотрудника возросла на 0.3 и составила 4.3-4.7, а удовлетворенность посетителя возросла на 0.5 и составила 4.2-4.6. Тестирование проводилось на выборке из 15 сотрудников трех заведений.

Ожидается дальнейшее развитие работы в области автоматического прогнозирования интересных товаров для конкретного покупателя (сейчас устанавливается администратором).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Розалиев В.Л., Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А., Ульев А.Д., Алексеев А.В. Автоматическая система контроля активности покупателей в магазине с модулями оценки работы его сотрудников // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 2 (50). – С. 22-32.
2. Ульянова О.А. Психологические особенности продавцов-консультантов сетевого маркетинга // Вестник Самарской гуманитарной академии. Серия: Психология. – 2013. – № 1. – С. 27-41.
3. Ghosh G., Swarnalatha K.S. A Detail Analysis and Implementation of Haar Cascade Classifier // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – P. 341-59.
4. Bharathi P., Spurthy B.L.D., Bhavani Priya A., Yashvardhan Krishna Murthy B., Charan Sai Varaha Teja Ch.. Real-Time Object Detection for Blind People // International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. – 2023. – P. 262-266.
5. Бобков А.С., Розалиев В.Л. Фазификация данных, описывающих движение человека // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2011): Матер. междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2011. – С. 483-486.
6. Розалиев В.Л., Орлова Ю.А. Определение движений и поз для идентификации эмоциональных реакций человека // 11-ая Международная конференция по распознаванию образов и анализу изображений: новые информационные технологии (PRIA-11-2013). – Самара, 2013. – № 2. – С. 713-716.
7. Samyak S., Gupta A., Raj T., Karnam A., Mamatha HR. Speech Emotion Analyzer // Innovative Data Communication Technologies and Application. – 2022. – P. 113-124.
8. Sharmila Sk., Nagasai GK., Sowmya M., Prasanna AS., Sri SN., Meghana N. Automatic Attendance System based on FaceRecognition using Machine Learning // 2023 7th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). – 2023.
9. Xia J., Zhang H., Wen S., Yang S., Xu M. An Efficient Multitask Neural Network for Face Alignment, Head Pose Estimation and Face Tracking // Expert Syst. – 2021. – Vol. 205. – P. 117368.
10. Хорунжий М.Д. Метод количественной оценки цветов различий при восприятии цифровых изображений // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2008. – № 1. – С. 9.

11. *Iqbal U., Gall J.* Multi-person Pose Estimation with Local Joint-to-Person Associations // European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops, Crowd Understanding. Amsterdam. – 2016.
12. *Самойлов А.Н., Сергеев Н.Е., Дайебал Д.Б., Кучерова М.С.* Модель интеллектуальной информационной системы для распознавания пользователей социальной сети с использованием биоинспирированных методов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4 (51). – С. 137.
13. *Ульев А.Д.* Система для определения удовлетворенности клиента магазина оказанными услугами // NovaUm.Ru. – 2022. – № 37. – С. 4-8.
14. *Nasr M., Osama R., Ayman H., Mosaad N., Ebrahim A.* Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation // Int. J. Advanced Networking and Applications. – 2020. – No. 11. – P. 4501-4508.
15. *Осипова Ю.А., Лавров Д.Н.* Применение кластерного анализа методом k-средних для классификации текстов научной направленности // МСиМ. – 2017. – №3 (43). – С. 14.
16. *Андропова Н.Е., Гребенюк П.Е., Чмутин А.М.* Алгоритм и программная реализация управления оттеночным контрастом цифровых изображений // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4 (43).
17. *Ульев А.Д., Розалиев В.Л., Орлова Ю.А., Алексеев А.В.* Автоматический контроль уровня оказания услуг продавцом-консультантом // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: Сб. статей по материалам Четвертой всероссийской научно-практической конференции, проводимой в рамках Пермского естественнонаучного форума «Математика и глобальные вызовы XXI века», Пермь, 21–23 мая 2019 года. Т. Ч. I. – Пермь, 2019. – С. 145-149.
18. *Cao Z., Simon T., Wei S., Sheikh Y.* Realtime Multi-person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 1302-1310.
19. *Park C., Lee H.S., Kim W.J., Bae H.B., Lee J., Lee S.* An Efficient Approach Using Knowledge Distillation Methods to Stabilize Performance in a Lightweight Top-Down Posture Estimation Network // Sensors. – 2021. – 21 (22). – P. 7640. – <https://doi.org/10.3390/s21227640>.
20. *Aonty S.S., Deb K., Sarma M. S., Dhar P.K., Shimamura T.* Multi-Person Pose Estimation Using Group-Based Convolutional Neural Network Model // in IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 42343-42360. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3271593.

#### REFERENCES

1. *Rozaliev V.L., Zaboleeva-Zotova A.V., Orlova Yu.A., Ul'ev A.D., Alekseev A.V.* Avtomaticheskaya sistema kontrolya aktivnosti pokupateley v magazine s modulyami otsenki raboty ego sotrudnikov [Automatic system for monitoring customer activity in a store with modules for evaluating the work of its employees], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High technologies], 2020, No. 2 (50), pp. 22-32.
2. *Ul'yanova O.A.* Psikhologicheskie osobennosti prodavtsov-konsul'tantov setevogo marketinga [Psychological features of sales consultants of network marketing], *Vestnik Samarskoy gumanitarnoy akademii. Seriya: Psikhologiya* [Bulletin of the Samara Humanitarian Academy. Series: Psychology], 2013, No. 1, pp. 27-41.
3. *Ghosh G., Swarnalatha K.S.* A Detail Analysis and Implementation of Haar Cascade Classifier, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, pp. 341-59.
4. *Bharathi P., Spurthy B.L.D., Bhavani Priya A., Yashvardhan Krishna Murthy B., Charan Sai Varaha Teja Ch.* Real-Time Object Detection for Blind People, *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2023, pp. 262-266.
5. *Bobkov A.S., Rozaliev V.L.* Fazifikatsiya dannykh, opisuyushchikh dvizhenie cheloveka [Fuzzification of data describing human movement], *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh sistem (OSTIS-2011): Mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Open semantic technologies for designing intelligent systems (OSTIS-2011): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 2011, pp. 483-486.
6. *Rozaliev V.L., Orlova Yu.A.* Opredelenie dvizheniy i poz dlya identifikatsii emotsional'nykh reaktsiy cheloveka [Determination of movements and poses to identify emotional reactions of a person], *11-aya Mezhdunarodnaya konferentsiya po raspoznavaniyu ob-razov i analizu izobrazheniy: novye informatsionnye tekhnologii (PRIA-11-2013)* [11th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-11-2013)]. Samara, 2013, No. 2, pp. 713-716.

7. Samyak S., Gupta A., Raj T., Karnam A., Mamatha HR. Speech Emotion Analyzer, *Innovative Data Communication Technologies and Application*, 2022, pp. 113-124.
8. Sharmila Sk., Nagasai GK., Sowmya M., Prasanna AS., Sri SN., Meghana N. Automatic Attendance System based on FaceRecognition using Machine Learning, *2023 7th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, 2023.
9. Xia J., Zhang H., Wen S., Yang S., Xu M. An Efficient Multitask Neural Network for Face Alignment, Head Pose Estimation and Face Tracking, *Expert Syst.*, 2021, Vol. 205, pp. 117368.
10. Khorunzhiy M.D. Metod kolichestvennoy otsenki tsvetov razlichiy pri vospriyatii tsifrovyykh izobrazheniy [A method for quantifying the colors of differences in the perception of digital images], *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the NSU. Series: Information Technology], 2008, No. 1, pp. 9.
11. Iqbal U., Gall J. Multi-person Pose Estimation with Local Joint-to-Person Associations, *European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops, Crowd Understanding. Amsterdam*, 2016.
12. Samoylov A.N., Sergeev N.E., Dayebal D.B., Kucherova M.S. Model' intellektual'noy informatsionnoy sistemy dlya raspoznavaniya pol'zovateley sotsial'noy seti s ispol'zovaniem bioinspirirovannykh metodov [A model of an intelligent information system for recognizing social network users using bioinspired methods], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don.], 2018, No. 4 (51), pp. 137.
13. Ul'ev A.D. Sistema dlya opredeleniya udovletvorennosti klienta magazina okazannymi uslugami [A system for determining the satisfaction of the store's customer with the services rendered], *NovaUm.Ru*, 2022, No. 37, pp. 4-8.
14. Nasr M., Osama R., Ayman H., Mosaad N., Ebrahim A. Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation, *Int. J. Advanced Networking and Applications*, 2020, No. 11, pp. 4501-4508.
15. Osipova Yu.A., Lavrov D.N. Primenenie klasternogo analiza metodom k-srednikh dlya klassifikatsii tekstov nauchnoy napravlenosti [Application of cluster analysis by the k-means method for classification of scientific texts], *MSiM* [MSiM], 2017, No. 3 (43), pp. 14.
16. Andronova N.E., Grebenyuk P.E., Chmutin A.M. Algoritm i programmaya realizatsiya upravleniya ottochnym kontrastom tsifrovyykh izobrazheniy [Algorithm and software implementation of the control of the hue contrast of digital images], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don.], 2016, No. 4 (43).
17. Ul'ev A.D., Rozaliev V.L., Orlova Yu.A., Alekseev A.V. Avtomaticheskii kontrol' urovnya okazaniya uslug prodavtsom-konsul'tantom [Automatic control of the level of services rendered by a sales consultant], *Iskusstvennyy intellekt v reshenii aktual'nykh sotsial'nykh i ekonomicheskikh problem XXI veka: Sb. statey po materialam Chetvertoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, provodimoy v ramkakh Permskogo estestvennonauchnogo foruma «Matematika i global'nye vyzovy XXI veka», Perm', 21–23 maya 2019 goda* [Artificial intelligence in solving urgent social and economic problems of the XXI century: A collection of articles based on the materials of the Fourth All-Russian Scientific and Practical Conference held within the framework of the Perm Natural Science Forum "Mathematics and Global Challenges of the XXI Century", Perm, May 21-23, 2019]. Vol. Part I. Perm', 2019, pp. 145-149.
18. Cao Z., Simon T., Wei S., Sheikh Y. Realtime Multi-person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields, *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 1302-1310.
19. Park C., Lee H.S., Kim W.J., Bae H.B., Lee J., Lee S. An Efficient Approach Using Knowledge Distillation Methods to Stabilize Performance in a Lightweight Top-Down Posture Estimation Network, *Sensors*, 2021, 21 (22), pp. 7640. Available at: <https://doi.org/10.3390/s21227640>.
20. Aonty S.S., Deb K., Sarma M. S., Dhar P.K., Shimamura T. Multi-Person Pose Estimation Using Group-Based Convolutional Neural Network Model, *in IEEE Access*, 2023, Vol. 11, pp. 42343-42360. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3271593.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

**Ульев Андрей Дмитриевич** – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: [ulyev-ad@yandex.ru](mailto:ulyev-ad@yandex.ru); г. Волгоград, Россия; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем, аспирант.

**Орлова Юлия Александровна** – e-mail: [yulia.orlova@gmail.com](mailto:yulia.orlova@gmail.com); кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; д.т.н.; доцент.

**Розалиев Владимир Леонидович** – e-mail: [vladimir.rozaliev@vstu.ru](mailto:vladimir.rozaliev@vstu.ru); кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; к.т.н.; доцент.

**Донская Анастасия Романовна** – e-mail: donsckaia.anastasiya@yandex.ru; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; аспирант.

**Ulyev Andrey Dmitrievich** – Volgograd State Technical University; e-mail: ulyev-ad@yandex.ru; Volgograd, Russia; the department software engineering; graduate student.

**Orlova Yulia Aleksandrovna** – e-mail: yulia.orlova@gmail.com; the department software engineering; dr. of eng. sc.; associate professor.

**Rozaliev Vladimir Leonidovich** – e-mail: vladimir.rozaliev@vstu.ru; the department software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Donsckaia Anastasia Romanovna** – e-mail: donsckaia.anastasiya@yandex.ru; the department software engineering; graduate student.

