



№5-2022

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Модели и методы обработки информации
- Моделирование процессов и систем
- Связь, навигация и радиолокация
- Вычислительные
и информационно-управляющие системы

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

№ 5 (229). 2022 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); Бородинский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Боженюк А.В.; Веселов Г.Е.; Гайдук А.Р.; Горбанёва О.И.; Каляев И.А.; Коноплев Б.Г.; Касьянов А.О.; Левин И.И.; Куповых Г.В.; Лысенко И.Е.; Малюков С.П.; Медведев М.Ю.; Мельник Э.В.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Семенихина Д.В.; Сергеев Н.Е.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Тополов В.Ю.; Турулин И.И.; Угольницкий Г.А.; Усов А.Б.; Федосов В.П.; Целых А.Н.; Юханов Ю.В.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Самойлов А.Н.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 29.12.2022 г. Формат 70×108 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 23,5. Уч.-изд. л. – 19,5.

Заказ № 8828. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. 8(863)2478051.

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 (863) 247-80-51.

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

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

М.Д. Ясир, Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭВА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ МЕТОДОВ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОИСКА И НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	6
Д.М. Зарубин, В.П. Добрица, Е.А. Титенко МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ПЕРЕДАВАЕМЫХ СООБЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ ADS-B С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ	17
В.Е. Долгой, И.Э. Гамолина АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО ПОЛИНОМИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕПРЕРЫВНЫХ ДРОБЕЙ	29
П.Ю. Чудинов, Л.К. Бабенко, Ю.И. Рогозов АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В СЕМАНТИЧЕСКИХ СЕТЯХ	37
О.Б. Лебедев, А.А. Жиглатый КО-ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ РАЗМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУБПОПУЛЯЦИЙ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ СТРАТЕГИЯМИ ПОИСКА.....	47
Т.Н. Кондратьева, Е.Р. Мунтян, И.Ф. Развеева, Г.С. Оноре РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА ТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕНДА РЫНКА НА ПЛАТФОРМЕ METATRADER 5.....	63
С.П. Новиков МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ	75
С.В. Онищенко, А.В. Козловский, Э.В. Мельник РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ	86
Н.В. Драгныш РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ.....	97

РАЗДЕЛ II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Е. М. Герасименко, В.В. Стеценко АНАЛИЗ ТОНАЛЬНОСТИ ТЕКСТОВЫХ ОТЗЫВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОНАЛЬНЫХ СЛОВАРЕЙ И КАРДИНАЛЬНОСТИ НЕЧЕТКОГО МНОЖЕСТВА	106
А.Э. Саак, Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ЗАЯВОК.....	116
А.Н. Беликов, С.А. Кучеров, В.С. Лапшин, Ю.Ю. Липко, А.С. Свиридов АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ КОММУНИКАЦИИ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ	128
С.М. Гушанский, В.С. Потапов ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВОГО ЯДРА НА ПЛИС	141
В.Н. Лутай, Н.Ш. Хусаинов ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ.....	152
И.А. Попов СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АВТОПИЛОТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ САМОЛЕТА-АМФИБИИ БЕ-200 ВО ВРЕМЯ ЗАБОРА ВОДЫ	161

Г.В. Куповых, А.Г. Клово, Д.В. Тимошенко, Т.В. Кудринская, О.В. Белоусова	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕДУКЦИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ	171
В.В. Семенистый, И.Э. Гамolina	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ЯВНЫМ И НЕЯВНЫМ РАЗНОСТНЫМ СХЕМАМ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ.....	181
О.И. Атакищев, В.Г. Грибулин, В.Е. Ананьев, Е.А. Титенко	
РЕКОНФИГУРАЦИОННЫЕ МЕТАГРАММАТИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОЭТАПНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ АТАК	189

РАЗДЕЛ III. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И РАДИОЛОКАЦИЯ

А.Н. Конев, А.А. Комаров, П.В. Луферчик, П.В. Штро	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОВОГО ФОНА НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА СИСТЕМЫ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СВЯЗИ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ	202
Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд, К.Е. Румянцев	
ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОПОЛОСНОЙ КВАДРАТУРНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ НА ПОДНЕСУЩИХ ЧАСТОТАХ В КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КОММУНИКАЦИИ	209
В.П. Федосов, Т.Т. Пацюк	
АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МІМО-OFDM В УСЛОВИЯХ АКТИВНЫХ ПОМЕХ ...	221

РАЗДЕЛ IV. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

М.Ю. Медведев, В.А. Костюков, М.Ю. Бутенко, В.Г. Гисцов, И.Д. Евдокимов	
АППАРАТНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ГРУППЫ БПЛА	230
А.В. Проскуряков	
КОНЦЕПЦИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ОСНОВЕ ВЕРИФИКАЦИИ ФРАГМЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	244
Р.Н. Набиев, А.А. Абдуллаев, Г.И. Гараев, В.А. Аббасов	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КОНВЕРТОПЛАНОВОГО ТИПА	258

CONTENT

SECTION I. MODELS AND METHODS OF INFORMATION PROCESSING

M.J. Yaser, L.A. Gladkov, N.V. Gladkova SOLUTION OF THE ELEMENTS LOCATION PROBLEM IN DIGITAL COMPUTER EQUIPMENT ON THE BASIS OF INTEGRATION OF EVOLUTIONARY SEARCH AND FUZZY CONTROL METHODS.....	6
D.M. Zarubin, V.P. Dobritsa, E.A. Titenko A METHOD ENCODING TRANSMITTED MESSAGES IN THE ADS-B SYSTEM USING A CELLULAR AUTOMATIC	18
V.E. Dolgoy, I.E. Gamolina ALGORITHM OF THE REDUCED POLYNOMIAL EQUATIONS SOLUTION USING CONTINUED FRACTIONS	30
P.Y. Chudinov, L.K. Babenko, Y.I. Rogozov ANALYSIS OF PROBLEMS OF INFORMATION PROTECTION IN SEMANTIC NETWORKS	38
O.B. Lebedev, A.A. Zhiglatiy CO-EVOLUTIONARY PLACEMENT ALGORITHM BASED ON INTERACTION SUBPOPULATIONS DIFFERING IN SEARCH STRATEGIES	48
T.N. Kondratieva, E.R. Muntyan, I.F. Razveeva, G.S. Onore IMPLEMENTATION OF AN EFFECTIVE METHOD OF TECHNICAL ANALYSIS FOR DETERMINING THE MARKET TREND ON THE METATRADER 5 PLATFORM	63
S.P. Novikov METHOD FOR MEASURING THE GAS-SENSITIVE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR SENSORS BY DYNAMIC RESPONSE PARAMETERS.....	76
S.V. Onishchenko, A.V. Kozlovsky, E.V. Melnik DEVELOPMENT OF A HIGH-PERFORMANCE METHOD FOR DETERMINING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF OBJECTS IN THE IMAGE.....	86
N.V. Dragnysh IMPLEMENTATION AND STUDY OF THE RANDOM NUMBER GENERATOR BASED ON PARALLEL MIXING	97

SECTION II. MODELING OF PROCESSES AND SYSTEMS

E.M. Gerasimenko, V.V. Stetsenko SENTIMENT ANALYSIS OF TEXT REVIEWS USING TONE DICTIONARIES AND FUZZY SET CARDINALITY	106
A.E. Saak, L.A. Gladkov, N.V. Gladkova INTEGRATED MODEL FOR SOLVING THE PROBLEM OF REQUEST DISPATCHING	117
A.N. Belikov, S.A. Kucherov, V.S. Lapshin, Yu.Yu. Lipko, A.S. Sviridov ANALYSIS OF THE COMMUNICATION MODELS USAGE IN THE LIFE CYCLE OF INFORMATION SYSTEMS DEVELOPMENT.....	129
S.M. Gushanskiy, V.S. Potapov STUDY OF A QUANTUM COMPUTING SYSTEM AND IMPLEMENTATION OF A QUANTUM CORE ON FPGA	141
V.N. Lutay, N.S. Khusainov INCREASING THE STABILITY OF LINEAR REGRESSION.....	152
I.A. Popov SYNERGETIC SYNTHESIS OF AN AUTOPILOT TO CONTROL THE BE-200 AMPHIBIAN AIRCRAFT DURING WATER INTAKE	161

G.V. Kupovykh, A.G. Klovo, D.V. Timoshenko, T.V. Kudrinskaya, O.V. Belousova	
DETERMINATION OF THE REDUCTION COEFFICIENT OF THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD IN THE SURFACE LAYER.....	172
V.V. Semenistyy, I.E. Gamolina	
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PARALLEL COMPUTING EFFICIENCY FOR EXPLICIT AND IMPLICIT DIFFERENCE SCHEMES FOR COMPUTATIONAL AERODYNAMICS PROBLEMS	182
O.I. Atakischev, V.G. Gribunin, V.E. Ananiev E.A. Titenko	
RECONFIGURATION METAGRAMMATICS FOR DESCRIPTION AND MODELING OF MULTI-STAGE COMPLEX ATTACKS.....	190

SECTION III. COMMUNICATIONS, NAVIGATION AND RADAR

A.N. Konev, A.A. Komarov, P.V. Luferchik, P.V. Shtro	
INVESTIGATION OF THE INTERFERENCE BACKGROUND AT THE INPUT OF THE RECEIVER OF THE NEAR-FIELD MAGNETIC COMMUNICATION SYSTEM IN URBAN CONDITIONS.....	202
Hussein Ahmed Mahmood, K.Y. Rumyantsev	
FORMATION OF A SINGLE SIDEBAND QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING OF RADIO SIGNALS AT SUB-CARRIER FREQUENCIES IN A COHERENT OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM.....	210
V.P. Fedosov, T.T. Patsyuk	
ALGORITHM FOR PROCESSING SPACE-TIME SIGNALS BASED ON THE MIMO-OFDM SYSTEM UNDER ACTIVE INTERFERENCE	221

SECTION IV. COMPUTING AND INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS

M.Y. Medvedev, V.A. Kostyukov, M.Y. Butenko, V.G. Gistsov, I.D. Evdokimov	
THE CONCEPT OF CREATING A PROMISING SYSTEM FOR RECHARGING AN AUTONOMOUS GROUP OF UAVS	230
A.V. Proskuryakov	
THE CONCEPT OF A MEDICAL INFORMATION SYSTEM FOR SOLVING PROBLEMS OF DISEASE DIAGNOSIS BASED ON VERIFICATION OF FRAGMENTS OF MEDICAL BIOLOGICAL OBJECTS	244
R.N. Nabiyeu, Q.I. Qarayev, A.A. Abdullayev, V.A. Abbasov	
DETERMINATION OF THE CENTER OF GRAVITY OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE OF A TILTROTOR TYPE	258

Раздел I. Модели и методы обработки информации

УДК 519.712.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-6-17

М.Д. Ясир, Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭВА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ МЕТОДОВ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОИСКА И НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается задача размещения элементов электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА). Проведен анализ современного состояния исследований по данной теме, отмечена актуальность рассматриваемой задачи. Подчеркнута важность разработки новых эффективных методов решения задач конструкторского проектирования. Отмечена перспективность разработки и использования гибридных подходов и моделей для решения сложных слабоформализованных задач проектирования и оптимизации. Приведена постановка задачи размещения элементов схем ЭВА. Отмечена важность качественного решения задачи размещения с точки зрения успешного выполнения последующих этапов проектирования. Проведен анализ различных подходов и алгоритмов решения задачи размещения. Приведены варианты выбора различных критериев оценки качества размещения. Предложен комплексный аддитивный критерий для оценки качества размещения. Приведена целевая функция и ограничения рассматриваемой задачи размещения как задачи оптимизации. Предложен гибридный подход к решению задачи размещения. Для повышения эффективности и сокращения времени работы алгоритма, предложена модель параллельного многопопуляционного генетического алгоритма. Для синхронизации эволюционных процессов в многопопуляционном генетическом алгоритме разработан модифицированный оператор миграции. Выполнен анализ эффективности работы предложенного оператора миграции и сформулированы рекомендации по его использованию. С целью увеличения быстродействия алгоритма решения задачи размещения предложена модель организации параллельных эволюционных вычислений за счёт использования многопоточности на локальном уровне. Описаны принципы работы модуля нечеткого управления. Описана процедура логического вывода с использованием базы правил. Предложена структура многослойной нейронной сети, реализующей функцию Гаусса. Предложена модель нечеткого логического контроллера для динамического изменения значений управляющих параметров генетического алгоритма. Определены управляющие параметры нечеткого логического контроллера. Предлагаемый гибридный алгоритм реализован в виде прикладной программы. Были проведены серии вычислительных экспериментов для определения эффективности разработанного алгоритма и выбора оптимальных значений управляющих параметров.

Автоматизация проектирования; задача размещения элементов ЭВА; биоинспирированные алгоритмы; гибридные методы; параллельные генетические алгоритмы; нечеткое управление.

M.J. Yaser, L.A. Gladkov, N.V. Gladkova

SOLUTION OF THE ELEMENTS LOCATION PROBLEM IN DIGITAL COMPUTER EQUIPMENT ON THE BASIS OF INTEGRATION OF EVOLUTIONARY SEARCH AND FUZZY CONTROL METHODS

The problem of elements placement in digital computing equipment are consider in the article. The analysis of the current state of research on this topic is carried out, the relevance of the problem under consideration is noted. The importance of developing new effective methods for solving engineering design problems is emphasized. The prospects of developing and using hybrid

approaches and models for solving complex semi-formalized design and optimization problems are noted. The statement of the problem of placement of circuit elements of digital computing equipment is given. The importance of a qualitative solution of the placement problem from the point of view of the successful implementation of the subsequent stages of design is noted. The analysis of various approaches and algorithms for solving the placement problem is carried out. Options for choosing various criteria for assessing the quality of placement are given. A complex additive criterion for assessing the quality of placement is proposed. The objective function and limitations of the considered placement problem as an optimization problem are given. A hybrid approach to solving the placement problem is proposed. To increase the efficiency and reduce the running time of the algorithm, a model of a parallel multipopulation genetic algorithm is proposed. To synchronize evolutionary processes in a multipopulation genetic algorithm, a modified migration operator has been developed. An analysis of the efficiency of the proposed migration operator has been carried out and recommendations for its use have been formulated. In order to increase the speed of the algorithm for solving the placement problem, a model for organizing parallel evolutionary computations through the use of multithreading at the local level is proposed. The principles of operation of the fuzzy control module are described. The procedure of logical inference using the rule base is described. The structure of a multilayer neural network that implements the Gaussian function is proposed. A model of a fuzzy logic controller for dynamically changing the values of control parameters of a genetic algorithm is proposed. The control parameters of the fuzzy logic controller are determined. The proposed hybrid algorithm is implemented as an application program. A series of computational experiments were carried out to determine the efficiency of the developed algorithm and to select the optimal values of the control parameters.

Automation of digital computer design; element placement problem; bioinspired algorithms; hybrid methods; parallel genetic algorithms; fuzzy control.

Введение. В настоящее время процесс проектирования невозможно представить без применения вычислительной техники. Сложность проектируемых устройств, число элементов и связей между ними непрерывно растет. На данный момент идет об устройствах содержащих порядка 10^4 элементов. Решать возникающие задачи такого уровня сложности путем полного перебора вариантов пока невозможно [1]. В некоторых случаях отсутствуют детерминированные вычислительные методы, что не позволяет решить задачу выполнения проектирования в полностью автоматическом режиме. Поэтому актуальной остается задача разработки эвристических методов оптимизации, позволяющих получать приемлемые по качеству решения за полиномиальное время.

Совершенствование технологий изготовления привело к пересмотру некоторых принципов, на которых основан процесс физического проектирования [2]. Это в свою очередь привело к пересмотру актуальных критериев оценки качества размещения. Использувавшиеся ранее критерии, построенные на модели оценки временных задержек пропорционально суммарной длине соединений стали неактуальными, изменилась концепция процесса физического проектирования вычислительных устройств.

Одним из основных трендов современной науки является гибридизация, т.е. создание новых систем, моделей и методов, подразумевающих интеграцию научных подходов различной физической природы. Хорошие результаты позволяет получить использование биоинспирированных алгоритмов в качестве инструмента поиска оптимальных решений. В настоящее время предложено большое число разновидностей биоинспирированных алгоритмов для решения различных задач оптимизации [3, 4]. Особенно эффективно использование таких систем для решения сложных слабо формализованных задач, в том числе задач проектирования и оптимизации [5].

В данной статье предлагается гибридный подход к решению задачи размещения элементов ЭВА на основе интеграции различных подходов, таких как, эволюционные алгоритмы поиска, нейронные сети, нечеткие методы управления параметрами алгоритма и механизмы распараллеливания вычислений [6].

Постановка задачи. После решения задачи разбиения электрических цепей можно выполнить оценочный расчет площади, занимаемой каждым блоком и определить необходимое число контактов (выводов). Перед началом трассировки, проектировщику нужно расположить блоки на поверхности кристалла и соединить их выводы между собой в соответствии с заданным списком соединений. Расположение блоков осуществляется на этапе размещения, а соединение осуществляется на этапе трассировки [5].

На этапе размещения элементы должны быть расположены на рабочей поверхности так, чтобы любые два блока не имели взаимного перекрытия, и, при этом, оставалось достаточно места для проведения соединений. Элементы должны быть размещены таким образом, чтобы минимизировать занимаемую площадь.

Для простоты предполагается, что все блоки имеют прямоугольную форму. Как правило, для определения формы блока используют соотношение сторон, т.е. отношение высоты блока к его ширине. Для определения допустимых размеров задают верхнюю и нижнюю границы соотношения сторон.

Алгоритмы размещения на уровне платы нацелены на минимизацию числа слоев при трассировке при соблюдении требований по производительности. Длина критических связей в высокопроизводительных цепях очень важна, следовательно, элементы таких цепей должны размещаться максимально близко друг к другу. Другой важнейшей проблемой является соблюдение температурного режима. Теплоотвод в схеме должен быть равномерным, значит блоки, выделяющие наибольшее количество тепла, не должны располагаться близко друг к другу. Эти и другие требования могут противоречить друг другу.

Пусть задано множество элементов $E_1, E_2, \dots, E_n$, которые должны быть размещены на рабочей поверхности. Известны габаритные размеры (высота h_i и ширина w_i) каждого элемента E_i , $1 \leq i \leq n$. Также задано множество цепей $N = \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_m\}$, множество свободных позиций $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ и множество прямоугольных областей $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_k\}$, в которых будет выполняться трассировка. Оценочную длину цепи N_i , $1 \leq i \leq m$ обозначим как L_i .

Тогда задача размещения состоит в том, чтобы найти для каждого элемента множества E подходящую по размеру позицию на рабочей поверхности так, чтобы соблюдались следующие условия:

1. Любой элемент множества E_i можно поместить в одну из свободных позиций множества R_i .
2. Никакие две позиции не перекрываются, то есть $R_i \cap R_j = \emptyset$, $1 \leq i, j \leq n$.
3. Размещение является трассируемым, т.е. площади Q_i , $1 \leq j \leq k$, достаточно для трассировки всех цепей.
4. Общая площадь прямоугольника, ограничивающего области R и Q , является минимальной.