УДК 004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-273-280

**Х.Б. Штанчаев**

### **НЕСТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ИЗ ТЕКСТА**

*Автоматическое извлечение причинно-следственных связей (ПСС) из текстов естественного языка является сложной проблемой искусственного интеллекта. Большинство первых попыток ее решения подразумевали использование, построенных вручную лингвистических и синтаксических правил на небольших наборах данных. Однако с появлением больших данных, доступной вычислительной мощности и с большим скачком в области машинного обучения, концепция решения данной проблемы постепенно сдвинулась. В данной статье рассмотрена парадигма нестатистического подхода к извлечению причинно-следственных связей, ее основа, языковые конструкции, шаблоны и классификация ПСС. Целью стало исследование методов данной парадигмы, определение их недостатков, преимуществ и возможности их применения. В статье рассмотрены различные подходы, приведенные авторами достаточно известных и высоко цитируемых исследовательских работ и их влияние на успешность извлечения причинно-следственных связей. Анализ этих научных работ однозначно подтвердил, что задача извлечения ПСС является крайне сложной задачей обработки естественного языка. Наличие разнообразных лингвистических конструкций языка, двусмысленности различного рода, а также языковые особенности очень сильно влияют на точность извлечения ПСС. Почти все нестатистические методы столкнулись с проблемой узкоспециализированных областей знаний, где почти всегда требуется экспертное описание. Так же практически все нестатистические методы являются ручными или же полуавтоматическими, т. к. предполагают построение шаблонов для определения ПСС в тексте. Несмотря на то, что нестатистические методы с достаточной точностью (в среднем 70–80%) успешно справляются с рассматриваемой задачей, на сегодняшний день отсутствует универсальный метод для извлечения ПСС. Предполагаемый метод должен быть универсальным относительно языков, универсальным относительно предметных областей и с возможностью определения неявных ПСС.*

*Причинно-следственные связи; причинные знания; причинные отношения; обработка естественного языка; двусмысленность; компьютерная лингвистика.*

**Kh.B. Shtanchaev**

### **NON-STATISTICAL METHODS OF AUTOMATIC EXTRACTION OF CAUSAL RELATIONSHIPS FROM THE TEXT**

*Most of the first attempts to extraction of causal relationship were tied with complex and manual linguistic patterns, syntactic rules and small datasets based on domain. This article examines the paradigm of a non-statistical approach to the extraction of causal relationships, its basis, language constructs, patterns, and classification of causal relationships. The aim was to study the methods of this paradigm, to determine their disadvantages, advantages, and the possibility of their application.*

*The article discusses various approaches given by the authors of well-known and highly cited research papers and their impact on the success of the extraction of causal relationships. The analysis of these scientific papers has unequivocally confirmed that the task of extracting CR is an extremely difficult task of natural language processing. The presence of a variety of linguistic constructions of the language, ambiguities of various kinds, as well as language features greatly affect the accuracy of CR extraction. Almost all non-statistical methods have encountered the problem of highly specialized fields of knowledge, where expert description is almost always required. Also, almost all non-statistical methods are manual or semi-automatic, because assume the construction of templates for determining the CR in the text. Even though non-static methods with sufficient accuracy (on average 70-80%) successfully cope with the task under consideration, there is currently no universal method for extracting CR. The proposed method should be universal with respect to languages, universal with respect to subject areas and with the possibility of defining implicit CR.*

*Causal relationships; causal knowledge; natural language processing; ambiguity; implicit causal relationships; computational linguistics.*

**Введение.** Автоматическое извлечение знаний из текстов на сегодняшний день одна из многих открытых задач в искусственном интеллекте. Эффективно извлечь из текста выражения при постоянно развивающемся словарном запасе языка, не говоря уже о двусмысленных выражениях, метафорах, сарказме и даже неявных отрицаний достаточно непростая задача. Решение данной задачи позволит развить модели искусственного интеллекта до серьезных уровней имитации человеческого мозга. Тем не менее, ученые за последние два десятилетия добились значительных успехов в компьютерной лингвистике. Это позволило создать практически универсальные методы, базирующиеся на извлечении причинно-следственных или временных связей.

В последние годы автоматическое извлечение причинных связей (ПСС) становится все более важной прикладной задачей для таких систем ведения диалога, поиска информации, прогнозирования событий, вывод будущих решений или сценариев и обработки решений. Отношения такие, как например “часть – целое”<sup>1</sup>, “если – то”<sup>2</sup>, “причина – следствие”<sup>3</sup> позволяют представить важную информацию о том, как различные события и сущности должны восприниматься по отношению друг к другу. В частности, считается, что причинно-следственная связь играет очень важную роль в человеческом познании из-за ее способности влиять на принятие решений.

ПСС исследовались в различных областях наук. Каноническим определением ПСС является логическое выражение вида «А вызывает Б» или «А вызывается тем, что Б». Многие ученые в своих работах пытались провести классификацию ПСС, для упрощения дальнейших исследований. На сегодняшний день самой популярной является предложенной автором [1].

1. *Причинно-следственные отсылки* используются для связывания определений. Альтенберг классифицировал причинно-следственные отсылки на четыре типа [2]: 1) **наречные ссылки** (наречия), например: *так, следовательно, итак, поэтому* и т.д.<sup>4</sup> 2) **предложные ссылки**, например *из-за*.<sup>5</sup> 3) **подчинения** например: *потому что, с, как*.<sup>6</sup> и 4) **интегрированные ссылки** такие как: *результатом стал, вот почему, результатом был*.<sup>7</sup>

<sup>1</sup> В англ. язычной литературе part – whole.

<sup>2</sup> В англ. язычной литературе if – then.

<sup>3</sup> В англ. язычной литературе cause – effect.

<sup>4</sup> В английском языке so, hence, therefore.

<sup>5</sup> В английском языке because of или on account of.

<sup>6</sup> В английском языке because, as, since.

<sup>7</sup> В английском языке that’s why, the result was.

2. *Причинные глаголы* – это переходные глаголы или их формы, которые включают в себя причинный элемент. В качестве примера можно привести в принципе любые глаголы, например *ломать* или *купить*. Их переходные формы заключаются в том, чтобы заставлять *ломаться* и заставлять *покупать*.

3. *Результативные конструкции* – это предложения, в которых для описания состояния объекта используется глагол или глагольная форма. Например, «Я перенес данные с одного носителя на другой».

4. Условные обозначения “ЕСЛИ - ТО” часто указывают на то, что предшествующее вызывает последующее.

5. *Причинно-следственные наречия и прилагательные* имеют причинный характер в своих значениях, например, *фатальный* или *катастрофичный*, который может быть перефразирован как *причина смерти*.

Однако следует указать, что классификация подразумевает, что все исследуемые ПСС явные.

**Идея нестатистического подхода.** Фактически начало нестатистическим подходам положил в 1989 году Селфридж [3]. В своей статье он описывает основные трудности связанные с извлечением ПСС. Автор в своей статье указывает на необходимость понимания методом предметной области для высокой точности извлечения ПСС. Иначе можно упустить значимые ПСС.

В нескольких исследованиях конца 80-х и 90-х годов предпринимались попытки решить проблемы, выделенные Селфриджем. Одна из первых выдающихся работ, в которой была разработана, полнофункциональная автоматическая система выделения причинно-следственных связей из английских энциклопедических текстов была выполнена Капланом и Берри-Рогге в 1991 году [4]. В работе упоминаются фреймы, как основной вид представления знаний. И для работы системы необходимо предварительно подвергать текст семантическому анализу. После анализа система будет выстраивать фреймы ПСС. Сам же модуль извлечения ПСС осуществляет поиск ПСС с помощью 4 методов:

1) использование 20 закодированных вручную подсказок, обозначающих причинно-следственную связь, например «потому что», «из-за», «когда» («because», «due to» и «when»).

2) расширение явных причинно-следственных пар из 1 пункта до причинно-следственных цепочек. Для расширения инициализируется начальное причинно-следственное отношение  $X \rightarrow Y$ . Осуществляется поиск причинной пары  $A \rightarrow B$  такой, что  $B = X$  и причинной пары  $C \rightarrow D$  такой, что  $Y = C$ . Это приводит к цепочке  $A \rightarrow X \rightarrow Y \rightarrow D$ . Таким методом расширения ПСС можно выстроить цепочки большой длины.

3) Поиск пар ПСС, которые связаны как во времени, так и в пространстве; для поиска авторы используют модель, основанную на работе Дойла [5].

4) ручное построение ограничений для учета специфики предметной области.

У данного подхода имеются следующие ограничения:

- ◆ обширная ручная предварительная обработка, такая как кодировка текста по определенным шаблонам и построение подсказок для обнаружения явных и неявных причинно-следственных связей.

- ◆ вышеперечисленные шаги возможны если имеются экспертные знания.

- ◆ кроме того из пункта 3 неясно каким образом извлекаются понятия, связанные во времени и пространстве. Набор данных невелик и включает не более сотни пояснительных предложений.

Система, которую авторы назвали PROTEUS [6] стала аналогом. Система так же базировалась на делении анализа на две части: *синтаксический* и *семантический*. Обработка текста занимала большое количество времени из-за скудного на-



бора данных. Система так же зависела от предметной области. Авторы Контос и Сидиропулу [7] использовали лингвистические шаблоны для извлечения ПСС. Система работала в ручном режиме. Это предполагало, что шаблоны для текста определялись вручную исходя из предметной области. Работа Гарсии [8] является одной из серьезных работ того времени. Автором была разработана система извлечения ПСС для французского языка, учитывая некоторые его двусмысленности. Несмотря на то, что система осуществляла поиск заранее определенных шаблонов (порядка 23) точность извлечения ПСС достигла 85%. Так же отметим, что система была независимой от предметной области. Вслед за Гарсией большие исследования [1, 9, 10] по извлечению ПСС провел Ху. Почти все работы автора были направлены на выявление только явных ПСС. Автору удалось решить задачу зависимости от предметной области. Тестирование метода проводили в течение четырех месяцев на статьях журнала Wall Street. Общее количество обработанных предложений составило свыше 1100. После обработки результаты сравнивались с двумя экспертами. Система показала 42% точности. Низкая точность связана с невозможностью определения двусмысленностей. Так же шаблоны, которые использовались в работе, были не универсальными и определяли другие конструкции текста не являющимися ПСС.

Ограничения выявленные в процессе работы данного метода, такие как пропуск не явных ПСС, и зависимость от предметной области дорабатывались в другой работе [12]. Метод позволил уйти от большого количества шаблонов необходимых для выявления ПСС. Улучшенная точность и производительность запоминания в этих исследованиях были приписаны алгоритмическим настройкам. Однако это утверждение спорно. Улучшение вполне может быть связано со спецификой предметной области данных. В целом методы извлечения причинно-следственных связей в данные годы можно определить как методы для работы с небольшими текстами зависящих от конкретной предметной области и с ручной подготовкой аннотаций к данным текстам.

Очевидно, что к этой проблеме необходимо было вернуться с более прагматичной точки зрения. Совсем ранние методы рассматривали в качестве решения задачи шаблоны для текста которые были написаны в ручном режиме.

Поэтому последующие исследования были сосредоточены на создании автоматической системы извлечения ПСС с уменьшением влияния предметных областей. Не решенной также оставалась проблема неявных ПСС. Работа [13] опубликованная в 2002 году авторами Гирджу и Молдованом, было следующим исследованием направленное на создание универсального метода извлечения ПСС. Авторами было предложено автоматически выявлять лингвистические шаблоны. Затем осуществлять проверку списка полученных шаблонов на основе семантических ограничений на существительные и глаголы. Чтобы упростить задачу, авторы сосредоточились на явных синтаксических шаблонах вида «NP1-CausativeVerb-NP2» [13]<sup>8</sup>. Авторы в своей работе благодаря этому шаблону выделили основные глаголы и провели их ранжирование по двусмысленности и частоте употребления. Для тестирования системы были проведены эксперименты с большим количеством разных новостных статей. Результат работы алгоритма сравнивался с двумя независимыми ручными наборами ПСС. Точность данного алгоритма составила 65,6%. В итоге точность получилась не такая высокая, как например у Ху [9], однако предложенный алгоритм стал первым алгоритмом, который решал, хоть и в полуавтоматическом режиме, проблему двусмысленности.