5. Общая длина соединений $\sum_{i=1}^m L_i$ минимизируется. При наличии в схеме вы-

сокопроизводительных цепей длина самой длинной цепи $\max\{L_i \mid i = 1, \dots, m\}$ минимизируется.

В качестве критерия оптимизации используется аддитивная функция:

$$F = \min_{z_j \in Z} (k \cdot O(L(z_j)) + P(S_{\text{общ}}(z_j))),$$

где z_j – текущий вариант размещения; k – весовой коэффициент; $S_{\text{общ}}$ – суммарная площадь перекрытия элементов; $O(L(z_j))$ – оценка длины соединений; $P(S_{\text{общ}}(z_j))$ – штраф за перекрытие площадей.

Описание гибридного алгоритма. Для решения задачи размещения предложен параллельный многопопуляционный генетический алгоритм. Он предполагает параллельное выполнение эволюционных процессов на нескольких популяциях. Для обмена особями используется островная модель параллельного генетического алгоритма [7].

В островной модели синхронизация параллельных процессов осуществляется в точках миграции. Миграция осуществляется при наступлении определённых событий, которые могут произойти в любой популяции. При наступлении события в одной из популяций, выполнение эволюции приостанавливается. Миграция осуществляется между двумя соседними популяциями [8].

С помощью оператора миграции выполняется обмен решениями между популяциями. Хромосомы для миграции отбираются из хромосом популяции, имеющих лучшее значение функции пригодности. Затем выполняется обмен между популяциями с помощью копирования нескольких решений с лучшими значениями функции пригодности. Чтобы размер популяции не изменялся, из популяции одновременно удаляется такое же количество хромосом с худшим значением функции пригодности. На рис. 1 представлена схема предложенной модели параллельного генетического алгоритма, выполняемого на 2-х популяциях [9–14]. На практике количество популяций может быть значительно больше.

Важно правильно подобрать частоту выполнения оператора миграции (интервал времени между миграциями) и число хромосом, участвующих в миграции. При слишком большой частоте возникает опасность перемешивания решений и преждевременной сходимости генетического алгоритма. Такая же ситуация возникает и при малой частоте миграции. Поэтому для определения вероятности выполнения оператора в разработанном алгоритме используется модуль нечёткого управления. Вероятность выполнения оператора миграции, наряду с вероятностями кроссинговера и мутации, определяется на основе данных об эффективности эволюции в каждом процессе.

Увеличение быстродействия алгоритма решения задачи размещения достигается путем организации параллельных эволюционных вычислений, а также за счёт использования многопоточности на локальном уровне, при расчёте значений целевых функций. Вычисление значения целевой функции каждой хромосомы выполняется в отдельном потоке. Популяция делится на S/N блоков хромосом, где S – размер популяции, N – предустановленное количество потоков расчёта целевой функции. Каждый блок содержит N хромосом. Для каждой хромосомы расчёт значения целевой функции запускается в отдельном потоке. После завершения всех запущенных потоков начинается вычисление значений целевой функции хромосом следующего блока. Процесс продолжается пока не будут найдены значения целевой функции для всех хромосом. Схема процедуры распараллеливания расчёта значений ЦФ представлена на рис. 2.

Модуль нечёткого управления (нечёткий логический контроллер) состоит из четырех взаимосвязанных блоков: блок фаззификации, база правил, блок дефаззификации, блок вывода [15].

База правил состоит из набора нечетких правил [15, 16]. Каждое из нечетких правил записывается в виде логической конструкции: IF ... THEN ... С точки зрения теории множеств нечеткие правила представляют собой нечеткое отношение $R^{(k)}$. Функция принадлежности такого нечеткого множества – это нечеткая импликация

$$\mu_{R^{(k)}}(x, y) = \mu_{A^k \rightarrow B^k}(x, y), \quad (1)$$

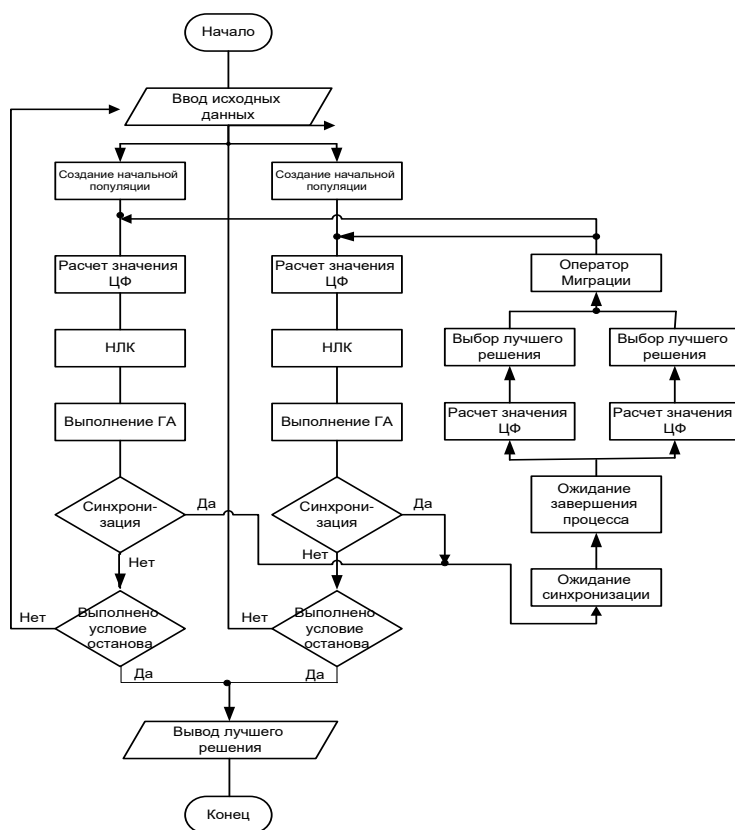


Рис. 1. Схема параллельного алгоритма

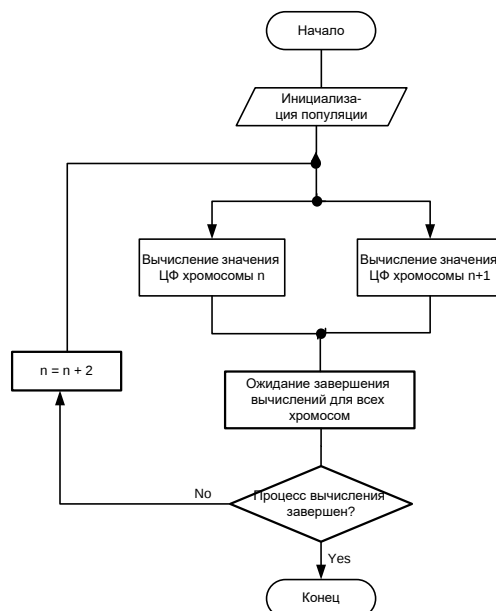


Рис. 2. Схема распараллеливания расчета целевой функции

Блок фаззификации выполняет трансформацию чётких данных в нечеткие множества. Для этой цели часто используют представление нечеткой величины в виде синглтона.

Процедура получения результата нечеткого вывода с использованием базы правил состоит из следующих шагов [18–20]:

1. Определение уровня срабатывания каждого из правил.
2. Определение результата нечеткого вывода по каждому из правил.
3. Агрегирование индивидуальных результатов нечеткого вывода в общий результат, характерный для всей базы нечетких правил.

Для оценки эффективности эволюционного процесса могут использоваться различные параметры, например, значения функции пригодности лучшего решения в популяции, средняя целевая функция текущей популяции, изменение среднего значения целевой функции популяции и т.д. [15, 22].

При разработке структуры модуля нечеткого управления необходимо также определиться с формой представления нечетких множеств. Для этого можно использовать, например, функцию Гаусса [21]:

$$\mu_{A^k}(x_i) = \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_j^k}{\sigma_j^k} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где $\bar{x}_j^k$ – центр, а σ_j^k – ширина Гауссовской кривой.

Результирующая функция модуля нечеткого управления имеет следующий вид:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \left(\prod_{i=1}^n \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_j^k}{\sigma_j^k} \right)^2 \right) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_j^k}{\sigma_j^k} \right)^2 \right) \right)}. \quad (2)$$

Каждый элемент можно задать в форме функционального блока (сумма, произведение, функция Гаусса). Объединение функциональных блоков дает многослойную нейронную сеть. Для решения поставленной задачи была использована модель нейронной сети, которая имеет 4 слоя (L1 – L4), 4 входных элемента и один выход. Элементы первого слоя реализуют вышеприведенную функцию Гаусса. Элементами нейронной сети являются мультипликаторы, сумматоры и делитель.

Модуль нечеткого управления на основании оценки заданных контрольных значений может изменять значения вероятности выполнения генетических операторов. В качестве контрольных значений могут использоваться различные характеристики популяции, например, разнообразие генотипа и фенотипа популяции, величина лучшего и среднего значения функции пригодности в текущей популяции, динамика изменения лучшего решения и среднего значений функции пригодности [22].

В предложенном алгоритме для оценки текущего состояния были выбраны 4 параметра [23]:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= \frac{f_{ave}(t) - f_{best}(t)}{f_{ave}(t)}; & e_2(t) &= \frac{f_{ave}(t) - f_{best}(t)}{f_{worst}(t) - f_{best}(t)}; \\ e_3(t) &= \frac{f_{best}(t) - f_{best}(t-1)}{f_{best}(t)}; & e_4(t) &= \frac{f_{ave}(t) - f_{ave}(t-1)}{f_{ave}(t)}, \end{aligned}$$

где t – номер текущей популяции, $f_{best}(t)$, $f_{worst}(t)$, $f_{ave}(t)$ – лучшее, худшее и среднее значение целевой функции на итерации t соответственно, $f_{best}(t-1)$, $f_{ave}(t-1)$ – лучшее и среднее значение ЦФ на итерации $(t-1)$.

В качестве выходных параметров блока нечеткого управления используются значения вероятностей выполнения основных генетических операторов: кроссинговера $P_c(t)$, мутации $P_m(t)$ и миграции $P_{mg}(t)$.

Для хранения данных о топологии печатной платы используется LEF/DEF спецификация [24]. LEF (Library Exchange Format) - это спецификация для представления физической структуры микросхемы в формате ASCII. Она включает правила оформления и абстрактную информации об элементах. LEF используется в сочетании с DEF (Design Exchange Format) спецификацией, которая используется для представления полного размещения элементов микросхемы.

Программная реализация. Для создания графического интерфейса использовался фреймворк Qt 5.6. Qt – представляет из себя кросс-платформенный инструментарий разработки прикладного программного обеспечения, широко используемый для создания графических интерфейсов [25]. Он написан на C++ и предоставляет мощные расширения этого языка. Включает в себя все основные классы, которые могут потребоваться при разработке прикладного программного обеспечения, начиная от элементов графического интерфейса и заканчивая классами для работы с сетью, базами данных и XML. Qt является полностью объектно-ориентированным, легко расширяемым и поддерживающим технику компонентного программирования.

Для визуализации и анализа работы нечёткого логического контроллера и алгоритма размещения можно вывести на экран графики изменения входных и выходных параметров контроллера. На рис. 3 показаны графики изменения минимального и среднего значений целевой функции в процессе решения задач размещения и трассировки.

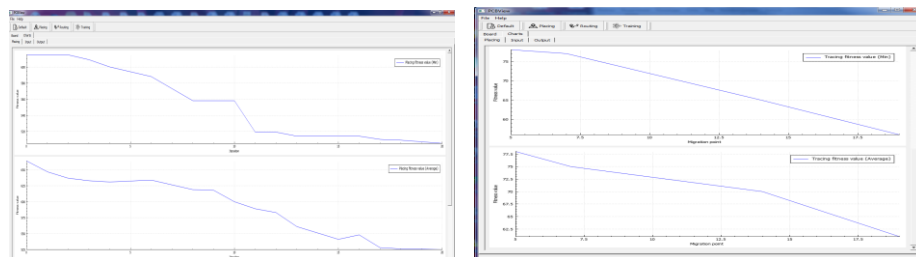


Рис. 3. Графики изменения минимального и среднего значений целевой функции

На рис. 4 приведены графики изменения значений управляющих параметров логического контроллера.

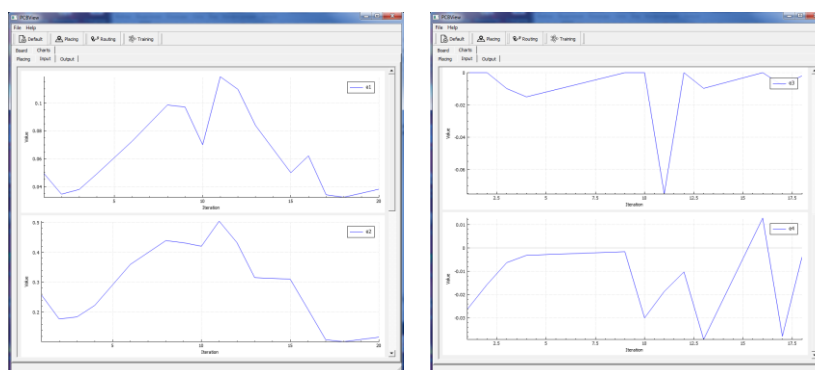


Рис. 4. Графики значений параметров НЛК

На рис. 5 показаны графики изменения значений контрольных параметров и вероятностей выполнения генетических операторов: кроссинговера, мутации и миграции.

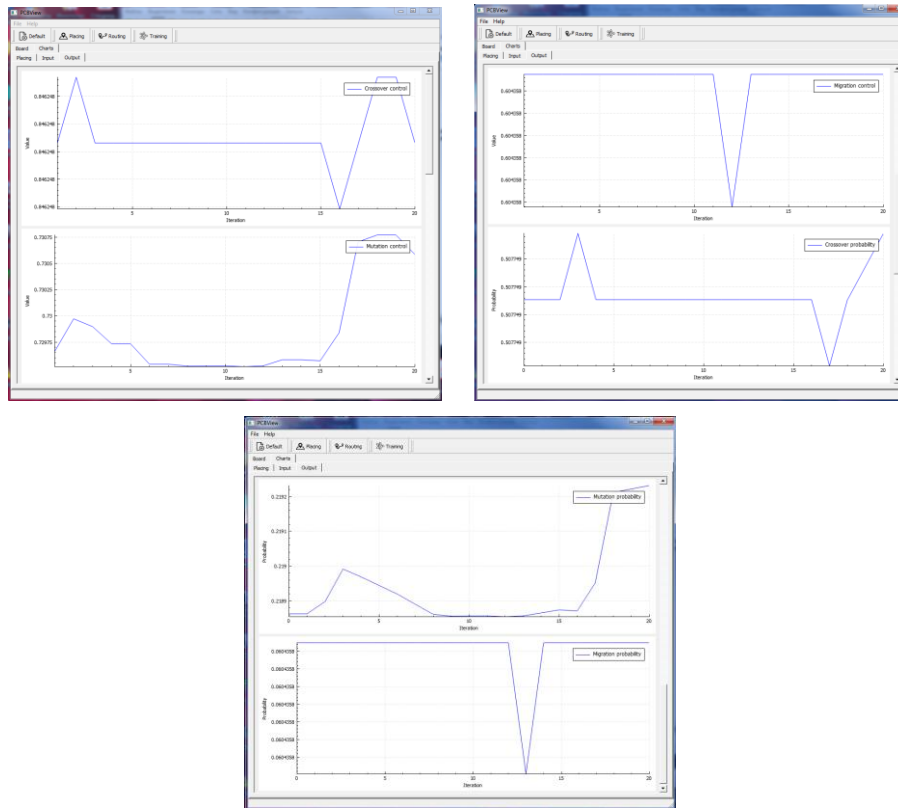


Рис. 5. Изменение вероятности выполнения генетических операторов в процессе работы алгоритма

В ходе выполнения вычислительных экспериментов проводилось исследование временных характеристик разработанного алгоритма. Была выполнена экспериментальная оценка временной сложности разработанного алгоритма, а также сравнение теоретических и эмпирических оценок. Результаты проведенных экспериментов приведены на рис. 6.

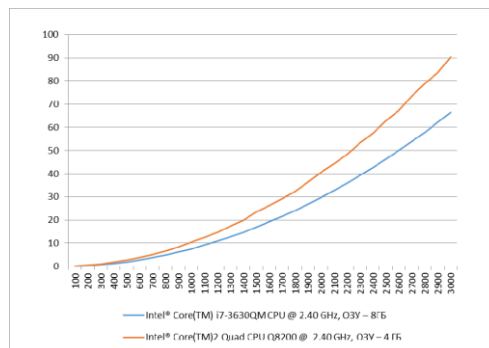


Рис. 6. Зависимость времени выполнения алгоритма от числа элементов

Также был проведен ряд экспериментов с целью определить эффективность использования нечеткого контроллера в работе предложенного гибридного алгоритма решения задачи размещения. Исследование эффективности алгоритма проводилось для решения задачи размещения 300 случайно сгенерированных элементов. Алгоритм тестировался на одном и том же наборе исходных данных при разном числе итераций. Размер популяции – 20 хромосом. Результаты экспериментов представлены на рис. 7.

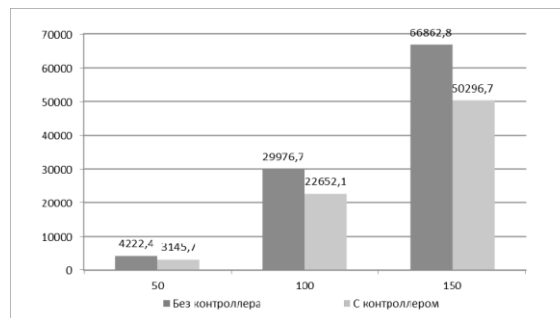


Рис. 7. Сравнение результатов полученных с использованием НЛК и без него

Заключение. Разработана архитектура параллельного многопопуляционного алгоритма генетического поиска на основе модели островов. Предложен гибридный оператор миграции, вероятность применения которого регулируется модулем нечёткого управления. С целью увеличения быстродействия алгоритма решения задачи размещения предложена схема расчёте значений целевой функции с использованием многопоточности на локальном уровне для организации параллельных эволюционных вычислений. Многопопуляционный алгоритм интегрирован с элементами глобального однопопуляционного алгоритма путём реализации механизма распределения вычисления целевой функции между несколькими потоками.

Разработана математическая модель модуля нечёткого управления, который предназначен для динамического изменения управляющих параметров параллельного генетического алгоритма. Предложен вариант интеграции генетического алгоритма и модуля нечёткого управления. Предложена структура гибридного алгоритма решения задачи размещения разногабаритных элементов, разработаны модифицированные генетические операторы, а также компоненты гибридного алгоритма.

Выполнена оценка временной сложности разработанных алгоритмов. Проанализированы результаты применения нейро-нечёткого логического контроллера и блока обучения контроллера, который позволяет получить оптимальные параметры управления. Проведена оценка оптимального количества потоков параллельного генетического алгоритма.

Разработан программно-алгоритмический комплекс для решения задачи размещения. В настоящее время проводятся серии вычислительных экспериментов для определения оптимальных параметров алгоритма и изучения эффективности предложенного подхода.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что включение в модель гибридного алгоритма нечеткого контроллера позволяет улучшить результат решение задачи при одинаковом количестве итераций в среднем на 25%. Эффективность использования контроллера повышается после введения блока обучения на основе модели искусственной нейронной сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shervani N.* Algorithms for VLSI physical design automation. – USA, Kluwer Academy Publisher, 1995.
2. *Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, Sachin S. Sapatnekar.* Handbook of algorithms for physical design automation. – CRC Press, New York, USA, 2009.
3. *Гладков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009.
4. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2016.
5. *Cohoon J.P., Karro J., Lienig J.* Evolutionary Algorithms for the Physical Design of VLSI Circuits. *Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications*, Ghosh A., Tsutsui S. (eds.). – Springer Verlag, London, 2003. – P. 683-712.
6. *Гладков Л.А.* О некоторых подходах к построению гибридных интеллектуальных систем для решения графовых задач // *Новости искусственного интеллекта.* – 2000. – № 3. – С. 71-90.
7. *Alba E., Tomassini M.* Parallelism and evolutionary algorithms // *IEEE T. Evolut. Comput.* – 2002. – Vol. 6. – P. 443-461.
8. *Zhongyang X., Zhang Y., Zhang L., Niu S.* A parallel classification algorithm based on hybrid genetic algorithm // *Proc. of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China. – 2006. – P. 3237-3240.
9. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010.
10. *Редько В.Г.* Моделирование когнитивной эволюции. На пути к теории эволюционного происхождения мышления. – М.: Изд-во УРСС, 2015.
11. *Kar A.K.* Bio Inspired Computing - A Review of Algorithms and Scope of Applications // *Expert Systems with Applications.* – 2016. – Vol. 59. – P. 20-32.
12. *Baqais A.A.B.* A Multi-view Comparison of Various Metaheuristic and Soft Computing Algorithms // *I.J. Mathematical Sciences and Computing.* – 2017. – Vol. 1.3 (4). – P. 8-19.
13. *Roy S., Biswas S., Chaudhuri S.S.* Nature-Inspired Swarm Intelligence and Its Applications // *I.J. Modern Education and Computer Science.* – 2014. – No. 12. – P. 55-65.
14. *Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence: Algorithms, Theory and Applications.* – Academic Press, 2020. – ISBN 978-0-12-819714-1. – <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00628-0>.
15. *Michael A., Takagi H.* Dynamic control of genetic algorithms using fuzzy logic techniques // *Proc. of the 5th International Conference on Genetic Algorithms.* – Morgan Kaufmann, 1993. – P. 76-83.
16. *Herrera F., Lozano M.* Adaptation of genetic algorithm parameters based on fuzzy logic controllers. In: *F. Herrera, J.L. Verdegay (eds.) // Genetic Algorithms and Soft Computing.* – Physica-Verlag, Heidelberg, 1996. – P. 95-124.
17. *Herrera F., Lozano M.* Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions // *Soft Computing.* – Springer-Verlag, 2003. – No. 7. – P. 545-562.
18. *Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / под ред. Н.Г. Ярушкиной.* – М.: Физматлит, 2007.
19. *Ярушкина Н.Г.* Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004.
20. *Борисов В.В., Круглов В.В., Федюлов А.С.* Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
21. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004.
22. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gusev N.Y., Semushina N.S.* Integrated approach to the solution of computer-aided design problems. // *Proceedings of the 4th International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’19).* *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – Springer, Cham, 2020. – Vol. 1156. – P. 465-476.
23. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Leiba S.N., Strakhov N.E.* Development and research of the hybrid approach to the solution of optimization design problems. // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* Vol. 875. *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry ITI’18.* – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – Vol. 2. – P. 246-257.
24. *Library Exchange Format.* University of Maryland, Baltimore County, 2011.
25. *Qt Documentation.* – <http://doc.qt.io/qt-5/reference-overview.html>.

REFERENCES

1. Shervani N. Algorithms for VLSI physical design automation. USA, Kluwer Academy Publisher, 1995.
2. Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, Sachin S. Sapatnekar. Handbook of algorithms for physical design automation. CRC Press, New York, USA, 2009.
3. Gladkov L.A., Kureychik V.M., Kureychik V.V., Sorokoletov P.V. Bioinspirovannyye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009.
4. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow: Izd-vo MGTU im. Bauman, 2016.
5. Cohoon J.P., Karro J., Lienig J. Evolutionary Algorithms for the Physical Design of VLSI Circuits. Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications, Ghosh, A., Tsutsui, S. (eds.). Springer Verlag, London, 2003, pp. 683-712.
6. Gladkov L.A. O nekotorykh podkhodakh k postroeniyu gibridnykh intellektual'nykh sistem dlya resheniya grafovyykh zadach [About some approaches to the construction of hybrid intelligent systems for solving graph problems], *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence News], 2000, No. 3, pp. 71-90.
7. Alba E., Tomassini M. Parallelism and evolutionary algorithms, *IEEE T. Evolut. Comput.*, 2002, Vol. 6, pp. 443-461.
8. Zhongyang X., Zhang Y., Zhang L., Niu S. A parallel classification algorithm based on hybrid genetic algorithm, *Proc. of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, 2006*, pp. 3237-3240.
9. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010.
10. Red'ko V.G. Modelirovanie kognitivnoy evolyutsii. Na puti k teorii evolyutsionnogo proiskhozhdeniya myshleniya [Modeling cognitive evolution. On the way to the theory of the evolutionary origin of thinking]. Moscow: Izd-vo URSS, 2015.
11. Kar A.K. Bio Inspired Computing - A Review of Algorithms and Scope of Applications, *Expert Systems with Applications*, 2016, Vol. 59, pp. 20-32.
12. Baqais A.A.B. A Multi-view Comparison of Various Metaheuristic and Soft Computing Algorithms, *I.J. Mathematical Sciences and Computing*, 2017, Vol. 13 (4), pp. 8-19.
13. Roy S., Biswas S., Chaudhuri S.S. Nature-Inspired Swarm Intelligence and Its Applications, *I.J. Modern Education and Computer Science*, 2014, No. 12, pp. 55-65.
14. Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence: Algorithms, Theory and Applications. – Academic Press, 2020. ISBN 978-0-12-819714-1. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00628-0>.
15. Michael A., Takagi H. Dynamic control of genetic algorithms using fuzzy logic techniques, *Proc. of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann, 1993, pp. 76-83.
16. Herrera F., Lozano M. Adaptation of genetic algorithm parameters based on fuzzy logic controllers, In: F. Herrera, J.L. Verdegay (eds.), *Genetic Algorithms and Soft Computing*. Physica-Verlag, Heidelberg, 1996, pp. 95-124.
17. Herrera F., Lozano M. Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions, *Soft Computing*. Springer-Verlag, 2003, No. 7, pp. 545-562.
18. Nechetkie gibridnye sistemy. Teoriya i praktika [Fuzzy hybrid systems. Theory and practice], ed. by N.G. Yarushkinoy. Moscow: Fizmatlit, 2007.
19. Yarushkina N.G. Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems]. Moscow: Finansy i statistika, 2004.
20. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Nechetkie modeli i seti [Fuzzy models and networks]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007.
21. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and non-discrete systems]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2004.
22. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gusev N.Y., Semushina N.S. Integrated approach to the solution of computer-aided design problems, *Proceedings of the 4th International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'19). Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham, 2020, Vol. 1156, pp. 465-476.

23. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Leiba S.N., Strakhov N.E. Development and research of the hybrid approach to the solution of optimization design problems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 875. *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry IITI'18*. Springer Nature Switzerland AG, 2019, Vol. 2, pp. 246-257.
24. *Library Exchange Format*. University of Maryland, Baltimore County, 2011.
25. *Qt Documentation*. Available at: <http://doc.qt.io/qt-5/reference-overview.html>.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Ясир Муханад Джаббар Ясир – Южный федеральный университет; e-mail: yasir_82@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371625; кафедра САПР; аспирант.

Гладков Леонид Анатольевич – e-mail: lagladkov@sfedu.ru; тел.: 88634371625; кафедра САПР; к.т.н.; доцент.

Гладкова Надежда Викторовна – e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; тел.: 88634393260; кафедра САПР; старший преподаватель.

Yasir Mukhanad Dzhabbar Yasir – Southern Federal University; e-mail: yasir_82@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371625; the department of CAD; postgraduate student.

Gladkov Leonid Anatol'evich – e-mail: lagladkov@sfedu.ru; phone: +78634371625; the department of CAD; cand. of eng. sc.; associate professor.

Gladkova Nadezda Viktorovna — e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; phone: +788634393260; the department of CAD; senior teacher.

УДК 004.056

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-17-29

Д.М. Зарубин, В.П. Добрица, Е.А. Титенко

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ПЕРЕДАВАЕМЫХ СООБЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ ADS-B С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Цель исследования – разработка метода кодирования передаваемых ADS-B сообщений между воздушными судами в процессе полета. Открытый формат 1090ES передаваемых данных является критическим в плане проведения различных типов атак, которые могут привести к нарушению безопасности полетов воздушных судов. Работа направлена на применение средств кодирования и декодирования сообщений с закрытым ключом. Методы исследования основаны на применении и развитии потокового шифрования данных с использованием одномерных клеточных автоматов. Они работают в режиме генератора псевдослучайных последовательностей, преобразующих элементарных состояний ячейки одномерного клеточного автомата на основе типовых аппаратно-ориентированных операций. В основу процессов кодирования и декодирования полей данных положена аналитическое выражение, использующее типовые логические операции (дизъюнкция, сумма по модулю два). Это свойство позволяет вести параллельную обработку полей данных сообщения и создавать неповторяющиеся последовательности кодов. Результаты – создан метод обеспечения защиты передаваемых данных, дополнительно кодирующий на передаче и декодирующий на приеме сообщения. Отличительная особенность метода – сохранение формата протокола. Выполнена оценка вычислительной сложности работы клеточного автомата. Метод использует одномерный клеточный автомат, который выполняет кодирование и декодирование целевых полей (координаты, курс и др.) с использованием генератора псевдослучайных чисел. Разработанный метод относится к классу аппаратно-ориентированных методов. Критические для кодирования и декодирования свойства периодичности полей данных и длины ключа устраняются путем выбора начального иррационального значения и организации «потоковой» работы кодировщика. Если кодирующий автомат работает в потоковом режиме, текущее значение зависит от предыстории некоторой глубины, определение длины «автоматического ключа» из ADS-B сообщения

будет алгоритмически невозможно в силу потери данных. Линейная сложность метода позволяет выполнять преобразования со скоростью потока передачи данных. Вывод – развитие аппаратно-ориентированных методов шифрования данных позволяет повысить эффективность использования системы ADS-B за счет противодействия различным типам деструктивных акций.

Типы атак; псевдослучайная последовательность; функция переходов; кодирование; декодирование.

D.M. Zarubin, V.P. Dobritsa, E.A. Titenko

A METHOD ENCODING TRANSMITTED MESSAGES IN THE ADS-B SYSTEM USING A CELLULAR AUTOMATIC

The purpose of the study is to develop a method for encoding of transmitted ADS-B messages between aircraft. The open format 1090ES of transmitted data is critical in terms of carrying out various types of attacks that can lead to a violation of the safety of aircraft operations. The work is aimed at using means of encoding and decoding messages with a private key. Research methods are based on the application and development of streaming data encryption using one-dimensional cellular automata. They operate as a generator of pseudo-random sequences that transform the elementary states of a cell of a one-dimensional cellular automaton based on typical hardware-oriented operations. The processes of encoding and decoding data fields are based on an analytical expression using typical logical operations (or, xor). This property allows parallel processing of message data fields. The result is the created method for ensuring the protection of transmitted data, additionally encoding on transmission and decoding on message reception. A distinctive feature of the method is the preservation of the protocol forma. The method uses a one-dimensional cellular automaton that encodes and decodes the target fields (coordinates, heading, etc.) using a pseudo-random number generator. The developed method belongs to the class of hardware-oriented methods. Critical for encoding and decoding properties of periodicity of data fields and key length are eliminated by choosing an initial irrational value and organizing the "streaming" work of the encoder. If the encoding automaton is running in streaming mode, the current value depends on the history of some depth, determining the length of the "automatic key" from the ADS-B message will be algorithmically impossible due to data loss. The linear complexity of the method allows you to perform transformations at the data rate. Conclusion: the development of hardware-oriented methods of data encoding makes it possible to increase the efficiency of using the ADS-B system by counteracting various types of destructive actions.

Attack types; pseudo-random sequence; transition function; encoding; decoding.

Введение. Обеспечение безопасности полетов воздушных судов (ВС) в условиях постоянно увеличивающихся пассажиро- и грузопотоков является важной научно-технической задачей. Ее эффективное решение осуществляется в условиях повышения плотности и эшелонирования маршрутов движения ВС, увеличения расстояний маршрутов и их прохождения по экономическим соображениям в удаленных территориях Земли [1].

Радиолокационные системы и наземные радары различных типов являются традиционными стационарными средствами обеспечения мониторинга и, соответственно, организации безопасности воздушного движения. Тем не менее, создаваемая с 70-ых годов XX века сеть стационарных вышек-радаров и стационарных ретрансляторов сигналов от ВС не затрагивает вопросы защиты передаваемых данных в силу исторической не востребованности.

Традиционный подход к отслеживанию движения ВС основан на использовании радиолокационных систем, работающих по принципу идентификации «свой-чужой» (Identification Friend or Foe, IFF). Существенным недостатком данной технологии идентификации является относительно низкая точность, что требует методов и технических средств определения и передачи местоположения ВС, выходящих за рамки возможностей радиолокационных технологий.

Новой технологией мониторинга ВС, которая дополнит традиционные радиолокационные системы, является система автоматического зависимого наблюдения – вещания, Automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) [2–4]. Самолет, оснащенный средствами широковещательной передачи и приема, позволяет оперативно получать точные данные о характеристиках ВС – сообщения ADS-B (текущие координаты, скорость, курс, абсолютная высота и др.). Тем не менее, эффективность технологии ADS-B ограничена тем, что сообщения ADS-B передаются в открытом формате 1090ES (частота 1090 МГц). Это делает технологию ADS-B уязвимой для внесения изменений в передаваемые данные. Для деструктивных воздействий (атак) на само ВС достаточно недорогого оборудования и специализированного программного обеспечения [5–7].

Можно выделить следующие виды атак, связанные с воздействием на сообщения ADS-B [8–10]:

- ◆ несанкционированное подслушивание;
- ◆ глушение;
- ◆ перехват и рассылка с задержкой;
- ◆ модификация.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью разработки и внедрения метода защиты передаваемых сообщений ADS-B. При этом следует учитывать ограниченные возможности формата сообщений ADS-B, т.е. метод обеспечения защиты создается на основе поиска компромисса между длиной кода и количеством пакетов данных, необходимых для передачи информации.

Постановка задачи. Для исключения внешнего непреднамеренного вмешательства в систему передачи данных ADS-B были предложены подходы к повышению безопасности системы ADS-B, основанные на классификации типов атак с использованием подходов на основе искусственного интеллекта [11,12]. В частности, в последние годы большое распространение получили методы машинного обучения. Эти методы позволяют создавать эффективные алгоритмы прогнозирования и поиска аномалий.

Одним из таких методов является техника фотометрии (техника цифрового отпечатка для сравнения с оригиналом), предложенная в работе [13] с целью предотвращения внедрения ложных сообщений в каналы связи ADS-B. Суть фотометрии состоит в сборе данных о фазовой картине электромагнитного излучения при передаче сообщений ADS-B с дальнейшим анализом этой информации с использованием нейронной сети. Данный анализ позволяет с высокой долей вероятности определить является ли сообщение ADS-B модифицированным.

В работе [14, 15] было проведено комплексное исследование, показавшее, как образом классификаторы на основе машинного обучения, могут обнаруживать атаки глушения, нацеленные на каналы передачи данных в системе ADS-B. Несколько алгоритмов машинного обучения, таких как метод опорных векторов, искусственная нейронная сеть и дерево решений, были применены к набору данных с использованием следующих характеристик: частота ошибок по битам, соотношение плохих пакетов и статистическая энергия полученного сигнала. Среди прочего, результаты данного анализа показали перспективность применения нейронных сетей для классификации атак на систему ADS-B.

Однако, несмотря на относительную эффективность подходов, основанных на методах искусственного интеллекта, для выявления и классификации атак одних лишь этих методов недостаточно, так как возможны комбинации атак в различных вариантах.

Известные подходы преимущественно используют потоковые алгоритмы симметричного шифрования, что определяет дополнительные требования к системе ADS-B по скорости трансляции множества сообщений, стойкости шифрующей гамма-последовательности, аппаратной сложности базовых операций прямого и обратного преобразования кодов символов [16–19].

В связи с этим наряду с подходами, основанными на искусственном интеллекте, необходимо разрабатывать и внедрять криптографические решения [20–22], способные обнаруживать или нейтрализовать атаки в системе ADS-B.

Обзор существующих решений. Ранее в научной литературе уже было предложено несколько криптографических подходов для борьбы с некоторыми видами известных атак на систему ADS-B (например, [23–25]). Однако данные исследования показывают, что традиционные криптографические методы нельзя напрямую использовать для защиты ADS-B по ряду причин. С одной стороны, шифрование с использованием традиционных алгоритмов противоречит открытому характеру вещания системы ADS-B. С другой стороны, широкоэвещательный формат трансляции сообщений между ВС приводит к образованию сети множественных (тысячи) трансляций сообщений для их доставки в наземный пункт управления. Вследствие этого внедрение шифрования потоковых данных может привести к большим коммуникационным и вычислительным нагрузкам, что повлияет на эффективность работы всей системы. Применение симметричных алгоритмов шифрования (RSA, MAGMA, AES и др.) [16, 19] влечет дополнительные временные и ресурсные затраты на процессы кодирования и декодирования, что в условиях массовой трансляции ADS-B сообщений достаточно критично в части образования задержек передачи или потерь сообщений. В связи с этим обеспечение конфиденциальности сообщений ADS-B с применением методов и алгоритмов шифрования с линейной вычислительной сложностью является значимой исследовательской задачей.