---

<sup>8</sup> NP – noun phrase – словосочетание существительного, causative verb – причинный глагол

Попытки решения вышеописанных проблем были предприняты исследователями из Гонконга в серии работ [14–16]. Главная идея этих работ заключалась в создании системы извлечения ППС, основанная на семантических ожиданиях. Авторы предполагали, что люди легко понимают и извлекают ПСС из текстов, потому что у них есть некоторая ожидаемая семантика текста. Она позволяет направлять внимание человека на поиск и понимание информации. Причем ожидаемая семантика отличается исходя из предлагаемого для обработки текста. Например, ожидания от поэзии и научной литературы различные. Система названная SEKE состоит из нескольких типов семантических правил, организованных иерархически. Так как система является полуавтоматической, то на этапе предварительной обработки шаблоны разрабатываются вручную. Согласно этим шаблонам, анализируют весь текст. В работах автора в качестве учебной выборки использовались статьи о фондовом рынке Гонконга в количестве более 360 штук. Следует указать, что шаблоны для извлечения разрабатываются от простых к сложным предложениям. Система обрабатывает текст, отсеивая все предложения, не связанные с причинностью. Следующим шагом идет обработка оставшихся предложений на причины и следствия путем сопоставления с построенными шаблонами. Система проверяет предложения еще раз на предмет вхождения простых ПСС в более сложные. Если какая-то фраза соответствует нескольким шаблонам, то ее ранжируют по соответствующим критериям. Функция подсчета ранга тщательно подобрана авторами с учетом поддержки шаблонов. Однако производится она вручную. Так же для исключения двусмысленности система SEKE включает компонент на основе WordNet. Он используется для поиска понятий, которые являются синонимами к извлеченным ПСС и фразам. Так же такой подход позволяет сгенерировать новые ПСС, которые ранее были неявными. Проработав статьи, связанные с фондовым рынком авторы добились точности работы системы более 70%. В процессе тестирования авторы обнаружили, что их система определила некоторые неявные шаблоны. Недостатком системы явилось то, что авторы не отвязали систему от одной конкретной предметной области, поэтому неясно, как система будет масштабироваться для различных текстов.

Рассмотренные выше методы установили некий компромисс между высокой точностью и возможностью применения систем для нескольких предметных областей. Разработанные меры для семантического ранжирования оказались наиболее популярным методом обработки неоднозначных причинно-следственных связей. Преимущественно, никто не уделял особого внимания выделению неявных причинно-следственных связей, которые не имеют конкретной лингвистической формы, но все же влияют на читателя, чтобы причинно связать два или более события в текст.

Итту и Боума в своих работах [17] и [18] попытались решить эту сложную проблему, вернувшись к текстам, специфичным для предметной области, в качестве меры упрощения. Авторы разделили и сделали упор на трех типах неявных ПСС:

- 1) результирующий «вербальный» шаблон, определяющий конкретную ситуацию (например глаголы – уменьшить, стрелять);
- 2) шаблон, который делает причинные факторы неотделимыми от ситуации (например «яркий свет засвечивает пленку»);
- 3) «невербальный» шаблон (например, из-за).

Кроме того, они предоставили способ устранить неоднозначность многозначных шаблонов. Такие шаблоны имеют множество значений и затрудняют извлечение ПСС. Например, глагол «ведет» в следующем предложении имеет причинный смысл «курение приводит к раку легких», а в этом «тропинка ведет в сад», нет. Конкретно, их методика использует Википедию для создания базы знаний,

поскольку она имеет широкий охват и с высокой вероятностью содержит широкий спектр явных и неявных лингвистических шаблонов, кодирующих причинно-следственную связь. Сначала извлекаются все самые короткие шаблоны, связывающие две словосочетания с существительными. Чтобы извлечь причинно-следственные связи из этого списка общих связей, предлагаемый алгоритм начинается с начальной причинно-следственной пары (например, в работе авторов используется вич - спид) и идентифицирует шаблоны в Википедии, которые соединяют начальную пару. Вычисляется показатель надежности для каждого шаблона, компилируются  $k$  самых надежных шаблонов, а затем рекурсивно идентифицируются другие пары, связанные этими шаблонами. Количество итераций данной процедуры вызывается для всех пар шаблонов. Функция же выполняется до тех пор, пока не будут извлечены все определенные ПСС. Алгоритм проверялся авторами на так называемой *выгрузке* статей из Википедии (порядка 500 млн фраз). Конечная точность была определена равной 76%. К преимуществам метода можно отнести извлечение не явных ПСС после подстройки шаблонов и выполнения большого количества итераций на  $k$  самых надежных шаблонах.

Более поздние работы основанные на нестатистических методах, были посвящены исследованиям и разработке более сложных шаблонов, которые являются как временными, так и причинно-следственными [19, 20]. Были попытки автоматического определения ПСС в арабском языке [21]. В некоторых статьях, посвященных конкретным приложениям, рассматривается извлечение причинно-следственных связей из новостных тем [22–24], и нахождение причинно-следственной связи в специализированной области окружающей среды [25]. Но данные методы так же не имеют независимости от предметной области, используются для извлечения ПСС в каком-то конкретном языке и основаны на шаблонных методах.

**Выводы.** В статье представлен обзор исследовательской литературы, по ранним нестатистическим методам автоматического извлечения причинно-следственных. Кроме того, в статье приведено подробное обсуждение по крайней мере пяти высоко цитируемых исследований. Анализ данных работ позволил однозначно определить, что извлечение причинно-следственных связей является одной из самых сложных задач обработки естественного языка, прежде всего, из-за наличия лингвистических конструкций, которые могут быть причинными, а могут и не быть, в зависимости от текстового контекста. На извлечение ПСС сильно влияют так же двусмысленности и наличие неявных причинно-следственных связей. Еще одна проблема — это узкоспециализированные области знаний, где почти всегда требуется экспертная аннотация и описание вручную неких шаблонов, что затрудняет разработку универсальных методов решения этой проблемы. Стоит отметить, что хорошие результаты точности, достигнутые учеными в последнее время, обусловлены тем, что до начала работы почти всех вышеописанных алгоритмов вручную строятся шаблоны. Также почти все методы работают конкретно для английского языка с его лексической базой.

Учитывая описанное, можно сделать следующие однозначные выводы:

- 1) нестатистические методы могут успешно использоваться для извлечения ПСС из каких-то конкретных текстов, связанных с одной конкретной предметной областью, заранее проработав вручную шаблоны для извлечения;
- 2) на сегодняшний день отсутствует метод для извлечения ПСС, универсальный относительно языков, универсальный относительно предметных областей и с возможностью определения неявных ПСС;
- 3) с большой долей вероятности методы данного подхода проигрывают методам, основанным на машинном обучении, нейронных сетях и нечеткой логике.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Khoo C.S., Kornfilt J., Oddy R.N., Myaeng S.H.* Automatic extraction of cause-effect information from newspaper text without knowledge-based inferencing, *Literary and Linguistic Computing*, 1998. Vol. 13, No. 4, pp. 177-186.
2. *Altenberg B.* Causal linking in spoken and written English, *Studia linguistica*, 1984. Vol. 38, No. 1, pp. 20-69.
3. *Selfridge M.* Toward a natural language-based causal model acquisition system // *Applied Artificial Intelligence an International Journal*. 1989. Vol. 3, №2-3. P. 191–212.
4. *Kaplan R. M., Berry-Rogghe G.* Knowledge-based acquisition of causal relationships in text // *Knowledge Acquisition*, 1991, Vol. 3, No. 3, pp. 317-337.
5. *Doyle R.J.* Hypothesizing and refining causal models, *DTIC Document, Tech. Rep.*, 1984.
6. *Grishman R.* Domain modeling for language analysis, *Linguistic approaches to artificial intelligence*, 1990, pp. 41-58.
7. *Kontos J., Sidiropoulou M.* On the acquisition of causal knowledge from scientific texts with attribute grammars, *International Journal of Applied Expert Systems*, 1991, Vol. 4, No. 1, pp. 31-48.
8. *Garcia D.* Coatis, an NLP system to locate expressions of actions connected by causality links, in *Knowledge Acquisition, Modeling and Management*, Springer, 1997, pp. 347-352.
9. *Khoo C.S., Chan S., Niu Y.* Extracting causal knowledge from a medical database using graphical patterns, *Proceedings of the 38th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics*, 2000, pp. 336-343.
10. *Khoo C.S., Chan S., Niu Y., Ang A.* A method for extracting causal knowledge from textual databases, *Singapore journal of library & information management*, 1999, Vol. 28, pp. 48-63.
11. *Khoo C.S.* Automatic identification of causal relations in text and their use for improving precision in information retrieval // Ph.D. dissertation. 1995.
12. *Finn R.* Program uncovers hidden connections in the literature, *The Scientist*, 1998, Vol. 12, No. 10, pp. 12-13.
13. *Girju R. and Moldovan D.* Text mining for causal relations, *FLAIRS Conference*, 2002, pp. 360-364.
14. *Chan K. and Lam W.* Extracting causation knowledge from natural language texts, *International Journal of Intelligent Systems*, 2005, Vol. 20, No. 3, pp. 327-358.
15. *Low B.-T., Chan K., Choi L.-L., Chin M.-Y., Lay S.-L.* Semantic expectation-based causation knowledge extraction: A study on Hongkong stock movement analysis, *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Springer, 2001, pp. 114-123.
16. *Chan K., Low B.-T., Lam W., Lam K.-P.* Extracting causation knowledge from natural language texts. Springer, 2002.
17. *Ittoo A., Bouma G.* Extracting explicit and implicit causal relations from sparse, domain-specific texts, *Natural Language Processing and Information Systems*. Springer, 2011, pp. 52-63.
18. *Ittoo A., Bouma G.* Minimally supervised learning of domain specific causal relations using an open-domain corpus as knowledge base, *Data & Knowledge Engineering*, 2013, Vol. 88, pp. 142-163.
19. *Bethard S., Corvey W.J., Klingenstein S., Martin J.H.* Building a corpus of temporal-causal structure, *LREC*, 2008.
20. *Al Hashimy H., Saleh A., Kulathuramaiyer N.* Ontology enrichment with causation relations, *Systems, Process & Control (ICSPC) 2013 IEEE Conference on*. IEEE, 2013, pp. 186-192.
21. *Sadek J.* Automatic detection of arabic causal relations, *Natural Language Processing and Information Systems*. Springer, 2013, pp. 400-403.
22. *Ackerman E.J.M.* Extracting a causal network of news topics, *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2012 Workshops*. Springer, 2012, pp. 33-42.
23. *Ishii H., Ma Q., Yoshikawa M.* Causal network construction to support understanding of news, in *System Sciences (HICSS), 2010 43rd Hawaii International Conference on*. IEEE, 2010, pp 1-10.
24. Incremental construction of causal network from news articles *Information and Media Technologies*, 2012, Vol. 7, No. 1, pp. 110-118.
25. *Arauz P.L. and Faber P.* Causality in the specialized domain of the environment, *Semantic Relations-II. Enhancing Resources and Applications Workshop Programme*, Citeseer, 2012, pp. 10.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Целых

**Штанчаев Хайрутин Баширович** – Дагестанский государственный технический университет; e-mail: shtanchaev.h@gmail.com; г. Махачкала, Россия; тел.: +79883081572; кафедра ПОВТиАС; к.т.н.

**Shtanchaev Khairutin Bashirovich** – Dagestan State Technical University; e-mail: shtanchaev.h@gmail.com; Makhachkala, Russia; phone: +79883081572; the department of POVTiAS; cand. of eng. sc.