Метод решения. Канал передачи данных на частоте 1090 МГц, также называемый 1090ES, используется для связи как между самолетами, так и между самолетом и наземными станциями, при этом символ «S» обозначает режим связи «Земля-воздух». Структура передаваемого ADS-B сообщения представлена на рис. 1. Передаваемое сообщение начинается с преамбулы из двух импульсов синхронизации. Затем блок данных передается с использованием позиционно-импульной модуляции (Pulse Position Modulation, PPM). Поскольку каждый временной интервал имеет длину 1 мкс, бит обозначается отправкой импульса длительностью 0,5 мкс в первой половине интервала (1-бит) или во второй половине (0-бит). В режиме S возможны две разные длины сообщений: 56 бит и 112 бит. Поле формата нисходящей линии связи DF (альтернативно UF для сообщений восходящей линии связи) назначает тип сообщения. Как видно из рис. 1, канал 1090ES использует многоцелевой формат. Установленное значение 17 поля DF указывает, что сообщение имеет расширенный по длине формат, позволяющим передавать 56 произвольных битов в поле ME. Поле CA указывает информацию о возможностях используемого передатчика, а 24-битное поле AA содержит уникальный адрес воздушного судна (ICAO), который позволяет идентифицировать воздушное судно и вести его оперативный мониторинг. Наконец, поле PI предоставляет 24-битный CRC, который позволяет обнаруживать и исправлять возможные ошибки передачи. Более полный обзор ADS-B протокола может быть найден в документах спецификаций [3, 4].

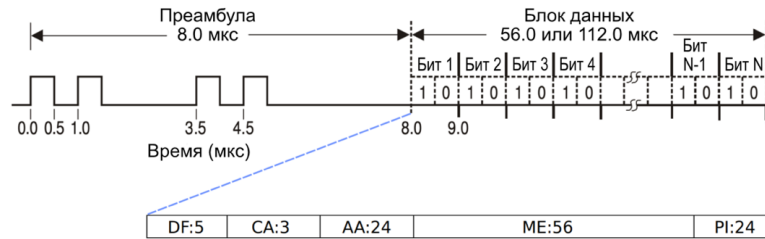


Рис. 1. Структура передаваемого ADS-B сообщения

Анализ структуры ADS-B сообщения, показывает, что 56-битное поле ME может быть использовано для передачи произвольных данных, формируемых перед сеансом связи. Часть этого поля несет позиционные данные и другую информацию. Оставшиеся биты (около 40%) могут быть использованы для реализации решений безопасности, основанных на шифровании передаваемых данных.

В настоящее время распространены два класса алгоритмов шифрования данных:

- ◆ системы с секретным ключом;
- ◆ системы с открытым ключом.

Одним из перспективных методов криптографии, который можно использовать в сочетании с обоими классами являются клеточные автоматы, предназначенные для генерации псевдослучайных последовательностей. Эти данные являются основой для алгоритмов шифрования.

В общем виде, клеточный автомат представляет собой дискретную динамическую систему, являющуюся совокупностью одинаковых ячеек, соединенных друг с другом одинаковым образом и изменяющих свои состояния во времени. Все клетки образуют так называемую решетку. При этом, решетки могут быть разных видов, отличающихся размерами или формой клетки. Каждая ячейка представляет собой конечный автомат, состояния которого определяются состояниями соседних ячеек и, возможно, ее собственными состояниями.

Простейший одномерный клеточный автомат показан на рис. 2 [26]. Это дискретная структура, представляющая собой совокупность клеток, расположенных в решетке и взаимодействующих по правилу, называемому правилом эволюции. Данное правило определяет переход клеток из текущего состояния в новое состояние за дискретное время t . Для каждой ячейки i , называемой центральной клеткой, определена окрестность радиуса R , состоящая из $n_i = 2R + 1$ ячеек, включая ячейку i . При этом, в зависимости от правила эволюции, преобразования внутри решетки во времени могут быть как линейными, так и нелинейными.



Рис. 3. Пример работы одномерного клеточного автомата за один период дискретного времени

Практическая реализация клеточного автомата должна содержать только конечное число ячеек N . Для корректной работы клеточного автомата необходимо задать некоторые граничные условия, определяющие переход крайних ячеек в новое состояние. Известны следующие виды граничных условий:

- ◆ фиксированные (ячейки имеют фиксированное значение 0 или 1);
- ◆ рефлексивные (зеркальное отражение ячеек по краям решетки);
- ◆ циклические (за счет образования круговой сети соединений).

Среди перечисленных типов граничных условий именно циклические обеспечивают наибольшую эффективность генерации псевдослучайных последовательностей и, следовательно, представляют наибольший интерес для создания автоматных шифраторов.

В рамках данной статьи рассматриваются только автоматы, для которых элементарное клеточное состояние $s \in \{0,1\}$. В основе работы клеточного автомата как генератора псевдослучайных чисел (PRNG) [27, 28] используется правило преобразования элементарных состояний ячейки во времени с учетом анализируемой окрестности ячеек R :

$$s_i(t+1) = s_{i-1}(t) \oplus (s_i(t) \vee s_{i+1}(t)), \quad (1)$$

где $s_i(t)$ – состояние ячейки i в момент времени t , $s_{i+1}(t)$, $s_{i-1}(t)$ – состояния ячеек $i+1$, $i-1$ в момент времени t (окрестность $R=1$), $s_i(t+1)$ – состояние ячейки i в момент времени $t+1$.

Псевдослучайные битовые последовательности получаются путем выборки значений, которые целевая ячейка (как правило, это центральная ячейка) достигает по тактам дискретного времени. Исходя из (1) конструкция клеточного автомата имеет довольно простую аппаратную и программную реализацию, так как основана на типовых логических операциях. Данный подход обеспечивает метод шифрования PRNG-данными, формируемыми алгоритмом генерации псевдослучайных чисел с низкой вычислительной сложностью – линейная сложность $\mathcal{O}(N)$. Таким образом, метод шифрования с применением генератора псевдослучайных чисел PRNG имеет большие перспективы для создания систем повышения защищенности каналов связи при сохранении высокой скорости передачи и обработки данных. Схема шифрования канала ADS-B на основе клеточного автомата в режиме генератора псевдослучайных чисел (PRNG) показана на рис. 3.

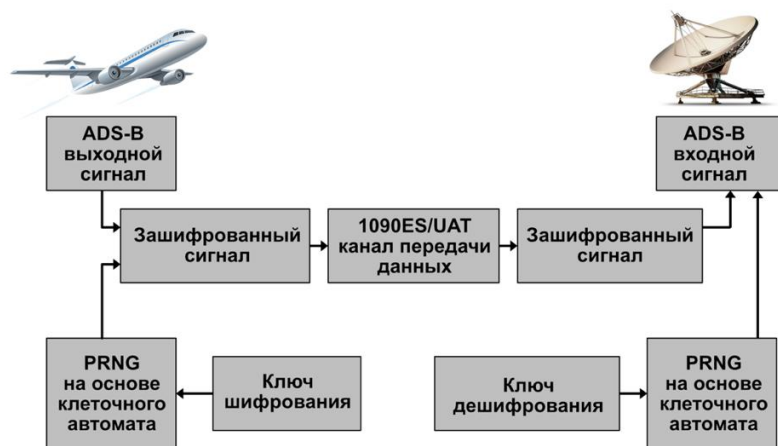


Рис. 3. Схема шифрования канала ADS-B на основе клеточного автомата

В качестве открытого ключа использована комбинация, состоящая из объединения регистрационного номера самолета, адреса Международной организации гражданской авиации (ИКАО), бортового номера или номера рейса, даты и информации о рейсе, что позволяет получить уникальный ключ.

Результаты и обсуждения. Для демонстрации принципа работы шифратора/дешифратора на основе одномерного клеточного автомата будет использоваться реальный сигнал ADS-B.

Структура формата пакета ADS-B показана на рис. 4.

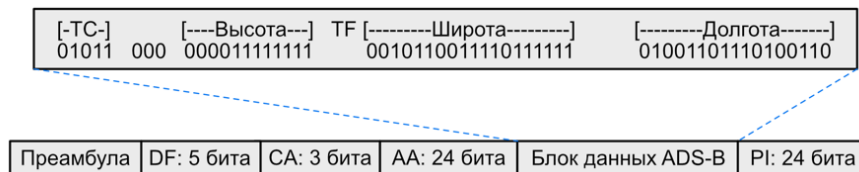


Рис. 4. Сообщение ADS-B с полями блока данных

Как следует из рис. 1 56-ти битный блок данных (ME:56) расположен между 24-ти битным блоком с адресом самолета ИКАО (AA) и 24-ти битным блоком проверки четности (PI). При этом блок данных содержит информацию о высоте, широте и долготе самолета, которая может быть интерпретирована следующим образом: первые 5 бит – это код ТС, биты 6 и 7 это статус наблюдения, и бит 8 указывает на используемые антенны. Биты с 9 по 20 содержат информацию о высоте полета воздушного судна. Бит 21 содержит информацию о времени (Т). В данном случае этот бит равен 0, что указывает на отсутствие синхронизации с текущим местным временем. Бит 22 указывает на используемый формат отчета о местоположении (четный или нечетный). Биты с 23 по 39 и биты с 40 по 56 содержат закодированную информацию о широте и долготе, соответственно.

Далее рассматривается интерпретация данных о местоположении самолета на примере высоты полета. Блок данных с информацией о высоте полета состоит из 12 бит (биты с 41 по 52). Для интерпретации данного блока информации выполняется следующая процедура:

а) из 12-битного сообщения удаляется 8-й бит, считая от старшего бита, известного как бит Q. Этот бит определяет, сообщается ли высота с приращением 100 футов ($Q = 0$) или с шагом 25 футов ($Q = 1$);

б) первые семь битов сдвигаются вправо, что приводит к удалению бита Q. Оставшееся двоичное число затем преобразуется в десятичное, умножается на приращение высоты (25 или 100 футов) и суммируется со значением 1000.

Таким образом, для рассматриваемого в данной статье ADS-B сообщения информация о высоте полета самолета представлена бинарной комбинацией 000011111111 (рис. 4). Бит $Q = 1$ указывает на приращение высоты в 25 футов. Удалив 8-й бит, мы получаем двоичное поле - 000001111111, которое эквивалентно числу 127 в десятичной системе. Далее, умножая это число на 25 и прибавляя полученное произведение к 1000, вычисляется результирующая высота – 2175 футов (663 метра).

Процедура кодирования и декодирования информации о местоположении самолета с помощью автоматного шифратора/дешифратора основана на следующих шагах:

- ◆ определяется число состояний в клеточном автомате;
- ◆ задается функция переходов.

При этом следует учитывать, что любые повторяющиеся числовые последовательности данных в автоматном шифраторе будут снижать криптографическую стойкость, поэтому для построения последовательного автоматный шифратора следует использовать некоторое иррациональное число или генератор псевдослучайных чисел.

Строится структура клеточного автомата из N клеток с помощью исходного иррационального числа на основе правила в виде функции перехода автоматного шифратора (табл. 1). Пусть N -му состоянию n в автоматном шифраторе соответствует n -му разряду иррационального числа после запятой.

Таблица 1

Варианты функции перехода автоматного шифратора

$n \bmod 2$	Функция перехода	
	Вариант 1	Вариант 2
$n \bmod 2 = 0$	$0 \rightarrow 0$	$0 \rightarrow 1$
	$1 \rightarrow 1$	$1 \rightarrow 0$
$n \bmod 2 = 1$	$0 \rightarrow 1$	$0 \rightarrow 0$
	$1 \rightarrow 0$	$1 \rightarrow 1$

Для рандомизации в иррациональном числе также можно брать цифры не подряд, а по некоторому алгоритму. При этом, при определении правила выбора цифр иррационального числа необходимо использовать по одной цифре на состояние, а не на входной символ.

Таким образом, по указанному правилу можно построить автомат длины n . Из-за трансцендентности исходного числа нежелательного свойства периодичности полей данных в «автоматическом ключе» не будет. Также отметим, что поскольку автомат работает в потоковом режиме, определение длины «автоматического ключа» из ADS-B сообщения будет весьма затруднительно, что говорит о криптостойкости метода шифрования.

Далее рассматривается пример работы автоматного шифратора для кодирования сигнала ADS-B на основе поля абсолютной высоты воздушного судна.

Пусть количество состояний клеточного автомата $n=6$, иррациональное число для шифрования $\pi = 3,1415926535$. Для расчета выходных значений автоматного шифратора будет использован вариант 1 из табл. 1. Выходные значения автоматного шифратора показаны в табл. 2.

Таблица 2

Расчет выходных значений автоматного шифратора

Номер состояния	Цифра в π (дробная часть)	Остаток от деления	Выходной символ
0	1	$1 \bmod 2 = 1$	$0 \rightarrow 1$ $1 \rightarrow 0$
1	4	$4 \bmod 2 = 0$	$0 \rightarrow 0$ $1 \rightarrow 1$
2	1	$1 \bmod 2 = 1$	$0 \rightarrow 1$ $1 \rightarrow 0$
3	5	$5 \bmod 2 = 1$	$0 \rightarrow 1$ $1 \rightarrow 0$
4	9	$9 \bmod 2 = 1$	$0 \rightarrow 1$ $1 \rightarrow 0$
5	2	$2 \bmod 2 = 0$	$0 \rightarrow 0$ $1 \rightarrow 1$

На основе построенного автоматного шифратора кодируется информация об высоте полета воздушного судна: 000011111111 (рис. 5).

Как видно из табл. 3, в результате шифрования текста ADS-B сообщения получается преобразование: 000011111111 $\rightarrow$ 101101010001.

Таблица 3

Шифрование текста ADS-B сообщения автоматным шифратором

Входной символ	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Состояние	q ₀	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₀	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅
Выходной символ	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1

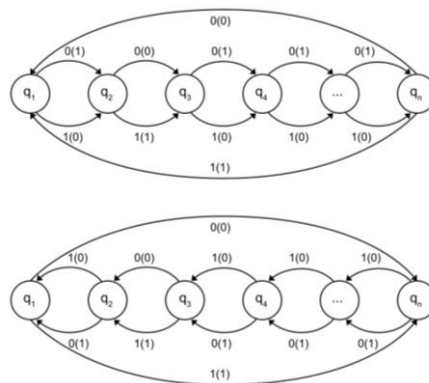


Рис. 5. Схемы кодирования/декодирования данных автоматного шифратора и автоматного дешифратора

Для расшифровки данного сообщения можно воспользоваться автоматным дешифратором, схема смены состояний которого также показана на Рис 5. Можно заметить, что структура автоматного дешифратора аналогична структуре шифратора за исключением изменённых на противоположные направления правил переходов. Начальным состоянием автоматного дешифратора является финальное состояние шифратора.

Таблица 4

Расшифровка текста ADS-B сообщения автоматным дешифратором

Входной символ	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1
Состояние	q ₅	q ₄	q ₃	q ₂	q ₁	q ₀	q ₅	q ₄	q ₃	q ₂	q ₁	q ₀
Выходной символ	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Как следует из табл. 4, в результате декодирования получается преобразование 101101010001 $\rightarrow$ 000011111111, возвращающее исходное ADS-B сообщение.

Выводы

1. Анализ инфраструктуры сети наземных радиолокационных станций-вышек и логическая структура передаваемых ADS-B сообщений не имеют встроенных средств защиты передаваемых данных, что создает уязвимости для канала передачи данных формата 1090ES (расширенный формат).

2. Создан метод обеспечения защиты передаваемых данных на основе одномерного клеточного автомата, выполняющего кодирование и декодирование целевых полей (координаты, курс и др.) с использованием генератора псевдослучайных чисел.

3. Выполнена оценка вычислительной сложности работы клеточного автомата, которая показала перспективность создания систем защиты каналов передачи данных в системе ADS-B на основе применения типовых логических операций кодирования/декодирования целевых полей данных при сохранении исходной скорости передачи данных в системе ADS-B.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подхалюзина В.А. Воздушный транспорт в России в условиях глобализации мировой экономики. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 96 с.
2. Фальков Э., Шаврин С. АЗН-В и информационная безопасность воздушного движения // Первая миля. – 2020. – Т. 90, № 5. – С. 50-56.
3. Рубцов Е.А., Калинин А.С., Григорьева Е.И. Анализ линии передачи данных автоматического зависимого наблюдения вещательного типа // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2018. – Т. 10, № 6. – С. 19-27.
4. Николаев К.А. Описание систем автоматического зависимого наблюдения-вещания и их преимущества перед радиолокацией // Естественные и технические науки. – 2018. – № 4. – С. 38-40.
5. Большаков А.А. Метод распознавания угрозы авиационного происшествия на базе искусственного интеллекта // Математические методы в технике и технологиях. – 2017. – Т. 4. – С. 90-95.
6. Ying X. et al. Detecting ADS-B Spoofing Attacks using Deep Neural Networks // 2019 IEEE Conference on Communications and Network Security, CNS 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2019. – P. 187-195.
7. Schäfer M., Lenders V., Martinovic I. Experimental Analysis of Attacks on Next Generation Air Traffic Communication // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. – Vol. 7954 LNCS. – P. 253-271.
8. McCallie D., Butts J., Mills R. Security analysis of the ADS-B implementation in the next generation air transportation system // International Journal of Critical Infrastructure Protection. – 2011. – Vol. 4, No. 2. – P. 78-87.
9. Grover K., Lim A., Yang Q. Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks: A survey // International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing. – 2014. – Vol. 17, No. 4. – P. 197-215.
10. Riah Manesh M., Kaabouch N. Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system // International Journal of Critical Infrastructure Protection. – 2017. – Vol. 19. – P. 16-31.
11. Большаков А.А., Кулик А.А. Повышение безопасности полета воздушного судна с использованием методов искусственного интеллекта // Математические методы в технике и технологиях. – 2019. – Т. 11. – С. 87-99.
12. Schäfer M., Lenders V., Martinovic I. Experimental Analysis of Attacks on Next Generation Air Traffic Communication // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. – Vol. 7954 LNCS. – P. 253-271.
13. Leonardi M., di Gregorio L., di Fausto D. Air Traffic Security: Aircraft Classification Using ADS-B Message's Phase-Pattern // Aerospace. – 2017. – Vol. 4. – P. 51.
14. Manesh M.R. et al. Performance Comparison of Machine Learning Algorithms in Detecting Jamming Attacks on ADS-B Devices // 2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). – IEEE, 2019. – P. 200-206.
15. Kacem T. et al. ADS-B Attack Classification using Machine Learning Techniques // 2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops). – IEEE, 2021. – P. 7-12.
16. Кондаков С.Е., Рудь И.С. Модель процесса проведения компьютерных атак с использованием специальных информационных воздействий // Вопросы кибербезопасности. – 2021. – № 5(45). – С. 12-20.
17. Фомичев В.М. Методы дискретной математики в криптологии. – М.: МИФИ, 2010. – 424 с.
18. Шнайер Б. Прикладная криптография. – М.: Триумф, 2002. – 816 с.