УДК 004.832.23

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-280-298

**С.И. Родзин****СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БИОЭВРИСТИК: КЛАССИФИКАЦИЯ, БЕНЧМАРКИНГ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ\***

Целями данной статьи является анализ современного состояния исследований в области разработки алгоритмов, инспирированных природой, включая категоризацию, классификацию, тестирование, цитируемость и области применения. Представлена новая многоуровневая система классификации на основе следующих признаков: критерий соответствие природной метафоре, структурный, поведенческий, поисковый, компонентный и оценочный критерии. Классификация биоэвристик предполагает систематическое отнесение каждой биоэвристики к одному и только одному классу в рамках системы взаимоисключающих и неперекрывающихся классов. Категоризация позволяет объективно подходить к выбору биоэвристик. Для каждой биоэвристики имеются конкретные задачи, с которыми она хорошо справляется. Знать эти взаимосвязи важно для целенаправленного применения биоэвристики. Рассмотрен пример классификации. Отмечено, что наиболее информативным критерием классификации является поведенческий критерий, наиболее цитируемым классом биоэвристик являются алгоритмы роевого интеллекта, а наиболее цитируемой биоэвристикой – алгоритм роя частиц PSO. Представлены современные подходы к бенчмаркингу биоэвристик: задачи дискретной и непрерывной оптимизации, а также оптимизационные инженерные задачи. Отмечена тенденция проводить сравнение производительности биоэвристик, используя статистическую проверку гипотез на бенчмарках. Систематизированы задачи, успешно решаемые биоэвристикой в таких областях, как инженерное проектирование, обработка изображений и компьютерное зрение, компьютерные сети и коммуникации, энергетика и энергоменеджмент, анализ данных и машинное обучение, робототехника, медицинская диагностика. Намечилась тенденция к гибридизации биоэвристик в одном оптимизаторе. Однако требуются убедительные доказательства, что результаты компенсируют увеличение сложности по сравнению с отдельными алгоритмами. Отмечены задачи оптимизации, требующие дальнейших исследований: задачи динамической и стохастической оптимизации; задачи многокритериальной оптимизации; задачи мультимодальной оптимизации; задачи многомерной оптимизации; задачи меметической оптимизации, в которых комбинируется множество поисковых алгоритмов; задачи оптимизации и адаптации настроек параметров биоэвристик для достижения баланса между скоростью сходимости и диверсификацией пространства поиска решений.

Биоэвристика; классификация; категоризация; бенчмаркинг; фреймворк; агент; оператор; популяция; стигмергия.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00089, <https://rscf.ru/project/23-21-00089/> в Южном федеральном университете.

S.I. Rodzin

**CURRENT STATE OF BIO HEURISTICS: CLASSIFICATION,  
BENCHMARKING, APPLICATION AREAS**

*The purpose of this article is to analyze the current state of research in the field of development of algorithms inspired by nature, including categorization, classification, testing, citation, and application areas. A new multi-level classification system based on the following features is presented: the criterion of conformity to a natural metaphor, structural, behavioral, search, component, and evaluation criteria. The classification of bio heuristics involves the systematic assignment of each bio heuristics to one and only one class within a system of mutually exclusive and non-overlapping classes. Categorization allows an objective approach to the choice of bio heuristics. For each bio heuristics there are specific tasks with which it copes well. Knowing these relationships is important for the purposeful application of bio heuristics. An example of classification is considered. It is noted that the most informative classification criterion is the behavioral criterion, the most cited class of bio heuristics are swarm intelligence algorithms, and the most cited bio heuristics is the PSO particle swarm algorithm. Modern approaches to benchmarking of bio heuristics are presented: discrete and continuous optimization problems, as well as optimization engineering problems. There is a tendency to compare the performance of bio heuristics using statistical hypothesis testing on benchmarks. The tasks successfully solved by bio heuristics in such areas as engineering design, image processing and computer vision, computer networks and communications, energy and energy management, data analysis and machine learning, robotics, medical diagnostics are systematized. There is a tendency to hybridize bio heuristics in one optimizer. However, convincing evidence is required that the results compensate for the increase in complexity compared to individual algorithms. Optimization problems requiring further research are noted: dynamic and stochastic optimization problems; multicriteria optimization problems; multimodal optimization problems; multidimensional optimization problems; memetic optimization problems in which a variety of search algorithms are combined; optimization problems and adaptation of bio heuristics parameter settings to achieve a balance between the convergence rate and the diversification of the solution search space.*

*Bio heuristics; classification; categorization; benchmarking; framework; agent; operator; population; stigmergy.*

**Введение.** Эволюция позволила животным адаптироваться к суровым условиям окружающей среды, добыванию пищи, сложным задачам ориентации и противостояния климатическим изменениям. Животные, организованные в группы, рои или колонии сумели колонизировать Землю и достичь глобального равновесия, которое позволило им существовать тысячи лет.

Этот успех биоты привел к появлению многочисленных моделей, инспирированных природой, которые с успехом применяются в виде алгоритмов и фреймворков для решения трудных оптимизационных задач. Биоэвристика – это высокоуровневая, алгоритмическая процедура, построенная на основе модели, инспирированной природой, независимая от задачи, предназначенная для поиска близких к оптимальным решений задачи. Биоэвристики обычно разрабатываются на основе наблюдений за природными процессами или паттернами поведения биологических организмов, которые затем преобразуются в алгоритм оптимизации. Можно предположить, что любой природный процесс поддается адаптации и эмуляции для создания новой биоэвристики с различными возможностями достижения глобальных оптимальных решений задач оптимизации.

Однако следует иметь в виду *NFL*-теорему [1], согласно которой любая биоэвристика в среднем будет работать одинаково хорошо, как алгоритм случайного поиска, по всем возможным целевым функциям. Одна биоэвристика может оказаться предпочтительнее другой на конкретной задаче в зависимости от оценки баланса между ее скорости сходимости и возможностями диверсификации про-

странства поиска решений. Эта и другие причины привели за последние годы к стремительному росту числа биоэвристик и исследовательского интереса к ним. В частности, согласно библиометрическим данным *Scopus*, среднегодовая норма цитирования статей в области искусственного интеллекта составляет около 5, в то время как 85 % статей, в которых предлагаются биоэвристики, цитируются в среднем около 20 раз.

Некоторые исследователи критикуют этот возросший поток публикаций новых и модифицированных биоэвристик [2]. Сущность используемых природных метафор становится все более надуманной, их тестирование является недостаточным, подмножество задач – ограниченным, а оценки производительности – затруднительными. Предполагается, что каждая новая биоэвристика превосходит предыдущие, однако причины этого не анализируются. Между тем фундаментальных исследованиях в области оценки, анализа и классификации биоэвристик не много [3].

Целями данной статьи является анализ современного состояния исследований в области разработки биоэвристик, включая их категоризацию, тестирование и области применения, а также разработка новой многоуровневой системы классификации, позволяющей исследователям однозначно идентифицировать как новые, так и существующие биоэвристики, обосновывать их эффективность для решения проблемно-ориентированных задач. Иными словами, существует необходимость в формальном анализе, представлении и систематизации биоэвристик, а также в создании определенного набора критериев их классификации. Достижение указанной цели может послужить основой для поиска наиболее подходящих биоэвристик для решения конкретных оптимизационных задач.

**Существующие подходы к категоризации и классификации биоэвристик.** Классификация обозначает разновидность деления объема понятия по определенному основанию (признаку, критерию), при котором объем родового понятия (класс, множество) делится на виды (подклассы, подмножества), а виды, в свою очередь делятся на подвиды и т. д. Классификация биоэвристик как процесс предполагает упорядоченное и систематическое отнесение каждой биоэвристики к одному и только одному классу в рамках системы взаимоисключающих и неперекрывающихся классов. Классификация сортирует биоэвристики в соответствии с их сходством, используя определенный набор признаков или критериев.

Термин «таксономия» изначально применялся только в биологии. Позже он стал использоваться для обозначения общей теории классификации и систематизации сложных систем как в биологии, так и в других областях знаний.

Категоризация обозначает деятельность по распознаванию общих черт или сходств между объектами и их отнесения к абстрактной группе (категории, классу или типу) на основе признаков сходства. Иными словами, категоризация подразумевает процесс разделения объектов на некоторые группы, объекты которых в некотором роде похожи друг на друга. В отличие от классификации, при категоризации объект может быть частью более чем одной категории, в зависимости от контекста.

Основываясь на этих определениях, будем использовать термин «категоризация» для организации систем упорядочения с критериями, позволяющими сортировать биоэвристики в нескольких группах одновременно или несколько биоэвристик в одной группе. Наоборот, будем использовать термин «классификация», если каждая биоэвристика может быть четко упорядочена в отдельном классе по определенным критериям. Если при классификации остается группа биоэвристик, то внутри этой группы биоэвристики идентичны по критериям классификации.

Классификация позволяет объективно подходить к выбору биоэвристик, поскольку для каждой из них имеются конкретные задачи, с которыми она справляется особенно хорошо. Знать и понимать эти взаимосвязи важно для целенаправленного применения биоэвристики.

Одной из объективных проблем при классификации биоэвристик является бессистемность их обозначений. Большинство биоэвристик используют обозначения, основанные на их природной метафоре. Вместо использования общих терминов оптимизации. Это вызывает трудности при формулировании общих критериев классификации и извлечении необходимой информации из биоэвристики для применения этих критериев. Проблемой также является отсутствие руководящих принципов в отношении критериев классификации. Это приводит к множеству слабо детализированных схем классификации. Зачастую критерии классификации выбираются не по принципу их информативности и значимости, а с точки зрения простоты применения.

В [4] представлена таксономия биоэвристик, основанная на природных метафорах: принципах эволюции, роевого поведения и экосистеме. Это подход к категоризации, поскольку не применяются критерии, позволяющие однозначно различать биоэвристики.

В [5] также представлена таксономическая структура, которая разделяет биоэвристики локального поиска, конструктивные и популяционные биоэвристики. Подход направлен на категоризацию и предполагает, что биоэвристика может быть частью более чем одной группы.

В [6] предложен таксономический подход, аналогичный [4], дополненный сравнительным анализом условий применения биоэвристик. Данная таксономия также представляет собой категоризацию, поскольку четкое различие биоэвристик отсутствует.

В [7] биоэвристики разделяются на группы биологические, физические, социальные, музыкальные, химические, спортивные, математические и роевые системы. Этот подход к категоризации применим как к биоэвристическим алгоритмам, так и к фреймворкам.

В [8] используются критерии категоризации, разделяющие биоэвристики траекторного типа (в области поиска эволюционирует только одно решение задачи) и биоэвристики популяционного типа (одновременно эволюционируют несколько вариантов решения задачи). Кроме того, при категоризации различается локальный поиск, а также поиск с памятью. Однако эти критерии не позволяют провести однозначную классификацию биоэвристик.

В [9] представляется обширный набор критериев категоризации биоэвристик в зависимости от ограничений на вид и число целевых функций оптимизации, значения переменных в задаче, детерминированный или стохастический характер переменных. Однако эти критерии затруднительно применять при классификации биоэвристик, потому что они сильно зависят от соответствующей реализации биоэвристического алгоритма. Однако они достаточно подробны, чтобы их можно было использовать в классификации, а не только в категоризации.

В [10] представлена система признаков биоэвристик, которые могут быть использованы в качестве критериев классификации. Эти признаки включают наличие операторов эволюции, адаптивную настройку параметров алгоритма, возможности распараллеливания, гибридизации, обучение на основе теории хаоса.

В [11] была предложена категоризация, которая включает эволюционные и роевые биоэвристики, а также биоэвристики, основанные на физических процессах и на когнитивных процессах, связанных с деятельностью человека. Предлагаемое множество критериев классификации включает такие характеристики, как



скорость сходимости алгоритма, диверсификация пространства поиска решений, механизм селекции решений, вычислительная трудоемкость, требуемый объем памяти, настройка параметров алгоритма, трудности программной реализации.

В [12] представлены две схемы категоризации биоэвристик для задач комбинаторной оптимизации. Одна схема подходит для категоризации фреймворков, другая – для категоризации алгоритмов. Подход к категоризации разделяет алгоритмы комбинаторной оптимизации на последовательные, детерминированного локального поиска, стохастического локального поиска, эволюционные, роевые алгоритмы и специальные методы. Основными характеристиками алгоритмов комбинаторной оптимизации в [12] являются принцип принятия решений (детерминированный или стохастический), сложность структуры (простой, метаэвристический, гиперэвристический или гибридный алгоритм), тип траектории поиска (непрерывный или дискретный), влияние на ландшафт поиска, использование памяти, возможности адаптации параметров или обучения алгоритма, проблемная ориентированность. Некоторые из них подразделяются на дополнительные критерии.

Согласно [13] одной из важных особенностей биоэвристик является баланс между скоростью сходимости и диверсификацией пространства поиска оптимальных решений. Другими особенностями являются количество гиперпараметров, возможность гибридизации и механизмы локального поиска. Эти особенности могут быть использованы в качестве критериев классификации для биоэвристик и фреймворков, хотя количество гиперпараметров зависит от реализации и, следовательно, применимо только при классификации алгоритмов.

В [14] предлагается подход к классификации биоэвристик, основанный на использовании таких специфических характеристик как локальный поиск в окрестности, восхождение на холм, многократный запуск алгоритма, адаптивное программирование памяти. В частности, эволюционные алгоритмы используют популяционный поиск, роевые алгоритмы – направленный поиск в окрестности. Этот подход был применен для классификации 32 биоэвристик и фреймворков.

Согласно [3] предлагается подход, классифицирующий биоэвристики в соответствии с их природной метафорой, например, класс, основанный на роевом интеллекте. В свою очередь биоэвристики роевого интеллекта разделяются на инспирированные водной фауной, наземными животными, птицами, насекомыми и микроорганизмами.

В [15] проводится сравнительный анализ биоэвристик, основанный на визуализации их характеристик. Оценка производительности биоэвристик для различных задач используется для их классификации. Однако подобного рода подход довольно сложно применять для каждой комбинации биоэвристических алгоритмов и задач.

Интересной представляется классификация гипербиоэвристик в [16, 17]. Гипербиоэвристика – это относительно новый тип алгоритмов, в которых для получения результата используется комбинация простых однопроходных биоэвристик, управляемых общей схемой. Однако классификация гиперэвристик выходит за рамки данной работы, хотя удачная комбинация биоэвристик представляет определенный исследовательский интерес.

Отметим, что многие биоэвристики, такие как генетические алгоритмы, роя частиц, муравьиных колоний, дифференциальной эволюции, бактериальные, летучих мышей были модифицированы [18]. Большинство из этих публикаций посвящены описанию биоэвристик, нежели их классификации и анализу.

В [19, 20] были представлены классификация биоэвристик, однако они не являются иерархическими, не позволяют однозначно относить многие биоэвристики к одному классу. Кроме того, в этих исследованиях не представлен анализ структурных особенностей известных и вновь разрабатываемых биоэвристик.

**Многоуровневая классификация биоэвристик.** Необходимо, чтобы каждая биоэвристика была отнесена только к одному классу. Критерии классификации биоэвристик, с одной стороны, не должны быть слишком универсальными, с другой стороны, они не должны быть слишком конкретными. Предлагается многоуровневая классификация биоэвристик. Уровни и критерии классификации представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Многоуровневая классификация биоэвристик**

№	Уровень	Критерий
1	Природная метафора	Роевые алгоритмы; алгоритмы, основанные на физических и химических процессах; алгоритмы, основанные на когнитивных процессах и деятельности человека; эволюционные алгоритмы; алгоритмы, основанные на особенностях организмов, способных к фотосинтезу; прочие алгоритмы, которые настолько различны, что их невозможно сгруппировать в представительные классы.
2	Структурный	Дискретные/траекторные; популяционные/одионые; с памятью/без памяти.
3	Поведенческий	Получение новых решений: создаются из уже имеющихся решений/путем дифференциально-векторного движения.
4	Поисковый	Оценка баланса: скорость сходимости биоэвристики/диверсификация пространства поиска.
5	Компонентный	Локальный поиск; эволюционный механизм; механизм оптимизации роя частиц; механизм оптимизации колонии муравьев.
6	Специфические особенности	Адаптивные механизмы настройки параметров; вычислительная сложность биоэвристики.
7	Оценочный	Тип/размерность задачи.

Классификационная схема представляет собой иерархию. Биоэвристики, лежащие на одном уровне иерархии, не должны относиться к разным классам. Рассмотрим подробнее каждый уровень и соответствующие критерии классификации.

*Критерий соответствия природной метафоре.* Разнообразие природных метафор может привести к мелкозернистой классификации. Необходим компромисс, чтобы сохранить классификацию простой, но информативной. Ограничим снизу число биоэвристик, входящих в отдельный класс, четырьмя.

В результате более чем 400 из существующих биоэвристик разделяются по критерию соответствия природной метафоре на шесть классов:

- ◆ роевые алгоритмы (около 48 %);
- ◆ алгоритмы, основанные на физических и химических процессах (около 18%);
- ◆ алгоритмы, основанные на когнитивных процессах и деятельности человека (около 12%);
- ◆ эволюционные алгоритмы (7%);
- ◆ алгоритмы, основанные на особенностях многоклеточных организмов, способных к фотосинтезу (5%);
- ◆ прочие алгоритмы, которые настолько различны, что их невозможно сгруппировать в представительные классы (четыре или более биоэвристик, около 10%).

Для прояснения критериев классификации на этом уровне приведем краткое описание основных характеристик каждого из шести классов.

*Алгоритмы, основанные на роевом интеллекте.* Они характеризуются коллективным поведением децентрализованных, самоорганизующихся агентов. Первоначально этот термин был предложен в контексте роботизированных систем, однако с годами получил широкое распространение для обозначения коллективного разума в группе агентов, управляемых простыми правилами поведения. Речь идет о моделях коллективного поведения таких сообществ как колонии насекомых или птичьи стаи, где коллективный интеллект роя позволяет эффективно решать задачи оптимизации.

Роевые биоэвристики разделяются по следующим критериям классификации:

♦ алгоритмы, инспирированные полетом птиц и насекомых (17 %, наиболее известными являются *PSO* и *ABC*);

♦ алгоритмы, инспирированные механизмами добывания пищи и охоты наземных животных (14%, наиболее известными являются *ACO*, *GWO*, *LOA*, *GOA*);

♦ алгоритмы, инспирированные водными животными (7%, наиболее известными являются *KH*, *WOA*, *DPO*);

♦ алгоритмы, инспирированные микроорганизмами (4%, наиболее известным является *BFOA*);

♦ другие роевые биоэвристики настолько различные, что их невозможно сгруппировать в представительные классы (6 %).

Внутри каждой подкатегории также имеются определенные различия, например метафора связана с поисками роем пищи или же речь идет о модели движения роя.

*Алгоритмы, основанные на физических и химических процессах.* Алгоритмы, основанные на физических процессах (14%, наиболее известные *EMO*, *HS*, *IWD*, *WFO*) и химических процессах (4%, наиболее известные *ACP*, *IRO*, *SA*), характеризуются тем, что они имитируют, например, гравитационные силы, электромагнетизм, электрические заряды и движение воды, а также химические реакции и движение частиц газов.

*Алгоритмы, основанные на когнитивных процессах и деятельности человека.* Эти алгоритмы характеризуются тем, что они инспирированы социальными и политическими концепциями, процессами принятия решений, конкуренцией идеологий внутри общества, спортивными соревнованиями, мозговым штурмом. Наиболее известными являются *IA*, *ICA*, *SLC*, *GBSO*.

Следующим классом биоэвристик по критерию соответствия природной метафоре являются эволюционные алгоритмы.

*Эволюционные алгоритмы* основаны на принципах природной эволюции. Каждый агент в популяции представляет собой решение задачи и имеет соответствующее значение функции пригодности. В этих алгоритмах процесс воспроизводства и отбора повторяется в течение многих поколений, совокупность решений эволюционирует в направлении областей с более высокой пригодностью. Особенность селекции делает алгоритмы этого класса уникальными по сравнению с алгоритмами других категорий. Наиболее известными эволюционными алгоритмами являются *GA*, *DE*, *ES*.

*Алгоритмы, основанные на особенностях многоклеточных организмов, способных к фотосинтезу.* В этом классе сгруппированы алгоритмы оптимизации, процесс поиска в которых инспирирован растительным миром. В отличие от других биоэвристик, в них отсутствует связь между агентами. Одним из наиболее известных является алгоритм оптимизации лесов *FOA.I*, инспирированный процессом размножения растений.

*Прочие алгоритмы.* В эту категорию входят биоэвристики, которые не относятся ни к одной из перечисленных выше категорий. Они настолько различны, что их невозможно сгруппировать в представительные классы. Например, алгоритм Инь-Ян (YYOP) [21]. Эта категория биоэвристик неоднородна, ее включение в классификацию, возможно, в будущем послужит основой для создания новых подкатегорий, развитию классификации и облегчит анализ будущих достижений в этой области.

Следующим уровнем классификации является структурный уровень.

*Структурный уровень.* Он включает критерии, относящиеся к общей структуре биоэвристик. Вначале биоэвристики классифицируются на дискретные и траекторные. Далее, большинство дискретных биоэвристик являются популяционными, а траекторные обычно основаны на одном решении. На следующем шаге классификации проводится различие между биоэвристиками, основанными на локальном поиске и так называемыми биоэвристиками конструктивного поиска. На заключительном шаге структурной классификации используется критерий наличия/отсутствия памяти в процессе поиска. Структурный уровень классификации дает важную информацию о биоэвристике, однако недостаточную для однозначной классификации.

Следующим уровнем классификации является поведенческий уровень.

*Поведенческий уровень.* Согласно этому уровню классификации биоэвристики группируются по их поведенческим особенностям безотносительно от их природной метафоры. С этой целью необходим четкий критерий классификации. В качестве такого критерия будем использовать механизмы для создания новых решений или для изменения существующих решений задачи оптимизации. Согласно этому критерию, вначале проводится различие между процессом получения новых решений: они создаются из уже имеющихся решений или путем так называемого дифференциально-векторного движения [3].

При дифференциально-векторном движении новые решения создаются путем сдвига или мутации предыдущего решения. Репрезентативными примерами этой категории биоэвристик являются *PSO* и *DE*.

При создании новых решений используются механизмы, которые рекомбинируют несколько решений или основаны на стигмергии путем спонтанного непрямого взаимодействия между индивидами. Репрезентативными примерами этой категории биоэвристик являются *GA* и *ACO*.

В результате более чем 400 биоэвристик вначале разделяются на два класса:

- ◆ алгоритмы на основе дифференциально-векторного движения (около 66%);
- ◆ алгоритмы, основанные на создании новых решений (около 34%).

В определении направления дифференциально-векторного движения может участвовать вся популяция решений (около 4%), только определенные решения (около 55%), только решения из некоторой окрестности или субпопуляции (около 7%).

Среди алгоритмов, основанных на создании новых решений, около 32% используют рекомбинацию нескольких решений, а 2% – стигмергию.

Представим основные поведенческие характеристики биоэвристик из различных категорий.

Особенность категории биоэвристик дифференциально-векторного движения заключается в том, что вычисляется направление дифференциального вектора.

Одним из возможных критериев является использование для этих целей всех агентов в популяции. В этих алгоритмах все агенты имеют определенную степень влияния на движение других решений. Такая степень обычно взвешивается в соответствии с разницей в функции пригодности или расстоянием между решениями. Примером здесь является *FA*, в котором решения, близкие к лучшему решению, оказывают более сильное влияние, нежели более удаленные.

Другим критерием класса биоэвристик с дифференциально-векторным движением является использование определенных репрезентативных решений. Чаще всего в этом качестве выбираются наилучшие решения, найденные алгоритмом. Примером алгоритма этой категории является *PSO*. В этом оптимизаторе каждое решение или частица руководствуется глобальным текущим лучшим решением и лучшим решением, полученным этой частицей во время поиска. Другим примером в этой категории является семейство алгоритмов *DE*. В них наилучшее решение комбинируется с дифференциальным вектором для расширения пространства поиска решений.