19. Ставер Е.В. Алгоритм RSA. Шифрование и дешифрование текстовых сообщений // Научный аспект. – 2012. – № 3. – С. 88-89.
20. Finke C., Butts J., Mills R. ADS-B encryption // Proceedings of the Eighth Annual Cyber Security and Information Intelligence Research Workshop on - CSIIRW '13. – New York, New York, USA: ACM Press, 2013. – P. 1.
21. Zhang J., Wei L., Yanbo Z. Study of ADS-B Data Evaluation // Chinese Journal of Aeronautics. – 2011. – Vol. 24. – P. 461-466.
22. Yang H. et al. A practical and compatible cryptographic solution to ADS-B security // IEEE Internet of Things Journal. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 3322-3334.
23. Strohmeier M. et al. On the security of the automatic dependent surveillance-broadcast protocol // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, No. 2. – P. 1066-1087.
24. Sampigethaya K. et al. Future e-enabled aircraft communications and security: The next 20 years and beyond // Proceedings of the IEEE. – 2011. – Vol. 99, No. 11. – P. 2040-2055.
25. H. Ren H. et al. Querying in Internet of Things with privacy preserving: Challenges solutions and opportunities // IEEE Network. – 2018. – Vol. 32, No. 6. – P. 144-151.
26. Соколов А.В. Быстродействующий генератор ключевых последовательностей на основе клеточных автоматов // Праці Одеського політехнічного університету. – 2014. – Vol. 1, No. 43. – P. 180-186.
27. Wolfram S. Random sequence generation by cellular automata // Advances in Applied Mathematics. – 1986. – Vol. 7, No. 2. – P. 123-169.
28. Cook E. ADS-B, Friend or Foe: ADS-B Message Authentication for NextGen Aircraft // 2015 IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, 2015 IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, and 2015 IEEE 12th International Conference on Embedded Software and Systems. – IEEE, 2015. – P. 1256-1261.

REFERENCES

1. Podkhalyuzina V.A. Vozdushnyy transport v Rossii v usloviyakh globalizatsii mirovoy ekonomiki [Air transport in Russia in the context of the globalization of the world economy]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 96 p.
2. Fal'kov E., Shavrin S. AZN-V i informatsionnaya bezopasnost' vozdushnogo dvizheniya [AZN-V and information security of air traffic], *Pervaya milya* [The first mile], 2020, Vol. 90, No. 5, pp. 50-56.
3. Rubtsov E.A., Kalintsev A.S., Grigor'eva E.I. Analiz linii peredachi dannykh avtomaticheskogo zavisimogo nablyudeniya veshchatel'nogo tipa [Analysis of the data transmission line of automatic dependent observation of broadcast type], *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High-tech technologies in space research of the Earth], 2018, Vol. 10, No. 6, pp. 19-27.
4. Nikolaev K.A. Opisaniye sistem avtomaticheskogo zavisimogo nablyudeniya-veshchaniya i ikh preimushchestva pered radiolokatsiyey [Description of automatic dependent surveillance-broadcasting systems and their advantages over radar], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical sciences], 2018, No. 4, pp. 38-40.
5. Bol'shakov A.A. Metod raspoznavaniya ugrozy aviatsionnogo proisshestiya na baze iskusstvennogo intellekta [The method of recognizing the threat of an aviation accident based on artificial intelligence], *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh* [Mathematical methods in engineering and technology], 2017, Vol. 4, pp. 90-95.
6. Ying X. et al. Detecting ADS-B Spoofing Attacks using Deep Neural Networks, 2019 IEEE Conference on Communications and Network Security, CNS 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 187-195.
7. Schäfer M., Lenders V., Martinovic I. Experimental Analysis of Attacks on Next Generation Air Traffic Communication, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, Vol. 7954 LNCS, pp. 253-271.
8. McCallie D., Butts J., Mills R. Security analysis of the ADS-B implementation in the next generation air transportation system, / *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2011, Vol. 4, No. 2, pp. 78-87.

9. Grover K., Lim A., Yang Q. Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks: A survey, *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 2014, Vol. 17, No. 4, pp. 197-215.
10. Riahi Manesh M., Kaabouch N. Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system, *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2017, Vol. 19, pp. 16-31.
11. Bol'shakov A.A., Kulik A.A. Povyshenie bezopasnosti poleta vozdušnogo sudna s ispol'zovaniem metodov iskusstvennogo intellekta [Improving the safety of aircraft flight using artificial intelligence methods], *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh* [Mathematical methods in engineering and technology], 2019, Vol. 11, pp. 87-99.
12. Schäfer M., Lenders V., Martinovic I. Experimental Analysis of Attacks on Next Generation Air Traffic Communication, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, Vol. 7954 LNCS, pp. 253-271.
13. Leonardi M., di Gregorio L., di Fausto D. Air Traffic Security: Aircraft Classification Using ADS-B Message's Phase-Pattern, *Aerospace*, 2017, Vol. 4, pp. 51.
14. Manesh M.R. et al. Performance Comparison of Machine Learning Algorithms in Detecting Jamming Attacks on ADS-B Devices, *2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*. IEEE, 2019, pp. 200-206.
15. Kacem T. et al. ADS-B Attack Classification using Machine Learning Techniques, *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops)*. IEEE, 2021, pp. 7-12.
16. Kondakov S.E., Rud' I.S. Model' protsessa provedeniya komp'yuternykh atak s ispol'zovaniem spetsial'nykh informatsionnykh vozdeystviy [A model of the process of conducting computer attacks using special information influences], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity issues], 2021, No. 5 (45), pp. 12-20.
17. Fomichev V.M. Metody diskretnoy matematiki v kriptologii [Methods of discrete mathematics in cryptology]. Moscow: MIFI, 2010, 424 p.
18. Shnayer B. Prikladnaya kriptografiya [Applied cryptography]. Moscow: Triumph, 2002, 816 p.
19. Staver E.V. Algoritm RSA. Shifrovaniye i deshifrovaniye tekstovykh soobshcheniy [The RSA algorithm. Encryption and decryption of text messages], *Nauchnyy aspekt* [Scientific aspect], 2012, No. 3, pp. 88-89.
20. Finke C., Butts J., Mills R. ADS-B encryption, *Proceedings of the Eighth Annual Cyber Security and Information Intelligence Research Workshop on - CSIIRW '13*. New York, New York, USA: ACM Press, 2013, pp. 1.
21. Zhang J., Wei L., Yanbo Z. Study of ADS-B Data Evaluation, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, Vol. 24, pp. 461-466.
22. Yang H. et al. A practical and compatible cryptographic solution to ADS-B security, *IEEE Internet of Things Journal. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 3322-3334.
23. Strohmeier M. et al. On the security of the automatic dependent surveillance-broadcast protocol, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, Vol. 17, No. 2, pp. 1066-1087.
24. Sampigethaya K. et al. Future e-enabled aircraft communications and security: The next 20 years and beyond, *Proceedings of the IEEE*, 2011, Vol. 99, No. 11, pp. 2040-2055.
25. H. Ren H. et al. Querying in Internet of Things with privacy preserving: Challenges solutions and opportunities, *IEEE Network*, 2018, Vol. 32, No. 6, pp. 144-151.
26. Sokolov A.V. Bystrodeystvuyushchiy generator klyuchevykh posledovatel'nostey na osnove kletochnykh avtomatov [A high-speed generator of key sequences based on cellular automata], *Pratsi Odes'kogo politekhnichnogo universitetu* [Proceedings of Odessa Polytechnic University], 2014, Vol. 1, No. 43, pp. 180-186.
27. Wolfram S. Random sequence generation by cellular automata, *Advances in Applied Mathematics*, 1986, Vol. 7, No. 2, pp. 123-169.
28. Cook E. ADS-B, Friend or Foe: ADS-B Message Authentication for NextGen Aircraft, *2015 IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, 2015 IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, and 2015 IEEE 12th International Conference on Embedded Software and Systems*. IEEE, 2015, pp. 1256-1261.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Целых.

Зарубин Денис Михайлович – Юго-Западный государственный университет; e-mail: orion-589@yandex.ru; г. Курск, Россия; научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем.

Добрица Вячеслав Порфирьевич – e-mail: dobritsa@mail.ru; профессор кафедры защиты информации; д.ф.-м.н.

Титенко Евгений Анатольевич – e-mail: johntit@mail.ru; тел.: +79051588904; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем; к.т.н.

Zarubin Denis Mikhailovich – South-West State University; e-mail: orion-589@yandex.ru; Kursk, Russia; researcher at the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems.

Dobritsa Vyacheslav Porfiryevich – e-mail: dobritsa@mail.ru; professor of the Information Security Department; dr. of phys. and math. sc.

Titenko Evgeny Anatolyevich – e-mail: johntit@mail.ru; phone: +79051588904; leading researcher of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems; cand. of eng. sc.

УДК 517.524

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-29-37

В.Е. Долгой, И.Э. Гамолина

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО ПОЛИНОМИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕПРЕРЫВНЫХ ДРОБЕЙ

Приводится алгоритм, основанный на применении непрерывных дробей, для нахождения нулей полинома n -й степени. В настоящее время существует большое разнообразие методов и алгоритмов для решения задач подобного типа; отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является возможность его эффективного использования при достаточно больших значениях n , кроме того, данный алгоритм применим в случае наличия комплексных корней. Любое действительное число можно представить в виде конечной или бесконечной непрерывной цепной дроби. Основное назначение цепных дробей состоит в том, что они дают малую погрешность при приближенных вычислениях действительных чисел в виде обыкновенных дробей при решении алгебраических уравнений и систем. Целью нашей работы является применение разработанного алгоритма для решения полиномиальных уравнений, содержащих не только действительные, но и комплексные корни, с помощью непрерывных дробей; оценка числа арифметических шагов при его численном решении. В статье приводятся аналитические выражения для решения полиномиального уравнения; полученные аналитические выражения представляют собой отношение определителей Тейлора. Отличительной особенностью данных определителей является наличие в качестве диагональных элементов коэффициентов решаемого алгебраического уравнения. Для получения численного решения использован модифицированный алгоритм Рунтисхаузера. Комплексные корни при решении уравнения могут быть найдены с помощью алгоритма для суммирования непрерывных дробей. В статье приводятся в качестве иллюстрации предлагаемого алгоритма результаты численного решения полиномиального уравнения пятой степени. Преимуществом алгоритма является малое количество затрачиваемых арифметических операций, возможность рассмотрения полиномов высокой степени, малая погрешность вычислений.

Модифицированный алгоритм Рунтисхаузера; непрерывные дроби; алгоритм суммирования расходящихся непрерывных дробей; определители Тейлора; r/p -алгоритм.

V.E. Dolgoy, I.E. Gamolina

ALGORITHM OF THE REDUCED POLYNOMIAL EQUATIONS SOLUTION USING CONTINUED FRACTIONS

The article presents an algorithm where continued fractions are used to find the zeros of n th degree polynomial. Our day there is a wide variety of methods and algorithms for solving such type problems. The proposed algorithm feature is its effective possibility using for large values of n . Besides this algorithm can be applied for complex roots. Any real number can be represented as a continued fraction: finite or infinite. The main purpose of continuous fractions is that they allow us to find good approximations of real numbers in the ordinary fractions form in algebraic equations and systems solution. The purpose of this work is algorithm with continued fractions for solving reduced polynomial equation that contains both real and complex roots, estimation of the number of arithmetic steps in its numerical solution. The analytical expressions for polynomial equation solutions are given in this paper. The obtained analytical expressions represent the ratio of the Toeplitz determinants. A distinctive feature of these determinants is the presence of coefficients of the solved algebraic equation as diagonal elements. A modified Rutishauser algorithm was used to obtain a numerical solution. Complex roots can be found using the summation algorithm of divergent continued fractions. As an illustration of the proposed algorithm the results of the numerical solution for fifth degree polynomial equation are given. The advantage of the algorithm is the small number of arithmetic operations required, the possibility of considering high-degree polynomials, and the small error of calculations.

Modified Rutishauser algorithm; continued fractions; algorithm for summation of divergent continued fractions; Toeplitz determinants.

Введение. Непрерывные дроби в настоящее время часто используют во многих областях математики, в частности вычислительной математике. при изучении вопросов, связанных с бесконечным делением и в теории приближения к действительным числам рациональными числами. Дроби такого типа помогают находить достаточно хорошие приближения для решения большого круга задач; в том числе непрерывные дроби могут быть применены для нахождения нулей функций, представляющих собой полиномы n -й степени. Большое количество работ посвящено изучению прямых и итерационных методов для решения задач подобного типа [1–5], преимущество предлагаемого алгоритма состоит в том, что он может быть эффективно использован при достаточно больших значениях n и может быть применен для отыскания корней (и действительных, и комплексных). Для решения уравнений степени n полиномиального типа предлагается модифицированный алгоритм, основанный на использовании формул Эйткена [6] и алгоритма Рутизхаузера [7]. Для определения комплексных корней может быть успешно применен метод суммирования расходящихся непрерывных дробей [8–10].

Постановка задачи. Рассмотрим полином степени n , записав его в следующем виде

$$f(x) = x^n + \alpha_1 x^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} x + \alpha_n. \quad (1)$$

Тогда производящая функция для (1) имеет вид [1]

$$\frac{1}{1 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_n x^n} = 1 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots + c_m x^m + \dots \quad (1)$$

Отметим, что (1) – приведенное уравнение, а в выражениях (1) и (2) α_i – коэффициенты, стоящие перед переменной x , совпадают. В выражении (2) c_m можно найти, используя линейное уравнение (рекуррентное)

$$c_m = -(\alpha_1 c_{m-1} + \alpha_2 c_{m-2} + \dots + \alpha_n c_{m-n}),$$

с заданными значениями $c_0 = 1$ и $c_1 = -\alpha_1$.

Используем для нахождения уравнения $f(x) = 0$ – то есть корней полиномиального уравнения

$$x^n + \alpha_1 x^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} x + \alpha_n = 0 \quad (3)$$

метод Эйткена [6], позволяющий находить последовательно корни уравнения с помощью предела отношения определителей 1, 2, ..., n-го порядков:

$$x_1 = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{c_{k+1}}{c_k}, \quad (4)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{\begin{vmatrix} c_{k+1} & c_{k+2} \\ c_{k+2} & c_{k+3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_k & c_{k+1} \\ c_{k+1} & c_{k+2} \end{vmatrix}} : \frac{c_{k+1}}{c_k} \right) = \frac{x_1 x_2}{x_1} = x_2, \quad (5)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{\begin{vmatrix} c_{k+1} & c_{k+2} & c_{k+3} \\ c_{k+2} & c_{k+3} & c_{k+4} \\ c_{k+3} & c_{k+4} & c_{k+5} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_k & c_{k+1} & c_{k+2} \\ c_{k+1} & c_{k+2} & c_{k+3} \\ c_{k+2} & c_{k+3} & c_{k+4} \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} c_{k+1} & c_{k+2} \\ c_{k+2} & c_{k+3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_k & c_{k+1} \\ c_{k+1} & c_{k+2} \end{vmatrix}} \right) = \frac{x_1 x_2 x_3}{x_1 x_2} = x_3, \quad (6)$$

$$x_n = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{H_n^{(k+1)}}{H_n^{(k)}} : \frac{H_{n-1}^{(k+1)}}{H_{n-1}^{(k)}} \right),$$

где

$$H_n^{(k)} = \begin{vmatrix} c_k & c_{k+1} & \dots & c_{k+n-1} \\ c_{k+1} & c_{k+2} & \dots & c_{k+n} \\ . & . & \dots & . \\ c_{k+n-1} & c_{k+n} & \dots & c_{k+2n-2} \end{vmatrix}, \quad H_0^{(k)} = 1.$$

Таким образом,

$$x_n = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{\begin{vmatrix} c_{k+1} & c_{k+2} & \dots & c_{k+n} \\ c_{k+2} & c_{k+3} & \dots & c_{k+n+1} \\ . & . & \dots & . \\ c_{k+n} & c_{k+n+1} & \dots & c_{k+2n-1} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_k & c_{k+1} & \dots & c_{k+n-1} \\ c_{k+1} & c_{k+2} & \dots & c_{k+n} \\ . & . & \dots & . \\ c_{k+n-1} & c_{k+n} & \dots & c_{k+2n-2} \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} c_{k+1} & c_{k+2} & \dots & c_{k+n-1} \\ c_{k+2} & c_{k+3} & \dots & c_{k+n} \\ . & . & \dots & . \\ c_{k+n-1} & c_{k+n} & \dots & c_{k+2n-3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_k & c_{k+1} & \dots & c_{k+n-2} \\ c_{k+1} & c_{k+2} & \dots & c_{k+n-1} \\ . & . & \dots & . \\ c_{k+n-2} & c_{k+n-1} & \dots & c_{k+2n-4} \end{vmatrix}} \right). \quad (7)$$

Необходимым является выполнение условия

$$|x_1| \geq |x_2| \geq |x_3| \geq \dots \geq |x_n|.$$

Следует отметить, что применяемые формулы Эйткена имеют ограничения и справедливы для нахождения действительных корней уравнения (3). Для нахождения наибольшего по абсолютной величине действительного корня (3) используем метод Бернулли [11–12]. Поэтому зададимся целью применить r/φ алгоритм [6] для отыскания комплексных корней полиномиального уравнения (3). Для этого применим указанный алгоритм, основанный на суммировании расходящихся непрерывных дробей [13].

Аналитические решения. Преобразуем выражения для нахождения корней (4)-(7). Тогда выражение (4) можно представить как отношение определителей Теплица:

$$x_1 = - \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}} \cdot \frac{\begin{vmatrix} -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}. \quad (8)$$

С учетом (8), будут справедливы следующие выражения для нахождения корней.

$$x_2 = - \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}} \cdot \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}, \quad (9)$$

$$x_3 = - \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & -\alpha_6 & -\alpha_7 & \dots \\ -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & -\alpha_6 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & -\alpha_6 & \dots \\ -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}} \cdot \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}, \quad (10)$$

.....

$$x_i = - \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_i & -\alpha_{i+1} & -\alpha_{i+2} & -\alpha_{i+3} & \dots \\ -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & -\alpha_{i+1} & -\alpha_{i+2} & \dots \\ -\alpha_{i-2} & -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & -\alpha_{i+1} & \dots \\ -\alpha_{i-3} & -\alpha_{i-2} & -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_i & -\alpha_{i+1} & -\alpha_{i+2} & \dots \\ -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & -\alpha_{i+1} & \dots \\ -\alpha_{i-2} & -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}} \cdot \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & -\alpha_{i+1} & -\alpha_{i+2} & \dots \\ -\alpha_{i-2} & -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & -\alpha_{i+1} & \dots \\ -\alpha_{i-3} & -\alpha_{i-2} & -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & \dots \\ -\alpha_{i-4} & -\alpha_{i-3} & -\alpha_{i-2} & -\alpha_{i-1} & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & -\alpha_{i+1} & \dots \\ -\alpha_{i-2} & -\alpha_{i-1} & -\alpha_i & \dots \\ -\alpha_{i-3} & -\alpha_{i-2} & -\alpha_{i-1} & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{vmatrix}}. \quad (11)$$

Следует отметить, что для любой подходящей дроби $\frac{p_k}{q_k}$ к действительному числу x_i справедливо оценочное неравенство

$$\left| \alpha - \frac{p_k}{q_k} \right| < \frac{1}{q_k^2}.$$

Каждое из выражений (8)–(11), которое по сути являются выражениями для корней уравнения (3), обозначим через $X_i^{(n)}$:

$$X_i^{(n)} = X_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n).$$

Заметим, что для полиномиальных уравнений (3), для которых $n > 4$, $X_i^{(n)}$ аналогичны их записи для уравнений 2-го, 3-го и 4-го порядков [14].