Еще одним критерием класса биоэвристик с дифференциально-векторным движением является использование решений из некоторой окрестности или субпопуляции. Примерами алгоритмов в этой категории являются *LA*, *MBO* и *BFOA*.

Особенность категории биоэвристик основанных на создании новых решений заключается в том, что они используют операторы рекомбинации или стигмергию. Наиболее распространенным вариантом является рекомбинация новых решений путем объединения некоторых из уже существующих решений с помощью оператора кроссинговера или путем комбинирования хороших решений. Самым популярным алгоритмом в этой категории являются эволюционный алгоритм *GA*, алгоритм *SA*, роевой алгоритм *LA*, алгоритм столкновения частиц *PCA* и алгоритм оптимизация светового луча *LRO*, основанные на физических и химических процессах.

Наиболее распространенным вариантом создания новых решений путем стигмергии является алгоритм *ACO*, моделирующий механизм добывания пищи колонией муравьев [16].

Сравним результаты классификации биоэвристик по критерию соответствия природной метафоре и поведенческому критерию. Например, алгоритм гравитационных сил *GFA* и алгоритм эволюция животных *ABO* имеют значительное сходство с роевым алгоритмом *PSO*. Однако согласно классификации биоэвристик по критерию соответствия природной метафоре указанные алгоритмы принадлежат различным классам, инспирированы различными природными явлениями. В то же время справедливо и обратное: биоэвристики, имеющие схожую природную метафору, могут значительно отличаться друг от друга по поведенческому критерию. Примером являются алгоритмы эхолокации дельфина *DE* и *Dolphin*. Оба инспирированы одним и тем же животным (дельфином) и его механизмом эхолокации для обнаружения рыбы, однако поведенческие механизмы у них разные: *DE* создает новые решения путем комбинирования, в то время как *Dolphin* аналогичен *PSO*. Другим примером является класс биоэвристик с дифференциально-векторным движением, который содержит более половины рассмотренных алгоритмов (55%) и включает алгоритмы из всех различных классов по критерию соответствия природной метафоре: социальное поведение человека (алгоритм *ASO*), бактериальная колония, алгоритм фейерверка, алгоритм опыления цветов.

На наш взгляд, поведенческий уровень классификации является наиболее информативным. Однако здесь возникают некоторые проблемы. Например, для алгоритма оптимизации роя частиц (*PSO*) существует более 50 аналогичных биоэвристик. Для выяснения различий между ними требуется определенное время и усилия. Необходим переход на следующий уровень классификации.

Этот уровень классификации назовем поисковым.

*Поисковый уровень.* Он связан со скоростью сходимости биоэвристики при поиске оптимального решения и диверсификацией пространства поиска решений. Примеры этих критериев приведены в [11, 13, 22]. Диверсификация пространства

поиска решений относится к способности поисковых агентов исследовать новые области пространства поиска, в то время как сходимости алгоритма делает акцент на возможностях этих агентов улучшать уже найденные “хорошие” решения. Важность поиска баланса между скоростью сходимости алгоритма и диверсификацией пространства поиска решений является фундаментальной задачей, однако пока отсутствуют инструменты измерения баланса. На баланс между скоростью сходимости алгоритма и диверсификацией пространства поиска решений оказывают влияние механизм селекции, аттрактивность операторов поиска и число итераций алгоритма. Например, жадный механизм селекции приводит к преждевременной сходимости в точке локального оптимума. Аттрактивность операторов, используемых в биоэвристиках, означает дрейф имеющихся решений в направлении лучших решений, которые рассматриваются в качестве аттракторов. Этот механизм эффективен для поддержания разнообразия популяции решений. Необходимо найти метрику для оценки баланса между скоростью сходимости биоэвристики и диверсификацией пространства поиска решений.

Следующим является компонентный уровень классификации.

*Компонентный уровень.* Он связан с особенностями компонент, включаемых в алгоритм, в качестве критериев классификации. Основа для этих критериев была предложена в [14]. В этой работе анализировались биоэвристики с точки зрения заложенных в них базовых алгоритмических структур. Анализировались следующие алгоритмические структуры: механизм локального поиска, эволюционный механизм, механизм оптимизации роя частиц и механизм оптимизации колонии муравьев. Биоэвристики, использующие механизм локального поиска, классифицировались по следующим критериям: поиск в окрестности, поиск восхождением к вершине, предотвращение преждевременной сходимости в локальных оптимумах. мультистарт и адаптивное программирование памяти. Биоэвристики, использующие эволюционный механизм, классифицировались по следующим критериям: использующие популяционный поиск и использующие промежуточный поиск, при котором исследуется пространство между двумя или более наилучшими решениями. Биоэвристики, использующие механизм оптимизации роя частиц, классифицировались по следующим критериям: направленный поиск по определенным перспективным направлениям (например, градиентным) и поиск в переменной окрестности. Биоэвристики, использующие механизм оптимизации колонии муравьев, классифицировались по критерию создания карты в пространстве поиска для планирования процесса поиска. В настоящее время многие биоэвристики используют комбинацию сразу нескольких указанных выше алгоритмических компонентов. Таким образом, компонентный классификационный уровень предоставляет информацию об их сходствах и различиях. Возможно, этот список биоэвристических компонентов не является полным.

*Специфический уровень.* Он связан с особенностями и возможным расширением структуры биоэвристики. Поиск критериев, подходящих для данного уровня классификации, представляется несколько более сложным, нежели для предыдущих уровней, поскольку они должны быть связаны с возможностями фреймворка, т. е. программной платформы, определяющей структуру программного обеспечения, облегчающего разработку и объединение разных компонентов большого программного проекта. Одним из примеров критерия данного уровня является использование в биоэвристике адаптивных параметров, а также критериев, определяющих вычислительную сложность биоэвристики. Пока не существует четкой классификации на этом уровне, однако этот уровень важен для обеспечения детального различия биоэвристик.

*Оценочный уровень.* Он связан с эффективностью биоэвристик для решения конкретных задач оптимизации. Возможно, что подходящими классификационными критериями на этом уровне могут быть, например, структура задачи и ее размерность. Однако для этого необходимо знать эффективность биоэвристик для решения конкретных классов задач. Оценочный уровень классификации требует дальнейших исследований, чтобы стать применимым в общей системе классификации биоэвристик. Понятно, что знание о производительности биоэвристики для различных классов задач облегчает ее выбор для решения конкретной задачи, а также помогает определить, какие биоэвристики демонстрируют идентичные результаты на одних и тех же классах задач.

**Пример применения многоуровневой иерархической классификации.** Проиллюстрируем применение предлагаемой системы классификации на примере трех биоэвристик в их базовых версиях: генетический алгоритм, эволюция  $(1 + \lambda)$  и табуированный поиск [23], используя структурный, поведенческий, поисковый и компонентный уровни классификации.

*Генетический алгоритм GA* подходит для задач комбинаторной оптимизации, использует начальную популяцию в пространстве поиска решений, предполагает повторение следующих шагов до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановки:

- ◆ родители выбираются с использованием турнирного отбора;
- ◆ потомство генерируется путем равномерного кроссинговера;
- ◆ потомство мутирует, случайно инвертируя один бит в решении;
- ◆ потомство оценивается и происходит замена поколений с учетом элитарного отбора.

*GA* использует дискретную структуру, память, а также три различные стратегии поиска рекомбинацию, мутацию и отбор. На компонентном уровне оператор мутации использует поиск в окрестности, оператор рекомбинации использует промежуточный поиск на основе популяции, популяционный отбор, программируемую память и мультизапуск. Смена поколений в популяции происходит по схеме восхождения на вершину фитнес-ландшафта.

*Эволюционная стратегия  $(1 + \lambda)$ -ES* также, как и *GA*, относится к группе эволюционных алгоритмов, использует память и дискретную структуру, подходящую для комбинаторной оптимизации. В  $(1 + \lambda)$ -*ES* случайным образом инициализируется только один родительский элемент. Следующие шаги повторяются до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановки:

- ◆ потомков генерируются мутацией родителя;
- ◆ потомство оценивается, и лучшая особь родителя и потомства выбирается в качестве родителя следующего поколения.

В  $(1 + \lambda)$ -*ES* новые решения создаются путем адаптации ранее найденных решений, не используется оператор кроссинговера. На компонентном уровне популяция и оператор мутации используются для поиска в окрестности на основе популяции. Смена поколений в популяции происходит по схеме восхождения на вершину фитнес-ландшафта.

*Табуированный поиск (TS)* подходит для решения задач комбинаторной оптимизации, использует кратковременную память при формировании списка запретов. Поиск начинается со случайно инициализированного решения, для которого создается список соседних решений. В табу список добавляется каждое просмотренное решение. *TS* предполагает повторение следующих шагов до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановки:

◆ на каждой итерации выбирается лучшее решение в окрестности текущего решения в качестве нового текущего решения, даже если это приводит к увеличению стоимости решения;

◆ в кратковременной памяти, называемой списком табу, сохраняется недавно найденные решения, чтобы избежать заикливания. Поиск прекращается после определенного числа итераций или если после ряда последовательных итераций не было достигнуто каких-либо улучшений в наилучшем известном решении.

*TS* – это эвристика, основанная на траектории одного решения, которая использует локальный поиск и память. Его поведение основано на дифференциальном векторном движении в управляемой окрестности. На компонентном уровне список табу использует адаптивное программирование памяти, поиск восхождения на вершину в ландшафте фитнес-функции.

Если необходимо оценить скорость сходимости и возможности диверсификации пространства поиска указанных биоэвристик, например, при оптимизации мультимодальных целевых функций, то система классификации показывает, что *GA* предоставляет больше возможностей для балансировки поиска, нежели *TS* и  $(1 + \lambda)$ -*ES*. При использовании соответствующего классификационного уровня эта оценка может быть улучшена.

**Бенчмаркинг биоэвристик.** Невозможно протестировать каждую биоэвристику на множестве конкретных задач для оценки эффективности. Используя рандомизацию и факторный анализ, можно планировать эксперименты, выбирать комбинации параметров биоэвристик. При сравнении производительности биоэвристик следует использовать статистическую проверку гипотез на бенчмарках. В частности, нулевая гипотеза для похожих биоэвристик заключается в том, что они попадают в один и тот же класс. Если эта гипотеза не подтверждается, то биоэвристики разделяются на отдельные классы. В [24] обобщены этапы оценки биоэвристик с акцентом на их экспериментальную проверку. Это обобщение дает полезную информацию для оценки эффективности биоэвристик.

Для корректного тестирования биоэвристик необходимо единообразная нотация [25]. Требуется стандартизированный язык, обеспечивающий их четкое и машиночитаемое описание. Между тем для большинства биоэвристик нет общедоступного исходного кода. Оценка и сравнение биоэвристик должны основываться на стандартизированной процедуре, включающей как теоретические принципы, так и эмпирические подходы. Теоретические принципы помогают выделить отличительные особенности биоэвристики и определить ее новизну. Эмпирические подходы помогают стандартизировать соответствующие протоколы тестирования биоэвристик, их статистический анализ и выбор контрольных показателей. Предлагаемые биоэвристики должны демонстрировать сокращение времени, затрат или сложности при решении оптимизационных задач, способность обрабатывать различные типы оптимизационных функций, демонстрировать свойства сходимости, возможность распараллеливания. Кроме того, важно понимать особенности решаемых задач при разработке биоэвристики. Полная классификация биоэвристик, вероятно, могла бы помочь решению некоторых из этих проблем.

Современные подходы к бенчмаркингу биоэвристик, чаще всего, основаны на эмпирических наблюдениях, собранных в результате моделирования, проведенного на тестовых задачах. Тенденция последних лет – использование бенчмарков.



Для задач дискретной оптимизации используются бенчмарки задачи коммивояжера, о рюкзаке, об упаковке, транспортная задача, обучение параметров искусственной нейронной сети, задачи планирования и составления расписаний, разработка игровых стратегий, задачи конструкторского проектирования микросхем [26].

Для задач непрерывной оптимизации чаще всего в качестве бенчмарков используются многомерные мультиэкстремальные математические функции, например

- ◆ Гриванка  $F_{gri}(\mathbf{X}) = \frac{1}{40000} \sum_{i=1}^n (x_i - 100)^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i - 100}{\sqrt{i}}\right) + 1$ ,
- ◆ Растригина  $F_{rtg}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$ ,
- ◆ Розенброка  $F_{ros}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$ ,
- ◆ Швевеля  $F_{sch}(\mathbf{X}) = 418,9829n - \sum_{i=1}^n x_i \sin(\sqrt{|x_i|})$ ,
- ◆ Захарова  $f_{zach}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n (x_i)^2 + (\sum_{i=1}^n 0,5ix_i)^2 + (\sum_{i=1}^n 0,5ix_i)^4$ ,
- ◆ Саломона  $f_{sal}(\mathbf{X}) = -\cos\left(2\pi\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) + 0,1\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 + 1}$ ,
- ◆ Цина  $f_{zin}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - i)^2$ .

Поиск глобального минимума каждой из этих тестовых функций является трудной задачей. В частности, «банановая» функция Розенброка имеет большое медленно убывающее плато, ее глобальный минимум функции находится внутри параболической сильно вытянутой поверхности. Функция Швевеля является мультиэкстремальной с «непредсказуемым» глобальным минимумом.

В качестве оптимизационных инженерных задач в современных исследованиях используются следующие три задачи оптимизации:

- ◆ растяжение/сжатие пружины с параметрами диаметр пружины, толщина пружины и длина пружины (рис. 1),
- ◆ проектирование сосуда высокого давления с параметрами толщина стенок, внутренний радиус и длина цилиндрического сечения (рис. 2),
- ◆ сварка балки с параметрами толщина сварного шва, длина, высота и толщина присоединяемой части стержня (рис. 3).

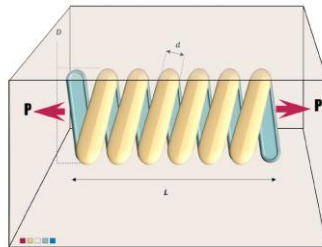


Рис. 1. Растяжение/сжатие пружины с параметрами диаметр пружины ( $D$ ), толщина пружины ( $d$ ) и длина пружины ( $L$ )

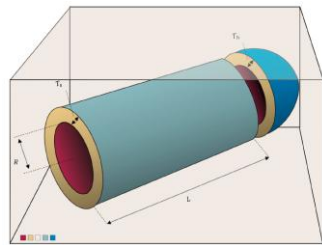


Рис. 2. Проектирование сосуда высокого давления с параметрами толщина стенок сосуда ( $T_s$ ), внутренний радиус ( $R$ ) и длина цилиндрического сечения ( $L$ )

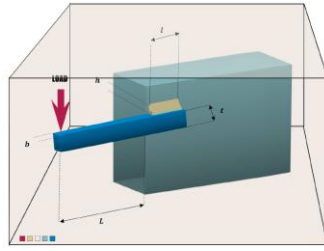


Рис. 3. Сварка балки с параметрами толщина сварного шва, длина, высота и толщина присоединяемой части стержня

**Области применения биоэвристик.** На практике наиболее распространенный вопрос заключается в том, какая биоэвристика лучше всего подходит и как ее можно успешно применить для решения конкретной задачи? Ответ на этот вопрос – непростая задача. В зависимости от требований по точности может существовать несколько биоэвристик, дающих приемлемые решения. Проблема выбора подходящей биоэвристики включает в себя пространство задач  $P$ , пространство алгоритмов  $A$  и отображение  $P \times A$  на модель эффективности  $R$ .

В частности, в [24] представлены рекомендации по выбору биоэвристик. Они включают выбор критериев и проверку результатов путем статистического анализа и визуализации, а также настройку параметров алгоритмов. С этой целью были выбраны три указанных выше инженерных оптимизационных задачи: растяжение/сжатие пружины, проектирование сосуда высокого давления, сварка балки.

Их использовали для определения наиболее эффективных биоэвристик. В частности, для задачи растяжения/сжатия пружины сравнивались биоэвристики  $AO$ ,  $BOA$ ,  $EPO$ ,  $STOA$ ,  $BA$ ,  $PFA$ ,  $MPA$ ,  $ChSA$ ,  $HNO$ ,  $GWO$ ,  $MFO$ ,  $SHO$ ,  $WOA$ ,  $SSA$ . Для задачи проектирования сосуда высокого давления сравнивались биоэвристики  $AO$ ,  $EPO$ ,  $STOA$ ,  $FA$ ,  $MPA$ ,  $ChSA$ ,  $MHDA$ ,  $HNO$ ,  $GWO$ ,  $MFO$ ,  $SHO$ ,  $WOA$ ,  $DA$ . Для задачи сварки балки сравнивались биоэвристики  $AO$ ,  $BOA$ ,  $MHDA$ ,  $SMA$ ,  $DA$ ,  $TSA$ ,  $SOA$ ,  $EPO$ ,  $ABC$ ,  $ChSA$ ,  $MFO$ ,  $MPA$ ,  $SHO$ ,  $GWO$ ,  $WOA$ ,  $HNO$ ,  $SFO$ .

Чтобы определить, какой алгоритм лучше всего подходит для этих инженерных задач, был применен подход, основанный на принципе Кондорсе [30] для определения победителя при голосовании за кандидатов. В этом контексте сравниваемые алгоритмы представляют кандидатов, а их решения для каждой из задач указывают на избирателей. Согласно принципу Кондорсе победителем на выборах объявляется кандидат, который превосходит остальных при парном сравнении. По результатам работы сравниваемых алгоритмов на трех бенчмарках были определены четыре лучших биоэвристики: алгоритм императорских пингвинов ( $EPO$ , 45 голосов), алгоритм охоты птицы-хищника ( $AO$ , 42 голоса), алгоритм хамелеона ( $ChSA$ , 34 голоса) и алгоритм африканских стервятников ( $AVOA$ , 32 голоса).

В последние годы биоэвристики стали активно применяться для решения широкого спектра задач в таких областях как инженерное проектирование, цифровая обработка изображений и компьютерное зрение, сети и коммуникации, энергетика и энергоменеджмент, анализ данных и машинное обучение, робототехника, медицинская диагностика, информатика и многие другие. В табл. 2 представлены современные области применения различных классов биоэвристик для решения конкретных оптимизационных задач.

Таблица 2

## Области применения биоэвристик

Область применения	Биоэвристики	Задачи
Инженерное проектирование	GSA, SA, GP, WOA	Проектирование антенн; Оптимизация авиационных конструкций; Выбор параметров обработки деталей.
Обработка изображений и компьютерное зрение	ACO, PSO, BA, ABC, BMO, CSA, EPO, PBA	Сегментация изображений, обнаружения областей интереса на цифровых изображениях, цветовая экстракция.
Компьютерные сети и коммуникации	GA, ABC, PSO, CS, EPO, ESA, MHSA, MBO, MMA	Оптимальное распределение сети сенсорных датчиков, обнаружение сообществ в сети, обнаружение вредоносных URL-адресов и спама, криптоанализ, задача коммивояжера.
Энергетика и энергоменеджмент	PSO, SSO, GWO, KHA, BBO, WOA, FA, CSA, HHO, COR, MFO, MSA	Системы хранения энергии, управления домашней энергоустановкой, регулирование нагрузки в энергосистеме, управление мощностью, диспетчеризация, реконфигурация, оптимальное размещение конденсаторов, ветрогенераторов.
Анализ данных и машинное обучение	WOA, GWO, SA, FA, PSO, GA, GSA, ABC, BNMR, HuS, GOA, ALO, RIO	Выбор информативных признаков для классификации объектов и ранжирования многомерных данных, кластеризация данных, обучение сверточных нейросетей, настройка параметров в SVM-методе машинного обучения.
Робототехника	GSA, SA, GP, WOA	Планирование оптимизация траектории роботов, автономная навигация полета БПЛА, разработка контроллеров для роботизированных платформ.
Медицинская диагностика	ACO, PSO, BA, ABC, BMO, CSA, EPO, PBA	Обработка медицинских изображений, прогнозирование заболеваний путем анализа больших наборов данных, диагноз онкологии, болезни Паркинсон с использованием данных микрочипов.
Информатика и другие области	BA, DEO, SWA, SMO, ChOA, SHO, LA, BNMR, ESA, MPA, BBO, BNSS, FOA, DFO, DA	Оценка подверженности наводнениям, планирование работы магазина, оптимизации стальных каркасных конструкций, оптимизация добычи природного газа, токсичность лекарственного средства, регулирование орошения, подводная акустическая классификация, укрепление почвы, оптимизация протоннообменных процессов в топливных элементах.

Кроме того, существует большое количество программных фреймворков для эволюционных и роевых алгоритмов на разных языках, таких как *C++*, *Java*, *Matlab* или *Python*. Например, фреймворк *Evolutional Computation Framework* и *ParadisEO* на *C++* [27]; *jMetal* на *Java*, *jMetalPy* на *Python* [28]; *PlatEMO* в *Matlab* [29] и другие. Каждый из них реализует наиболее популярные алгоритмы *GA*, *DE*, *PSO*, *ABC*.

**Заключение.** Проведен анализ современного состояния исследований в области разработки биоэвристик, включая их категоризацию, тестирование и области применения. Разработана многоуровневая иерархическая система классификации биоэвристик, позволяющая однозначно идентифицировать как новые, так и существующие биоэвристики, обосновывать их эффективность для решения проблемно-ориентированных задач.

Наиболее информативным критерием классификации биоэвристик является поведенческий критерий, наиболее цитируемым классом биоэвристик – алгоритмы роевого интеллекта. Наиболее цитируемым является роевой алгоритм *PSO*, на его основе построены многие другие биоэвристики. Далее, по уровню цитируемости следует генетический алгоритмы и алгоритм дифференциальной эволюции.

Многие новые биоэвристики имеют очень ограниченное влияние, редко цитируются после первоначальной публикации, не появляется новых статей с их улучшенными версиями или применением для решения других задач.

Общедоступная эталонная программная реализация предоставляет возможность сравнения производительности биоэвристик. Существует большое количество программных фреймворков для эволюционных и роевых алгоритмов на разных языках, таких как *C++*, *Java*, *Matlab* или *Python*.

Наметилась тенденция к гибридизации биоэвристик в одном оптимизаторе. Однако требуются убедительные доказательства, что результаты компенсируют увеличение сложности по сравнению с отдельными алгоритмами. Заметна также тенденция проводить сравнение производительности биоэвристик, используя статистическую проверку гипотез на бенчмарках.

Заслуживает внимания применение биоэвристик для решения следующих типов задач:

- ◆ динамической и стохастической оптимизации;
- ◆ многокритериальной оптимизации;
- ◆ мультимодальной оптимизации;
- ◆ многомерной оптимизации;
- ◆ меметической оптимизации, в которых комбинируется множество поисковых алгоритмов [31];
- ◆ оптимизации и адаптации настроек параметров биоэвристик для достижения баланса между скоростью сходимости и диверсификацией пространства поиска решений [32].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Wolpert D., Macready W.* The no free lunch theorems for optimization // *IEEE Trans. Evol. Comp.* – 1997. – No. 1. – P. 67-82.
2. *Sorensen K., Sevaux M., Glover F.* A history of metaheuristics. – *Handbook of heuristics.* – 2017. arxiv:1704.00853v1.
3. *Molina D., Poyatos J., Del Ser J., Garcí'a S., Hussain A., Herrera F.* Comprehensive taxonomies of nature- and bio-inspired optimization: inspiration versus algorithmic behavior, critical analysis and recommendations. – <https://arxiv.org/abs/2002.08136v3>.
4. *Almufiti S.M., Marqas R.B., Saeed V.A.* Taxonomy of bio-inspired optimization algorithms // *Jour. Adv. Comput. Sci. Technol.* – 2019. – Vol. 8 (2). – P. 23.
5. *Sorensen K., Glover F.W.* Metaheuristics. *Encyclopedia of operations research and management science.* – Springer, NY., 2013. – P. 960-970.
6. *Binitha S., Sathya S.S.* A survey of bio inspired optimization algorithms // *Int. Jour. Soft. Comput. Eng. (IJSCE).* – 2012. – Vol. 2 (2). – P. 137-151.
7. *Rajpurohit J., Sharma T.K., Abraham A.* Glossary of metaheuristic algorithms // *Int. Jour. Comput. Inf. Syst. Ind. Manag. Appl.* – 2017. – Vol. 9. – P. 181-205.
8. *Nesmachnow S.* An overview of metaheuristics: accurate and efficient methods for optimization // *Int. Jour. Metaheuristics.* – 2014. – Vol. 3 (4). – P. 320.
9. *Pazhaniraja N., et. al.* A study on recent bio-inspired optimization algorithms // *4th int. conf. on signal processing, communication, and network (ICSCN).* – IEEE, 2017.
10. *Nabaei A., et. al.* Topologies and performance of intelligent algorithms: a comprehensive review // *Artif. Intell. Rev.* – 2016. – Vol. 49 (1). – P. 79-103.
11. *Fausto F., et. al.* From ants to whales: metaheuristics for all tastes // *Artif. Intell. Rev.* – 2019. – Vol. 53 (1). – P. 753-810.