В случае, когда корни (3) действительны, то их значения можно установить непосредственно, вычисляя значения определителей из (8)–(11). Введение (8)–(11) и их рассмотрение как непрерывных дробей специального вида, делает возможным упростить решение уравнение (3), применяя функции $X_i^{(n)}$, а также r/φ -алгоритм.

Если рассматривается приведенное полиномиальное уравнение (3) только с действительными коэффициентами α_i определители, используемые в формулах (8)–(11), тоже будут действительными числами. А если уравнение имеет комплексные корни следует дополнительно применять r/φ -алгоритм [15].

Считаем, что модуль и аргумент комплексного числа, являющегося корнем уравнения (3) для $X_i^{(n)}$, можно найти по формуле [16]:

$$r_0 = \lim_{p \rightarrow \infty} \sqrt[p]{\prod_{k=1}^p |X_{ip}^{(n)}|}, \quad (12)$$

$$|\phi_0| = \pi \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{k_p}{p}, \quad (13)$$

Здесь $X_{ip}^{(n)}$ – p -я подходящая дробь [9], k_p – число отрицательных подходящих дробей из p подходящих дробей.

Например, $X_{2p}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} X_{21}^{(n)} &= \frac{|-\alpha_2|}{1} : \frac{|-\alpha_1|}{1}, \\ X_{22}^{(n)} &= \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 \end{vmatrix}}{|-\alpha_2|} : \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 \\ -1 & -\alpha_1 \end{vmatrix}}{|-\alpha_1|}, \\ X_{23}^{(n)} &= \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_4 & -\alpha_4 \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 \\ 0 & -1 & -\alpha_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 \\ -1 & -\alpha_1 \end{vmatrix}}, \dots \end{aligned}$$

Следует отметить, что, так как в выражения, стоящие в знаменателе входят определители, то рассматриваемые матрицы не должны быть плохо обусловленными [17, 18].

Численные результаты. Для нахождения подходящих цепных дробей в виде отношения определителей Теплица [19] можно использовать рекуррентный модифицированный алгоритм QD-алгоритм Рутисхаузера, который в упрощённой форме записи может быть представлен как [20]:

$$e_n^{(m)} = e_{n-1}^{(m+1)} + x_n^{(m+1)} - x_n^{(m)}, \quad (14)$$

$$x_{n+1}^{(m)} = x_n^{(m+1)} \cdot \frac{e_n^{(m+1)}}{e_n^{(m)}}. \quad (15)$$

На рис. 1 приведена схема применяемого алгоритма.

Пусть $e_0^m = 0$; $x_1^{(m)}$ – элементы первой строки представляют собой последовательные подходящие дроби Хессенберга [13]. Их значение удобнее вычислять, представляя (7) восходящей дробью.

$$x_1^m = (-\alpha_1) + \frac{(-\alpha_2) + \frac{(-\alpha_3) + \dots + \frac{(-\alpha_n)}{x_1^{(m-n+1)}}}{x_1^{(m-3)}}}{x_1^{(m-2)}}, m = 1, 2, \dots \quad (16)$$

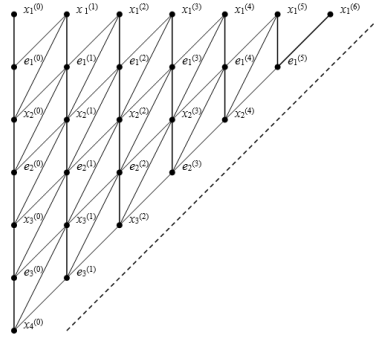


Рис. 1. Схема модифицированного алгоритма Рутисхаузера

Запишем (16) в эквивалентной форме

$$x_1^{(m)} = (-\alpha_1) + \frac{(-\alpha_2)}{x_1^{(m-1)}} + \frac{(-\alpha_3)}{x_1^{(m-2)} x_1^{(m-1)}} + \dots + \frac{(-\alpha_n)}{x_1^{(m-n+1)} x_1^{(m-n)} \dots x_1^{(m-1)}}. \quad (17)$$

В качестве примера применения описанного алгоритма рассмотрим решение нелинейного уравнения, имеющего комплексные корни:

$$x^5 - 4(1 + \cos 1)x^4 + (8 + 16 \cos 1)x^3 - 16(1 + \cos 1)x^2 + 16x = 0. \quad (18)$$

Уравнение (18) имеет корни:

$$x_1 = 2, x_2 = 2e^i, x_3 = 2e^{-i}, x_4 = 2, x_5 = 0.$$

На рис. 2 показано распределение подходящих дробей для (18).

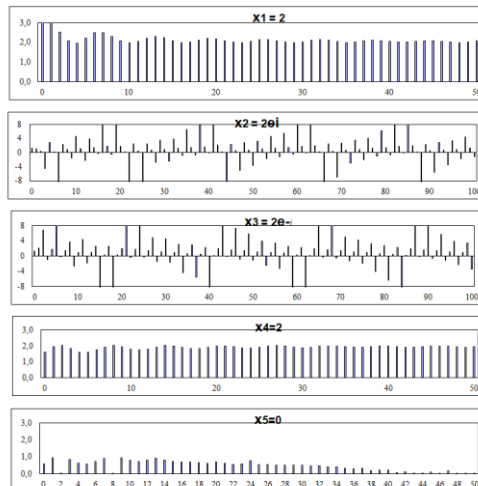


Рис. 2. Распределение подходящих дробей

Максимальное число шагов для заданной погрешности $\varepsilon = 10^{-3}$ составило $N=48$.

Заключение. Преимуществом предложенного в данной статье алгоритма отыскания корней (и комплексных в том числе) полиномиального уравнения степени n является малое количество затрачиваемых арифметических операций и простота в программировании.

Приведенные аналитические выражения для решения уравнения (3) позволяют исследовать полиномы n -й степени; устанавливать критерии отбора корней рассмотренного полиномиального уравнения. Рассмотренный алгоритм может быть успешно практически применен при исследовании математических моделей в гидравлике [21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зеленова М.Е. О решении полиномиальных уравнений в произвольных порядках // Чебышевский сборник. – 2015. – № 2 (54). – С. 117-121.
2. Dixon J.D. Exact Solution of Linear Equations Using P-Adic Expansions // Numerische Mathematik. – 1982. – Vol. 40. – P. 137-141.
3. Cohen H. A Course in Computational Algebraic Number Theory. – New York: Springer, 1996. – 545 p.
4. Руйе Ф., Циммерман П. Эффективное выделение действительных корней многочлена // Журнал вычислительной и прикладной математики. – 2004. – Т. 162 (1). – С. 33-50.
5. Кутищев Г.П. Решение алгебраических уравнений произвольной степени: теория, методы, алгоритмы. – М.: Изд-во URSS, 2010. – 232 с.
6. Вержбицкий В.М. Численные методы математической физики: учеб. пособие. – М: Директ.-Медиа, 2013. – 212 с.
7. Рунтисхаузер Г. Алгоритм частных и разностей. – М.: ИИЛ, 1960. – 93 с.
8. Гузик В.Ф., Шмойлов В.И., Кириченко Г.А. Непрерывные дроби и их применение в вычислительной математике // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 1 (150). – С. 158-174.
9. Шмойлов В.И., Коваленко В.Б. Некоторые применения алгоритма суммирования расходящихся непрерывных дробей // Вестник Южного Научного Центра РАН. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 3-13.
10. Трубников Ю.В. Расходящиеся степенные ряды и формулы приближенного аналитического нахождения решений алгебраических уравнений // Весн. Вісб. дзярж. ун-та. – 2018. – № 4 (101). – С. 5-17.
11. Bruno A.D. Universal Generalization of the Continued Fraction Algorithm // Чебышевский сборник. – 2015. – 16 (2). – С. 35-65.
12. Федоров Ф.М., Абрамова М.Е. О решении алгебраических уравнений бесконечной степени обобщенным методом Бернулли // Математические заметки СВФУ. – 2004. – № 2. – С. 1-9.
13. Долгой В.Е., Шмойлов В.И. Решение алгебраических уравнений непрерывными дробями // Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы: Матер. Международной научно-технической конференции. – 2009. – С. 164-167.
14. Гладковский С.Н. Анализ условно-периодических цепных дробей. Ч. 1. – Незлобная, 2009. – 138 с.
15. Шмойлов В.И. Непрерывные дроби и г/ф-алгоритм. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 608 с.
16. Долгой В.Е. Цепные дроби и их применение в приближенных вычислениях // Наука и техника, общество и культура: проблемы конвергентного развития: Сб. материалов Молодежных научных чтений: в 2 частях. Южный федеральный университет. – 2018. – С. 179-184.
17. Ильин В.А., Ким Г.Д. Линейная алгебра и аналитическая геометрия. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 320 с.
18. Лебедева А.В., Рябов В.М. О численном решении систем линейных алгебраических уравнений с плохо обусловленными матрицами // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2019. – № 4. – С. 619-625.

19. Böttcher A.; Grudsky S. Toeplitz Matrices, Asymptotic Linear Algebra and Functional Analysis. – Basel: Birkhäuser, 2012. – 112 p.
20. Friedrich L. Bauer. Origins and Foundations of Computing: In Cooperation with Heinz Nixdorf Museums Forum. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010. – 142 p.
21. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Изд-во Колос-С, 2009. – 656 с.

REFERENCES

1. Zelenova M.E. O reshenii polinomial'nykh uravneniy v proizvolnykh poryadkakh [On the solution of polynomial equations in arbitrary orders], *Chebyshevskiy sbornik* [Chebyshev collection], 2015, No. 2 (54), pp. 117-121.
2. Dixon J.D. Exact Solution of Linear Equations Using P-Adic Expansions, *Numerische Mathematik*, 1982, Vol. 40, pp. 137-141.
3. Cohen H. A Course in Computational Algebraic Number Theory. New York: Springer, 1996, 545 p.
4. Ruye F., Tsimmerman P. Effektivnoye vydeleniye deystvitel'nykh korney mnogochlena [Efficient allocation of real roots of a polynomial], *Zhurnal vychislitel'noy i prikladnoy matematiki* [Journal of Computational and Applied Mathematics], 2004, Vol. 162 (1), pp. 33-50.
5. Kutishchev G.P. Resheniye algebraicheskikh uravneniy proizvol'noy stepeni: teoriya, metody, algoritmy [Solving algebraic equations of arbitrary degree: theory, methods, algorithms]. Moscow: Izd-vo URSS, 2010, 232 p.
6. Verzhbitskiy V.M. Chislennyye metody matematicheskoy fiziki: ucheb. posobiye [Numerical methods of mathematical physics: textbook]. Moscow: Direkt.-Media, 2013, 212 p.
7. Rutiskhauzer G. Algoritm chastnykh i raznostey [Algorithm of quotients and differences]. Moscow: IIL. 1960, 93 p.
8. Guzik V.F., Shmoylov V.I., Kirichenko G.A. Nepreryvnyye drobi i ikh primeneniye v vychislitel'noy matematike [Continued fractions and their application in computational mathematics], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering sciences], 2014, No. 1 (150), pp. 158-174.
9. Shmoylov V.I., Kovalenko V.B. Nekotoryye primeneniya algoritma summirovaniya raskhodyashchikhsya nepreryvnykh drobey [Some applications of the summation algorithm for divergent continued fractions], *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, Vol. 8. No. 4, pp. 3-13.
10. Trubnikov Yu.V. Raskhodyashchiyesya stepennyye ryady i formuly priblizhennogo analiticheskogo nakhozhdeniya resheniy algebraicheskikh uravneniy [Divergent Power Series and Formulas for Approximate Analytical Finding of Solutions to Algebraic Equations], *Vesn. Vitseb. dzharzh. un-ta*, 2018, No. 4 (101), pp. 5-17.
11. Bruno A.D. Universal Generalization of the Continued Fraction Algorithm, *Chebyshevskiy sbornik* [Chebyshev collection], 2015, 16 (2), pp. 35-65.
12. Fedorov F.M., Abramova M.E. O reshenii algebraicheskikh uravneniy beskonечноy stepeni obobshchennym metodom Bernulli [On the solution of algebraic equations of infinite degree by the generalized Bernoulli method], *Matematicheskkiye zametki SVFU* [Mathematical notes of NEFU], 2004, No.2, pp. 1-9.
13. Dolgoy V.E., Shmoylov V.I. Resheniye algebraicheskikh uravneniy nepreryvnymi drobyami [Solving algebraic equations by continued fractions], *Mnogoprotsessornyye vychislitel'nyye i upravlyayushchiye sistemy. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Multiprocessor computing and control systems. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference], 2009, pp. 164-167.
14. Gladkovskiy S.N. Analiz uslovno-periodicheskikh tsepnykh drobey. ch. 1. [Analysis of conditionally periodic continued fractions. Part 1]. Nezlornaya. 2009, 138 p.
15. Shmoylov V.I. Nepreryvnyye drobi i r/ϕ -algoritm [Continued fractions and the r/ϕ -algorithm]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2012, 608 p.
16. Dolgoy V.E. Tsepnyye drobi i ikh primeneniye v priblizhennykh vychisleniyakh [Continued fractions and their application in approximate calculations], *Nauka i tekhnika. obshchestvo i kultura: problemy konvergentnogo razvitiya. Sbornik materialov Molodezhnykh nauchnykh chteniy: v 2 chastyakh. Yuzhnyy federalnyy universitet* [Science and technology, society and culture: problems of convergent development. Collection of materials for Youth Scientific Readings: in 2 parts. SFedU], 2018, pp. 179-184.
17. Ilin V.A., Kim G.D. Lineynaya algebra i analiticheskaya geometriya [Linear Algebra and Analytic Geometry]. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1998, 320 p.

18. Lebedeva A.V., Ryabov V.M. O chislennom reshenii sistem lineynykh algebraicheskikh uravneniy s plokho obuslovlennymi matritsami [On the numerical solution of systems of linear algebraic equations with ill-conditioned matrices], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya* [Bulletin of St. Petersburg University. Maths. Mechanics. Astronomy], 2019, No. 4, pp. 619-625.
19. Böttcher A.; Grudsky S. Toeplitz Matrices, Asymptotic Linear Algebra and Functional Analysis. Basel: Birkhäuser, 2012, 112 p.
20. Friedrich L. Bauer. Origins and Foundations of Computing: In Cooperation with Heinz Nixdorf MuseumsForum. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010, 142 p.
21. Shterenliht D.V. Gidravlika [Hydraulics]. Moscow: Izd-vo Kolos-S, 2009, 656 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.Ю. Медведев.

Долгой Вячеслав Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: vedolgoy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89081841211; кафедра высшей математики; старший преподаватель.

Гамоллина Ирина Эдуардовна – e-mail: iegamolina@sfedu.ru; тел. 89185190837; кафедра высшей математики; к.т.н.; доцент.

Dolgoy Vyacheslav Evgenievich – Southern Federal University, e-mail: vedolgoy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79081841211; the department of higher mathematics; senior lecturer.

Gamolina Irina Eduardovna – e-mail: iegamolina@sfedu.ru; phone: +79185190837; the department of higher mathematics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.822

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-37-47

П.Ю. Чудинов, Л.К. Бабенко, Ю.И. Рогозов

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В СЕМАНТИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Анализируется структура, принципы и технологии, используемые при создании семантических сетей, методика представления знаний в семантической сети. Отдельное внимание уделяется анализу структуры запросов к данным, хранящихся в семантической сети. Целью анализа является определение структурных элементов, несущих в себе конфиденциальную, либо иную важную информацию для дальнейшего формирования методологии её защиты с учётом специфики семантической сети. В результате анализа типовых структур семантических сетей рассмотрены основополагающие структурные элементы и понятия, составляющие структуру анализируемого метода представления знаний. Определены используемые для её построения специализированные языки и структура информационного запроса к базе знаний, в которой были выявлены элементы, несущие конфиденциальную информацию и потенциально уязвимые к атакам злоумышленников. Выявлены проблемы в информационной безопасности семантических сетей, такие как: незащищённость от вредоносных запросов SPARQL, которая может быть использована для получения информации из семантической сети без соответствующих привилегий и доступов; уязвимость данных в передаваемом информационном запросе, характеризующаяся слабой ориентированностью существующих методов защиты на специфику семантических сетей; проблема оценки уровня доверия к получаемым данным семантической сети. Одним из подходов для решения этих проблем может являться создание распределённой системы оценивания доверия к узлам и данным в семантической сети, а также реализация механизмов защиты и информационных запросов. Полученные в результате анализа результаты о структуре передаваемых данных являются неотъемлемой частью процесса разработки средств защиты информации в семантических сетях.

Семантическая сеть; онтология; граф; RDF; OWL; SPARQL; представление знаний; информационный запрос.

P.Y. Chudinov, L.K. Babenko, Y.I. Rogozov

ANALYSIS OF PROBLEMS OF INFORMATION PROTECTION IN SEMANTIC NETWORKS

The article analyzes the structure, principles and technologies used in the creation of semantic networks, the methodology for representing knowledge in a semantic network. Special attention is paid to the analysis of the structure of queries to data stored in the semantic network. The purpose of the analysis is to determine the structural elements that carry confidential or other important information for the further formation of a methodology for its protection, considering the specifics of the semantic network. As a result of the analysis of typical structures of semantic networks, the fundamental structural elements and concepts that make up the structure of the analyzed method of knowledge representation are considered. The specialized languages used for its construction and the structure of the information request to the knowledge base are determined, in which elements carrying confidential information and potentially vulnerable to attacks by intruders were identified. Problems in the information security of semantic networks have been identified, such as: exposure to malicious SPARQL queries, which can be used to obtain information from the semantic network without appropriate privileges and accesses; data vulnerability in the transmitted information request, characterized by a weak focus of existing protection methods on the specifics of semantic networks; the problem of assessing the level of confidence in the received data of the semantic network. One of the approaches to solve these problems can be the creation of a distributed system for evaluating the trust in nodes and data in the semantic network, as well as the implementation of mechanisms for protecting information and information requests. The results obtained as a result of the analysis on the structure of the transmitted data are an integral part of the process of developing information security tools in semantic networks.

Semantic web; ontology; graph; RDF; OWL; SPARQL; knowledge representation; information query.

Введение. В настоящее время семантические сети являются перспективным средством для создания сложных информационных систем, способных, например, формировать некие выводы на основе данных. Но в отличие от альтернативных технологий, например, на основе блокчейна, семантическая сеть не имеет хорошо развитой политики конфиденциальности и безопасности [1]. Это достаточно критично для веб-стандарта, который используется для создания информационных систем, объединяющих большое количество данных из разных источников. Для того, чтобы исправить недостатки в информационной безопасности семантической сети, требуется провести серьезный анализ и внимательно отнестись к работам исследователей в данной области.