12. *Sergienko I.V., Hulianytskyi L.F., Sirenko S.I.* Classification of applied methods of combinatorial optimization // *Cybern. Syst. Anal.* – 2009. – Vol. 45 (5). – P. 732-741.
13. *Курейчик В.В., Родзин С.И.* Вычислительные модели биоэвристик, основанных на физических и когнитивных процессах (обзор) // *Информационные технологии.* – 2021. – Т. 27, № 11. – С. 563-574.
14. *Lones M.A.* Metaheuristics in nature-inspired algorithms // *Proc. conf. companion on Genetic and evolutionary computation companion (GECCO).* – ACM Press, 2014.
15. *Sergeyev Y.D., Kvasov D.E., Mukhametzhonov M.S.* On the efficiency of nature-inspired metaheuristics in expensive global optimization with limited budget // *Sci. Rep.* – 2018. – Vol. 8 (1).
16. *Родзин С.И., Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А.* Биоэвристики: теория, алгоритмы и приложения. – Чебоксары: ИД «Среда», 2019. – 224 с.
17. *Hong L., Drake J.H., Woodward J.R., Ozcan E.* A hyper-heuristic approach to automated generation of mutation operators for evolutionary programming // *Appl. Soft. Comput.* – 2018. – Vol. 62. – P. 162-175.
18. *Yang X.S.* Nature-Inspired Optimization Algorithms. – Elsevier, 2014.
19. *Fister I., et al.* A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization // *Elektrotehniski Vestnik.* – 2013. – Vol. 80 (3). – P. 1-7.
20. *Kumar A.* Bio inspired computing – A review of algorithms and scope of applications // *Expert Systems with Applications.* – 2016. – Vol. 59. – P. 20-32.
21. *Punnathanam V., Kotecha P.* Yin-Yang-pair Optimization: A novel lightweight optimization algorithm // *Eng. Applications of Artificial Intelligence.* – 2016. – Vol. 54. – P. 62-79.
22. *Dokeroglu T., Sevinc E., Kucukyilmaz T., Cosar A.* A survey on new generation metaheuristic algorithms // *Comput. Ind. Eng.* – 2019. – Vol. 137. – P. 106040.
23. *Родзин С.И., Родзина Л.С.* Биоинспирированный поиск решений: теория и приложения для обработки проблемно-ориентированных знаний в геоинформатике // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2015. – № 4. – С. 203-216.
24. *LaTorre A., et al.* Fairness in bio-inspired optimization research: a prescription of methodological guidelines for comparing meta-heuristics. – 2020. Published arxiv:2004.09969v1.
25. *Del Ser J., et al.* Bio-inspired computation: where we stand and what's next // *Swarm Evol. Comput.* – 2019. – Vol. 48. – P. 220-250.
26. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И.* Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
27. *Liefooghe A., Jourdan L., Talbi E.G.* A software framework based on a conceptual unified model for evolutionary multiobjective optimization: ParadisEO-MOEO // *Europ. Jour. of Operational Research.* – 2011. – Vol. 209 (2). – P. 104-112.
28. *Benítez-Hidalgo A., Nebro A.J., Garcia-Nieto J., Oregi I., Ser J.D.* jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics // *Swarm and Evol. Computation.* – 2019. – Vol. 51. – P. 100598.
29. *Tian Y., et al.* A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization // *IEEE Computational Intelligence Magazine.* – 2017. – Vol. 12 (4). – P. 73-87.
30. *Петровский А.Б.* Теория принятия решений. – М.: Изд. Центр «Академия», 2009. – 400 с.
31. *Rodzin S., Rodzina O.* Metaheuristics memes and biogeography for trans computational combinatorial optimization problems // *Proc. of the 6th Int. Conf. – Cloud System and Big Data Engineering.* – 2016. – P. 1-5.
32. *El-Khatib S., Rodzin S., Skobtsov Yu.* Investigation of optimal heuristical parameters for mixed ACO-k-means segmentation algorithm for MRI images // *Proc. 3rd Int. Scientific Conf. on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSM).* – 2016. – Vol. 51. – P. 216-221.

## REFERENCES

1. *Wolpert D., Macready W.* The no free lunch theorems for optimization, *IEEE Trans. Evol. Comp.*, 1997, No. 1, pp. 67-82.
2. *Sorensen K., Sevaux M., Glover F.* A history of metaheuristics. Handbook of heuristics. 2017. arxiv:1704.00853v1.
3. *Molina D., Poyatos J., Del Ser J., Garcí'a S., Hussain A., Herrera F.* Comprehensive taxonomies of nature- and bio-inspired optimization: inspiration versus algorithmic behavior, critical analysis and recommendations. Available at: <https://arxiv.org/abs/2002.08136v3>.

4. *Almufiti S.M., Marqas R.B., Saeed V.A.* Taxonomy of bio-inspired optimization algorithms, *Jour. Adv. Comput. Sci. Technol.*, 2019, Vol. 8 (2), pp. 23.
5. *Sorensen K., Glover F.W.* Metaheuristics. Encyclopedia of operations research and management science. Springer, NY., 2013, pp. 960-970.
6. *Binitha S., Sathya S.S.* A survey of bio inspired optimization algorithms, *Int. Jour. Soft. Comput. Eng. (IJSCE)*, 2012, Vol. 2 (2), pp. 137-151.
7. *Rajpurohit J., Sharma T.K., Abraham A.* Glossary of metaheuristic algorithms, *Int. Jour. Comput. Inf. Syst. Ind. Manag. Appl.*, 2017, Vol. 9, pp. 181-205.
8. *Nesmachnow S.* An overview of metaheuristics: accurate and efficient methods for optimization, *Int. Jour. Metaheuristics*, 2014, Vol. 3 (4), pp. 320.
9. *Pazhaniraja N., et. al.* A study on recent bio-inspired optimization algorithms, *4th int. conf. on signal processing, communication, and network (ICSCN)*. IEEE, 2017.
10. *Nabaei A., et. al.* Topologies and performance of intelligent algorithms: a comprehensive review, *Artif. Intell. Rev.*, 2016, Vol. 49 (1), pp. 79-103.
11. *Fausto F., et. al.* From ants to whales: metaheuristics for all tastes, *Artif. Intell. Rev.*, 2019, Vol. 53 (1), pp. 753-810.
12. *Sergienko I.V., Hulianytskyi L.F., Sirenko S.I.* Classification of applied methods of combinatorial optimization, *Cybern. Syst. Anal.*, 2009, Vol. 45 (5), pp. 732-741.
13. *Kureychik V.V., Rodzin S.I.* Vychislitel'nye modeli bioevristik, osnovannykh na fizicheskikh i kognitivnykh protsessakh (obzor) [Computational models of bio heuristics based on physical and cognitive processes (review)], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2021, Vol. 27, No. 11, pp. 563-574.
14. *Lones M.A.* Metaheuristics in nature-inspired algorithms, *Proc. conf. companion on Genetic and evolutionary computation companion (GECCO)*. ACM Press, 2014.
15. *Sergeyev Y.D., Kvasov D.E., Mukhametzhano M.S.* On the efficiency of nature-inspired metaheuristics in expensive global optimization with limited budget, *Sci. Rep.*, 2018, Vol. 8 (1).
16. *Rodzin S.I., Skobtsov Yu.A., El'-Khatib S.A.* Bioevristiki: teoriya, algoritmy i prilozheniya [Bioheuristics: theory, algorithms, and applications]. Cheboksary: ID «Sreda», 2019, 224 p.
17. *Hong L., Drake J.H., Woodward J.R., Ozcan E.* A hyper-heuristic approach to automated generation of mutation operators for evolutionary programming, *Appl. Soft. Comput.*, 2018, Vol. 62, pp. 162-175.
18. *Yang X.S.* Nature-Inspired Optimization Algorithms. Elsevier, 2014.
19. *Fister I., et.al.* A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization, *Elektrotehniski Vestnik*, 2013, Vol. 80 (3), pp. 1-7.
20. *Kumar A.* Bio inspired computing – A review of algorithms and scope of applications, *Expert Systems with Applications*, 2016, Vol. 59, pp. 20-32.
21. *Punnathanam V., Kotecha P.* Yin-Yang-pair Optimization: A novel lightweight optimization algorithm, *Eng. Applications of Artificial Intelligence*, 2016, Vol. 54, pp. 62-79.
22. *Dokeroglu T., Sevinc E., Kucukyilmaz T., Cosar A.* A survey on new generation metaheuristic algorithms, *Comput. Ind. Eng.*, 2019, Vol. 137, pp. 106040.
23. *Rodzin S.I., Rodzina L.S.* Bioinspirirovannyi poisk resheniy: teoriya i prilozheniya dlya obrabotki problemno-orientirovannykh znaniy v geoinformatike [Bioinspired search for solutions: theory and applications for processing problem-oriented knowledge in geoinformatics], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4, pp. 203-216.
24. *LaTorre A., et. al.* Fairness in bio-inspired optimization research: a prescription of methodological guidelines for comparing meta-heuristics. – 2020. Published arxiv:2004.09969v1.
25. *Del Ser J., et. al.* Bio-inspired computation: where we stand and what's next, *Swarm Evol. Comput.*, 2019, Vol. 48, pp. 220-250.
26. *Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I.* Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy [Theory of evolutionary computing]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 260 p.
27. *Liefooghe A., Jourdan L., Talbi E.G.* A software framework based on a conceptual unified model for evolutionary multiobjective optimization: ParadisEO-MOEO, *Europ. Jour. of Operational Research*, 2011, Vol. 209 (2), pp. 104-112.
28. *Benítez-Hidalgo A., Nebro A.J., García-Nieto J., Oregi I., Ser J.D.* jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics, *Swarm and Evol. Computation*, 2019, Vol. 51, pp. 100598.

29. Tian Y., et. al. A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2017, Vol. 12 (4), pp. 73-87.
30. Petrovskiy A.B. Teoriya prinyatiya resheniy [Theory of decision-making]. Moscow: Izd. Tsentr «Akademiya», 2009, 400 p.
31. Rodzin S., Rodzina O. Metaheuristics memes and biogeography for trans computational combinatorial optimization problems, *Proc. of the 6th Int. Conf. – Cloud System and Big Data Engineering*, 2016, pp. 1-5.
32. El-Khatib S., Rodzin S., Skobtsov Yu. Investigation of optimal heuristical parameters for mixed ACO-k-means segmentation algorithm for MRI images, *Proc. 3rd Int. Scientific Conf. on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM)*, 2016, Vol. 51, pp. 216-221.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

**Родзин Сергей Иванович** – Южный федеральный университет; e-mail: srodzin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371673; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; профессор.

**Rodzin Sergey Ivanovich** – Southern Federal University; e-mail: srodzin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371673; the department of software engineering; professor.

## 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 ссылку 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/>.