Семантическая сеть – это, по сути, граф, узлы которого помечены атомарными формулами, а дуги представляют собой отношения между ними. Узлы этого графа затем представляют сущности и классы сущностей. Эти классы затем могут быть иерархически упорядочены для представления знаний [2]. Это приводит к двум основным отношениям между узлами, а именно: подкласс, сущность. Методы семантических сетей были впервые разработаны как метод представления человеческих знаний. Основой построения семантической сети являются онтологии, языки запросов, основанные на онтологиях. Структура включает механизмы вывода, предназначенные для таких операций, как наследование. Эти механизмы состоят из двух частей. Одна из них имеет дело с правилами с помощью прямой цепочки, обратной цепочки или каким-либо другим методом. Другая часть будет обрабатывать сетевые операции, сопоставляя соответствующие ссылки в сети, чтобы вывести найденные факты.

В статье анализируется структура, специальные языки запросов, правила формирования логических выводов. Проведение такого анализа, определение средств и методик построения семантических сетей, анализ структуры информационных запросов и потенциальных уязвимостей – являются обязательными шагами на пути к разработке средств защиты информации в семантических сетях.

Постановка задачи. Целью работы является разработка облика средств защиты информации на основании анализа принципов функционирования семантических сетей, определения логических элементов и технологий, участвующих в информационных процессах семантической сети, а также определение данных, которые могут нести важную, либо конфиденциальную информацию и при этом потенциально уязвимых к несанкционированному доступу.

1. Анализ основ построения семантической сети. Проблема проверки на вредоносность информационных запросов. Семантической сетью является структура данных, имеющая определенный смысл и организованная в определенном порядке. Стандартного определения семантической сети не существует, но обычно под ней подразумевают, что семантическая сеть – это система знаний, имеющая определенный смысл в виде целостного образа сети, узлы которой соответствуют понятиям и объектам, а дуги – отношениям между понятиями и объектами [3].

Всевозможные подсети, входящие в состав семантической сети, можно рассматривать как самостоятельные сети. В том числе к ним могут быть отнесены и сетевые структуры моделей баз данных. Например, на рис. 1 представлена довольно простая семантическая сеть, однако, она интересна тем, что на ней представлен пример объединения двух понятий (Airbus A320 и орёл) из двух совершенно разных предметных областей, но имеющих общие свойства и качества.

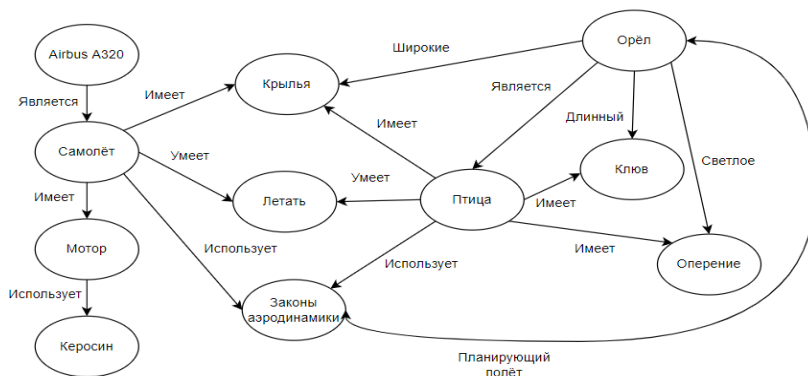


Рис. 1. Пример семантической сети

Сама по себе семантическая сеть является моделью памяти и не раскрывает, каким образом осуществляется представления знаний. Поэтому семантические сети должны рассматриваться как метод представления знаний с возможностями структурирования этих знаний, процедурами их использования и механизмом вывода [4].

Семантическая сеть представляет собой ориентированный граф с помеченными дугами и вершинами. Основными элементами сети являются вершины и дуги. При этом вершинам семантической сети соответствуют понятия, события и свойства [5]:

- ♦ Понятия – представляют собой сведения об абстрактных или физических объектах предметной области или реального мира.
- ♦ События – представляют собой действия, происходящие в реальном мире, и определяются:

- указанием типа действия;
- указанием ролей, которые играют объекты в этом действии.

♦ Свойства – используются для уточнения понятий и событий. Применительно к понятиям они описывают их особенности и характеристики (цвет, размер, качество и т.д.), а применительно к событиям – продолжительность, время, место.

Точно так же, как реляционным базам данных нужен специальный язык запросов SQL, семантическая сеть данных, обычно представляемая с использованием RDF (Resource Description Framework) в качестве формата данных, нуждается в собственном, специфичном для RDF языке запросов. Для обеспечения этой потребности используется язык запросов SPARQL (Simple Protocol and RDF Query Language).

Технически запросы SPARQL основаны на так называемых тройных шаблонах. RDF можно рассматривать как набор отношений между ресурсами (тройная модель RDF). Запросы в SPARQL предоставляют один или несколько шаблонов для таких отношений. Эти тройные шаблоны аналогичны тройкам RDF, за исключением того, что одна или несколько составляющих ссылок на ресурсы являются переменными [6].

Используя SPARQL, пользователи сети данных могут извлекать различную информацию, которая возвращается, например, в формате таблицы, которая затем, при необходимости, может быть подвергнута дальнейшей обработке и анализу [7]. При таком подходе SPARQL предоставляет собой мощный инструмент для создания, например, сложных сайтов или поисковых систем, а также информационных систем, способных с применением определённых правил проводить анализ имеющихся данных, и делать на основании этого некоторые логические выводы.

На рис. 2 представлена схема клиент-серверного взаимодействия в типичной семантической сети, основанной на правилах. С помощью пользовательского интерфейса клиент получает доступ к взаимодействию, например, со значениями определённых переменных. Задав значения этих переменных, их можно обработать соответствующим логическим модулем информационной системы, а затем, используя логические правила на языке SPARQL, выбрать нужные источники данных из базы данных RDF [8].

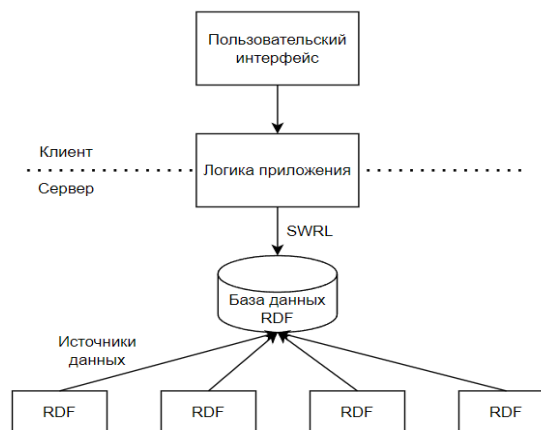


Рис. 2. Структура клиент-серверной архитектуры ИС с доступом к семантической сети

SPARQL можно использовать как часть общей среды программирования, но запросы также можно отправлять в виде сообщений на удалённые конечные точки с использованием сопутствующих технологий. Используя такие конечные точки SPARQL, приложения могут запрашивать удалённые данные RDF и даже создавать новые RDF-графы без какой-либо дополнительной нагрузки на сервер [6].

С точки зрения безопасности для запросов остаются нерешёнными такие проблемы, как атаки, основанные на инъекциях вредоносного кода в запрос SPARQL. Подобная угроза существует и в языке запросов SQL, однако, в SPARQL в отличие от SQL проводилось гораздо меньшее количество исследований. Так в работе [9] отмечается малое количество работ, посвящённых этой проблеме, которые лишь ограниченно или поверхностно затрагивают эту тему. В работе [10] также отмечается незначительное количество работ, направленных на последствия для безопасности после применения технологии семантических сетей в различных системах. В таких работах конфиденциальность данных рассматривалась как отдельная, специфическая и часто чисто техническая задача, связанная чаще всего только с идентификацией, либо сбором или доступом к данным. За некоторыми исключениями, очень немногие работы действительно рассматривают потенциал технологий семантической сети. В работе [11] отмечается низкая эффективность существующих предложений по защите семантических сетей. По-прежнему требуется повышение производительности алгоритмов оценки уровня доверия и более полная интеграция и взаимодействие различных подходов к управлению доступом. Таким образом, на настоящий момент отсутствуют эффективные средства защиты и контроля запросов в семантических сетях.

2. Анализ структуры запросов в семантической сети. Проблема безопасности данных в информационных запросах. Семантическая сеть основана на связанных данных, в которых необходимые элементы идентифицируются с помощью URI (унифицированный идентификатор ресурса). Из-за такого подхода семантическая сеть в значительной степени зависит от способности этих идентификаторов успешно извлекать документы, иначе семантическую сеть нельзя было бы назвать сетью [1].

База данных хранит семантические данные и онтологии, позволяет запрашивать семантические данные и выполнять запросы с помощью онтологий к реляционным данным, а также использовать предоставляемые или определяемые пользователем логические выводы для расширения возможностей запросов к семантическим данным.

На рис. 3 отражено, как взаимодействуют функции хранения, запросов и логических выводов. Структура содержит в себе четыре компонента, помеченные как логический модуль, запрос данных, хранилище и база данных [12].

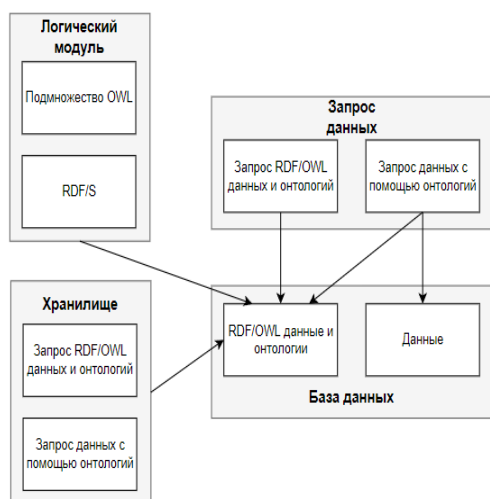


Рис. 3. Структура взаимодействия элементов семантической сети с базой данных

Как показано на рис. 1, база данных содержит семантические данные и онтологии. Наиболее эффективным подходом для загрузки семантических данных является массовая загрузка, но также можно загружать данные постепенно, используя транзакционные операторы логического модуля. Таким образом, можно запрашивать семантические данные, а также выполнять запросы семантических и традиционных реляционных данных с помощью онтологий для поиска семантических отношений.

При анализе кода обработки поиска для функции запроса, представленного на рис. 4, авторами статьи [9], что структура запроса SPARQL разделена на зарезервированные слова SPARQL, переменные SPARQL, отношения онтологий, которые представлены URI, знаки препинания SPARQL и переменная PHP.

Согласно анализу [9], слабым местом запроса SPARQL, с точки зрения информационной безопасности является переменная PHP, которая должна получать значение заполненного поля ввода от пользователя без проверки того, каким может быть произведён этот код и не находятся ли в нём элементы потенциально вредоносного кода.

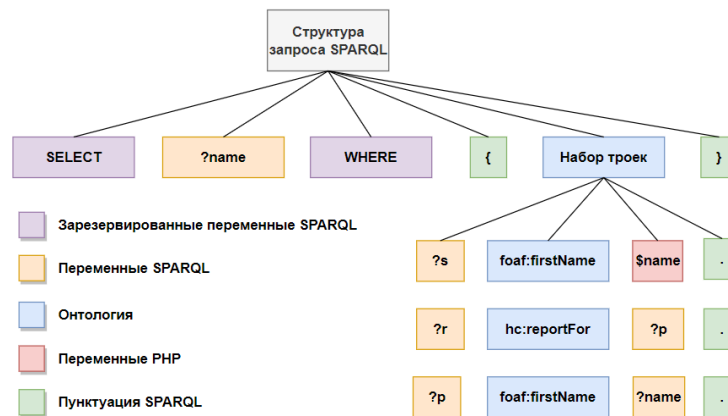


Рис. 4. Анализ структуры запроса SPARQL

Рассмотрим некоторые проблемы, связанные со структурой запросов. В работе [13] отмечается ограниченность реализации безопасности тройки RDF в том, что нет возможности реализовать ограничение доступа, например, к конкретному объекту для конкретного пользователя. Также, часто используемые для контроля доступа метаданные RDF не обеспечивают защиты, так как возвращают результат в виде обычного текста, который, таким образом, может быть перехвачен. В работе [9] проводилось исследование инъекций в запрос SPARQL и было установлено, что в переменную PHP, отвечающую за хранение имени в наборе троек, может быть встроен потенциально вредоносный код, с помощью которого можно получить доступ к конфиденциальной информации. Авторы работы [14] уделяют внимание таким проблемам, как ориентированные только на синтаксис средства безопасности XML; отсутствие средств защиты для онтологий, не зависящих от синтаксиса; отсутствие ассоциативной защиты конфиденциальных данных, которые могут быть связаны с другими открытыми данными и могут появляться вместе.

3. Стек семантической сети. Проблема определения уровня доверия. Стек семантической сети используется для визуального отображения архитектуры семантической сети, состоящей из многоуровневых протоколов. Функции и отношения между различными компонентами показаны на рис. 5 [15]:

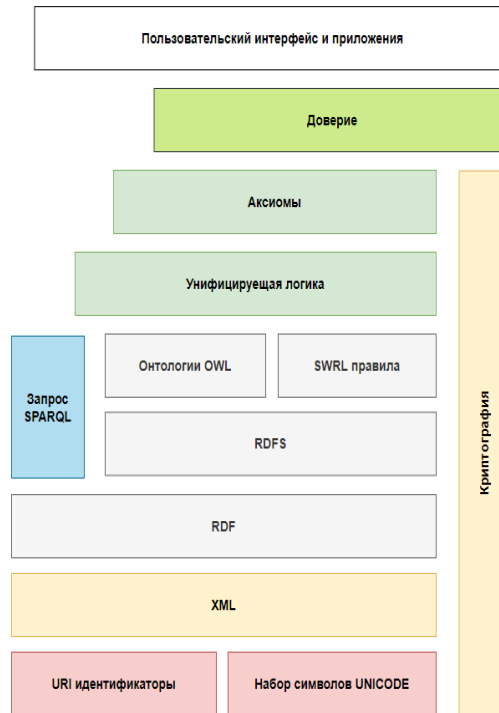


Рис. 5. Структура ИС, основанной на семантической сети

XML – это синтаксический уровень семантической сети. XML – это язык разметки, который организует данные в виде тегов. Вложенная структура тегов определяет взаимосвязь данных в документе. XML не имеет фиксированного набора тегов, теги определяются пользователями, поэтому XML очень гибкий и может использоваться в качестве метаязыка языка разметки [16].

RDF – это уровень обмена данными в семантической сети. RDF – это модель данных, используемая для описания ресурсов в интернете и взаимосвязи между ресурсами [17]. Её цель – установить общую структуру для описания сетевых ресурсов. RDF решает проблему, заключающуюся в том, что грамматика XML не может описывать семантику.

OWL – это язык онтологии семантической сети. Этот язык используется для построения онтологии, связанной с исследуемой областью. На основе схемы RDF в OWL создаётся словарь для описания классов и свойств, таких как дизъюнктивность классов, ограничения мощности, логические комбинации классов, более обширные свойства и свойства свойств, а также классы перечисления [18].

Хотя онтология, организованная в виде семантической сети, очень хорошо отражает структуру исследуемой предметной области, языка OWL далеко не достаточно для работы со свойствами объектов и формирования каких-либо рассуждений. Для полноценной работы онтологии её нужно научить делать эти самые логические суждения. На помощь здесь приходят правила.

Правило – это формула (1) образа:

$$\phi_1 \wedge \dots \wedge \phi_k \rightarrow \Psi, \quad (1)$$

где $\phi_1 \wedge \dots \wedge \phi_k \rightarrow \psi$ – проверяемые условия, а ψ – некий вывод. Смысл правила заключается в том, что всякий раз, когда условия истинны, то вывод, вытекающий из совокупности этих условий, тоже принимает значение истинно.

SWRL (язык правил семантической паутины) – это формат обмена правилами семантической сети. SWRL разработан для того, чтобы восполнить неспособность логических суждений языка OWL. SWRL правила описывают знания онтологии OWL с помощью высоко абстрактного синтаксического выражения, которое реализует собой комбинацию между правилами знаниями OWL и некими логическими выводами, следующими из совокупности значений определённых свойств.

Не стоит забывать, что онтологии, применяемые в реальных условиях, постоянно развиваются [19], соответственно, требования к ним постоянно меняются. Некоторые онтологические знания перестают иметь отношения к предметной области или становятся незначительными и ненужными для проведения рассуждений. В этом случае это знание необходимо удалить из онтологии. Подобным образом необходимо добавлять в онтологию новые термины и отношения, которые необходимы для поддержки новых требований.

Уровень доверия к семантической сети определяется как вера в надёжность получаемых данных. Основными свойствами, определяющими уровень доверия к сети, являются: конфиденциальность, целостность и доступность данных. Текущий фокус исследований в контексте семантических сетей переключается с надёжностью и достоверностью данных.

Оценку доверия в семантической сети можно выполнять, опираясь на централизованность и распределённость архитектурных решений. В централизованной системе информация, касающаяся деятельности каждого участника, собирается от других пользователей, которые имели непосредственный опыт работы с этим конкретным узлом в сети. Затем, в специальном модуле системы собираются все полученные рейтинги и подсчитываются баллы для каждого члена узла [20].

Что касается распределённой оценки репутации при принятии решений об обмене данными с другими участниками в сети, то здесь нет единого центра с рейтингами доверия, вместо этого есть несколько баз репутации, где каждый участник может обмениваться опытом взаимодействия с другими участниками сети [21].

При оценке доверия в распределённых системах как правило необходимо применять такие интеллектуальные средства, которые позволяют оценивать актуальные рейтинги для комментариев, предоставленных узлами, честность рекомендаций, предоставленных каждым узлом в семантических сетях, и оценка прошлого опыта работы с конкретным узлом, с которым предполагается взаимодействовать.

Заключение. При использовании семантических сетей сетевые ресурсы и службы должны быть защищены от несанкционированного доступа, а программные агенты должны быть уверены в конфиденциальности данных, которые они раскрывают службам. Широкий спектр связанных с безопасностью понятий, таких как аутентификация, авторизация, контроль доступа, конфиденциальность, целостность данных и приватность, имеют непосредственное отношение к семантическим сетям и требуют специального рассмотрения. Проблемы безопасности существуют в различных аспектах семантических сетей, и общую безопасность можно обеспечить, следуя определённому подходу или используя определённые механизмы. Для достижения этих целей были рассмотрены структуры семантических данных и информационных запросов к ним. В результате анализа выявлено, что было проделано не так много работ по созданию алгоритмов и стандартов для проверки достоверности и целостности данных.

В настоящее время низкоуровневое шифрование, механизмы цифровой подписи, сертификация и инфраструктура открытых ключей обеспечивают хорошую инфраструктуру безопасности. Однако обеспечение безопасности более высокого уровня, особенно без предварительных доверительных отношений, зависит от множества специальных механизмов, оставляет дыры в безопасности, требующие соответствующих разработок и исследований.

Как видно из изложенного аналитического материала в области защиты информации семантических сетей существует ряд не решённых проблем, связанных с отсутствием готовых рекомендаций по защите семантических сетей, которые достаточно актуальны и требуют эффективного решения на сегодняшний день. Создание эффективных средств защиты информации с использованием прежде всего современных криптографических методов является актуальной задачей. В дальнейшем, используя полученные результаты по специфике семантических сетей, планируется провести исследование потенциальных уязвимостей этой технологии, а также сформировать рекомендации для их решения с точки зрения информационной безопасности. Авторы статьи имеют результаты в области создания криптографических средств в не доверенных средах и могут применить эти результаты при построении средств защиты семантических сетей [22]. Необходимы дальнейшие исследования относительно того, какие методы криптографической защиты являются наиболее подходящими, учитывая специфику исследуемой области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Halpin H.* Semantic Insecurity: Security and the Semantic Web. – Paris, France, 2017.
2. *Muhammad L.J., Garba E.J., Oye N.D., Wajiga G.M.* On the Problems of Knowledge Acquisition and Representation of Expert System for Diagnosis of Coronary Artery Disease (CAD) // International Journal of u- and e- Service, Science and Technology. – 2018. – Vol. 11, No. 3. – P. 49-58.
3. *Хабаров С.* Курс лекций по дисциплине «Представление знаний в информационных системах» доцента кафедры информационных систем и технологий. – СПбГЛТУ.
4. *Patel A., Jain S.* Formalism of Representing Knowledge // 6th International Conference on Smart Computing and Communications. – 2017.
5. *Кобринский Б.А.* Методология формализации знаний. – РНИМУ им. Н.И. Пирогова, 2020.
6. The World Wide Web Consortium (W3C). Query. – URL: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/query>.
7. *Macina A.* SPARQL distributed query processing over linked data. – Université Côte d’Azur, 2019.
8. *Gibbins N.* Semantic Web in Depth. SPARQL Protocol and RDF Query Language // Electronics and Computer Science. – University of Southampton, 2014.
9. *Bamashmoos F., Holyer I., Tryfonas T., Woznowski P.* Towards Secure SPARQL Queries in Semantic Web Applications using PHP Faculty of Engineering. – University of Bristol, Bristol, United Kingdom Faculty of Computing and Information Technology, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia. – 2017.
10. *Kirrane S., Villatam S., d’Aquin M.* Privacy, security and policies: A review of problems and solutions with semantic web technologies // Semantic Web. – 2018. – Vol. 9, No. 2. – P. 153-161.
11. *Rahimzadeh Holagh S., Mohebbi K.* A glimpse of Semantic Web trust // SN Applied Sciences. – Switzerland, 2019.
12. *Medi’c A., Golubovi’c A.* Making secure semantic Web // Universal Journal of Computer Science and Engineering Technology. – 2010. – P. 99-104.
13. *Fizza Abbas U., Hussain R., Son J., Oh H.* A Study of RDF Security Concerns in Semantic Web // Fall Conference of the Korean Society for Information Processing. – 2013. – Vol. 20, No. 2. – P. 906-909.
14. *Malik N., Kumar S.* Malik Security in Web Semantics: A Revisit // 12th INDIACom; INDIACom-2018; 5th International Conference on Computing for Sustainable Global Development. – 2018.
15. *Atkinson S., Jagodzinski P., Johnson C., Phippen A.* Semantic Web: a personal privacy perspective // WIT Transactions on Information and Communication Technologies. – 2006.
16. *Одиночкина С.В.* Основы технологий XML. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 56 с.
17. *Elnaggar A.* The Semantic Web. Department of Information Technology, Institute of Graduate Studies and Research, University of Alexandria, Egypt. – 2015.
18. *Sazonau, V., Sattler, U., Brown, G.* General Terminology Induction in OWL // The Semantic Web – ISWC 2015: 14th International Semantic Web Conference. – 2015. – P. 533-550.
19. *Maedche A., Volz R.* The ontology extraction & maintenance framework Text-To-Onto // Proceedings of the Workshop on Integrating Data Mining and Knowledge Management. – 2001.

20. Glimm B., Stuckenschmidt H. 15 Years of Semantic Web: An Incomplete Survey // *Künstliche Intelligenz*. – Springer, 2016. – Vol. 30, No. 2. – P. 117-130.
21. Sabater J., Sierra C. REGRET: a reputation model for gregarious societies // *Proceedings of the 4th international workshop on deception, fraud and trust in agent societies*. – 2005. – P. 61-69.
22. Babenko L.K., Tolomanenko E.A. Development of algorithms for data transmission in sensor networks based on fully homomorphic encryption using symmetric Kuznyechik algorithm // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – 1812. – 012034. – DOI: 10.1088/1742-6596/1812/1/012034.

REFERENCES

1. Halpin H. *Semantic Insecurity: Security and the Semantic Web*. Paris, France, 2017.
2. Muhammad L.J., Garba E.J., Oye N.D., Wajiga G.M. On the Problems of Knowledge Acquisition and Representation of Expert System for Diagnosis of Coronary Artery Disease (CAD), *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology*, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 49-58.
3. Khabarov S. Kurs lektsiy po distsipline «Predstavlenie znaniy v informatsionnykh sistemakh» dotsenta kafedry informatsionnykh sistem i tekhnologiy [Course of lectures on the discipline "Knowledge Representation in Information Systems", Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies]. SPbGLTU.
4. Patel A., Jain S. Formalism of Representing Knowledge, *6th International Conference on Smart Computing and Communications*, 2017.
5. Kobrinskiy B.A. Metodologiya formalizatsii znaniy [Methodology of knowledge formalization]. RNIMU im. N.I. Pirogova, 2020.
6. The World Wide Web Consortium (W3C). Query. Available at: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/query>.
7. Macina A. SPARQL distributed query processing over linked data. Université Côte d'Azur, 2019.
8. Gibbins N. Semantic Web in Depth. SPARQL Protocol and RDF Query Language, *Electronics and Computer Science*. University of Southampton, 2014.
9. Bamashmoos F., Holyer I., Tryfonas T., Woznowski P. Towards Secure SPARQL Queries in Semantic Web Applications using PHP Faculty of Engineering. University of Bristol, Bristol, United Kingdom Faculty of Computing and Information Technology, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia, 2017.
10. Kirrane S., Villatam S., d'Aquin M. Privacy, security and policies: A review of problems and solutions with semantic web technologies, *Semantic Web*, 2018, Vol. 9, No. 2, pp. 153-161.
11. Rahimzadeh Holagh S., Mohebbi K. A glimpse of Semantic Web trust, *SN Applied Sciences*. Switzerland, 2019.
12. Medi'c A., Golubovi'c A. Making secure semantic Web, *Universal Journal of Computer Science and Engineering Technology*, 2010, pp. 99-104.
13. Fizza Abbas U., Hussain R., Son J., Oh H. A Study of RDF Security Concerns in Semantic Web, *Fall Conference of the Korean Society for Information Processing*, 2013, Vol. 20, No. 2, pp. 906-909.
14. Malik N., Kumar S. Malik Security in Web Semantics: A Revisit, *12th INDIACom; INDIACom-2018; 5th International Conference on Computing for Sustainable Global Development*, 2018.
15. Atkinson S., Jagodzinski P., Johnson C., Phippen A. Semantic Web: a personal privacy perspective, *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 2006.
16. Odinochkina S.V. Osnovy tekhnologiy XML [Fundamentals of XML technologies]. Saint Petersburg: NIU ITMO, 2013, 56 p.
17. Elnaggar A. The Semantic Web. Department of Information Technology, Institute of Graduate Studies and Research, University of Alexandria, Egypt, 2015.
18. Sazonau, V., Sattler, U., Brown, G. General Terminology Induction in OWL, *The Semantic Web – ISWC 2015: 14th International Semantic Web Conference*, 2015, pp. 533-550.
19. Maedche A., Volz R. The ontology extraction & maintenance framework Text-To-Onto, *Proceedings of the Workshop on Integrating Data Mining and Knowledge Management*, 2001.
20. Glimm B., Stuckenschmidt H. 15 Years of Semantic Web: An Incomplete Survey, *Künstliche Intelligenz*. Springer, 2016, Vol. 30, No. 2, pp. 117-130.

21. Sabater J., Sierra C. REGRET: a reputation model for gregarious societies, *Proceedings of the 4th international workshop on deception, fraud and trust in agent societies*, 2005, pp. 61-69.
22. Babenko L.K., Tolomanenko E.A. Development of algorithms for data transmission in sensor networks based on fully homomorphic encryption using symmetric Kuznyechik algorithm, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1812, 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/1812/1/012034.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.Е. Веселов.

Бабенко Людмила Климентьевна – Южный федеральный университет; e-mail: lkbabenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89054530191; кафедра безопасности информационных технологий; профессор.

Чудинов Павел Юрьевич – e-mail: chudinov@sfedu.com; тел.: 89198722200; кафедра безопасности информационных технологий; аспирант.

Рогозов Юрий Иванович – e-mail: yrogozov@sfedu.ru; тел.: +78634371787; кафедра системного анализа и телекоммуникаций; профессор.

Babenko Lyudmila Klimentevna – Southern Federal University; e-mail: blk@fib.tsure.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054530191; the department of security of information technologies; professor.

Chudinov Pavel Yurevich – e-mail: chudinov@sfedu.ru.com; phone: +79198722200; the department of information technology security; postgraduate student.

Rogozov Yuri Ivanovich – e-mail: yrogozov@sfedu.ru; phone: +78634371787; the department of system analysis and telecommunications; professor.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-47-62

О.Б. Лебедев, А.А. Жиглатый

КО-ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ РАЗМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУБПОПУЛЯЦИЙ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ СТРАТЕГИЯМИ ПОИСКА*

Разработана новая методология и метод размещения элементов СБИС, отличающиеся тем, что решение задачи размещения основывается на использовании фиксированного порядка выбора позиций, ориентированного на эффективное решение задачи размещения, и эвристической процедуры распределения элементов по позициям, позволяющие снизить общую трудоемкость, и повысить качество решения. Процесс формирования списка позиций на коммутационном поле осуществляется с использованием механизмов волнового алгоритма. В основу выбора окончательного списка положен принцип построения маршрута с минимальной оценкой суммарной линейной длины расстояний между позициями маршрута. Для решения задачи размещения разработан поисковый алгоритм на основе модифицированного метода муравьиной колонии. Для исключения преждевременной сходимости и локализации глобального экстремума задачи разработка алгоритма производилась на основе ко-эволюционного подхода. Архитектура ко-эволюционного алгоритма размещения разработана на основе парадигмы муравьиного алгоритма. В пространстве поиска субпопуляции параллельно реализуют четыре стратегии оптимизации. В работе процесс ко-эволюции реализован на основе взаимодействия субпопуляций, отличающихся стратегиями поиска. Отличительной особенностью используемого ко-эволюционного подхода является то, что субпопуляции решений фактически являются виртуальными. Процесс ко-эволюции реализуется одной популяцией агентов Z путем последовательного формирования и слияния, виртуальных субпопуляций решений в одну популяцию. В работе решение задачи размещения направлено на повышение трассируемости посредством миними-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00260 А.

зации ресурсов, требуемых для реализации соединений. Существенный вклад в минимизацию пространственной и временной сложности поисковой процедуры внесли: использование виртуальными субпопуляциями общей эволюционной памяти, общего графа поиска решений, формирование единой интерпретации решения в виде маршрута на полном ориентированном графе с бинарными ориентированными ребрами. Тестирование производилось на бенчмарках 19s, PrimGA1, PrimGA2. Результаты по сравнению с существующими алгоритмами улучшены на 7-8%. Вероятность получения глобального оптимума составила 0.96. В среднем решения отличаются от оптимального менее, чем на 1.5%. Временная сложность алгоритма при фиксированных значениях размера популяции и количества генераций составляет $O(n)$. Общая временная сложность гибридного алгоритма составляет $O(n^2) - O(n^3)$.

СБИС; размещение; роевой интеллект; муравьиный алгоритм; адаптивное поведение; ко-эволюция; субпопуляция; оптимизация.

O.B. Lebedev, A.A. Zhiglatiy

CO-EVOLUTIONARY PLACEMENT ALGORITHM BASED ON INTERACTION SUBPOPULATIONS DIFFERING IN SEARCH STRATEGIES

A new methodology and method for placing VLSI elements has been developed, which differ in that the solution of the placement problem is based on the use of a fixed order of position selection, focused on the effective solution of the placement problem, and a heuristic procedure for distributing elements by positions, which reduces the overall complexity and improves the quality of the solution. The process of forming a list of positions on the switching field is carried out using the mechanisms of the wave algorithm. The choice of the final list is based on the principle of constructing a route with a minimum estimate of the total linear length of distances between route positions. To solve the placement problem, a search algorithm based on the modified ant colony method has been developed. To exclude premature convergence and localization of the global extremum of the problem, the development of the algorithm was carried out on the basis of the co-evolutionary approach. The architecture of the co-evolutionary placement algorithm is developed on the basis of the ant colony algorithm paradigm. In the search space, sub-populations implement four optimization strategies in parallel. In the work, the coevolution process is implemented on the basis of the interaction of subpopulations that differ in search strategies. A distinctive feature of the co-evolutionary approach used is that subpopulations of solutions are actually virtual. The process of co-evolution is implemented by one population of agents Z by sequential formation and merging of virtual subpopulations of solutions into one population. In this paper, the solution of the placement problem is aimed at improving traceability by minimizing the resources required to implement connections. A significant contribution to minimizing the spatial and temporal complexity of the search procedure was made by: the use by virtual sub-populations of a common evolutionary memory, a common solution search graph, the formation of a single interpretation of the solution in the form of a route on a complete directed graph with binary directed edges. Testing was carried out on benchmarks 19s, PrimGA1, PrimGA2. The results compared to existing algorithms are improved by 7-8%. The probability of obtaining a global optimum was 0.96. On average, solutions differ from the optimal by less than 1.5%. The time complexity of the algorithm for fixed values of the population size and the number of generations is $O(n)$. The total time complexity of the hybrid algorithm is $O(n^2) - O(n^3)$.

VLSI; placement; swarm intelligence; ant colony algorithm; adaptive behavior; co-evolution; subpopulation; optimization.

Введение. Одной из важнейших задач конструкторского проектирования СБИС является задача размещения элементов на кристалле. Именно размещение во многом определяет качество последующей трассировки. В существующих алгоритмах [1, 2], с одной стороны, связь между этими задачами недостаточно глубока, с другой стороны, получаемые решения, с точки зрения их оптимальности, как правило, неудовлетворительны. Необходимость повышения качества проектирования требует поиска новых путей и подходов к решению задач размещения.

Анализ разработанных алгоритмов размещения (детерминированных, случайного поиска, последовательных, итерационных) показывает, что для создания эффективного алгоритма размещения, отвечающего современным требованиям, необходимы новые технологии и подходы [3]. В работе предлагаются новые технологии, принципы и механизмы решения задачи размещения, основанные на моделировании процессов, инспирированных природными системами.

В гибридных алгоритмах преимущества одного алгоритма могут компенсировать недостатки другого. Интеграция метаэвристик популяционных алгоритмов обеспечивает более широкий обзор пространства поиска и более высокую вероятность локализации глобального экстремума задач. Суть ко-эволюционного подхода состоит в том, что для решения задачи используется набор субпопуляций, которые эволюционируют параллельно. Предполагается, что субпопуляции отличаются стратегиями поиска, но каждая из субпопуляций решает одну и ту же задачу. Эпизодически ко-эволюционирующие системы обмениваются опытом. Такой подход позволяет частично решить проблему преждевременной сходимости, обеспечивает выход из локальных оптимумов и повышает скорость получения результата [4].

Общая структура муравьиного алгоритма (МА) реализует итерационную процедуру поиска лучшего решения, в которую включается конструктивный алгоритм. Канонический МА решает задачу нахождения кратчайшего маршрута в полном графе. Маршрут является кодом решения некоторой задачи на полном графе поиска решений (ГПР) [5].

Для повышения эффективности, усиления сходимости алгоритма и способности выхода из локальных оптимумов предложен подход к ко-гибридизации [6] алгоритма размещения на основе модели адаптивного поведения муравьиной колонии.

Одновременно в пространстве поиска решения задачи эволюционируют четыре субпопуляции решений. Субпопуляции включают маршруты, формируемые в соответствии со стратегиями *S1-S4* соответственно. Стратегии базируются на парадигме МА, но отличаются конструктивными алгоритмами (КА) размещения элементов, используемыми в составе МА.

1. Постановка задачи размещения. Проблема размещения может быть сформулирована следующим образом. Дано множество прямоугольных элементов (модулей) $A = \{a_i | i = 1, \dots, n_a\}$ с расположенными на них терминалами (выводами), где n_a – количество модулей. Задано множество цепей, связывающих терминалы модулей. Задано коммутационное поле (КП), на котором могут размещаться элементы. Вводится прямоугольная система координат XOY , у которой оси OX и OY совпадают соответственно с нижней и боковой сторонами КП. Заданы координаты размещения множества позиций $P = \{p_i | i = 1, \dots, n_p\}$ на КП. Необходимо разместить элементы на КП с оптимизацией некоторых критериев качества. Основными показателями, в соответствии с которыми классифицируются существующие алгоритмы это постановка задачи размещения и метод поиска решений. Характеристиками, определяющими суть постановки задачи размещения, являются:

- ♦ модель представления размещаемых (конструктивных) элементов как геометрических объектов;

- ♦ модель монтажного пространства (пространство позиций);
- ♦ модель представления электрической цепи;
- ♦ характер целевой функции для оценки размещения [7].

Для каждой позиции заданы координаты. Расстояние между позициями обеспечивает размещения элементов в любой комбинации без наложения друг на друга и с учетом конструктивных ограничений (требования электромагнитной и тепловой совместимости) [2, 3]. На рис. 1 приведена модель КП. Чаще всего размещаемые элементы рассматриваются как точки (вершины). Пространство позиций представляется в виде регулярной структуры (рис. 2).

Пусть дано множество элементов $A=\{a_i|i=1,..., n_a\}$ и множество позиций $P=\{p_i|i=1,...,n_p\}$ – на КП. Для размещения всех элементов необходимо выполнение условия $n_p \geq n_a$.

Решение задачи размещения представляется в виде биективного отображения $f_R=A \rightarrow P$, каждому элементу множества A соответствует один единственный элемент множества P и наоборот $f_R=P \rightarrow A$. Номер позиции p_j в которую помещен элемент a_i определяется соотношением $p_j=f_R(a_i)$. $a_i=f_R^{-1}(p_j)$.

Произвольное размещение элементов в позициях представляет собой перестановку $M=<m(1), m(2), ..., m(t), ..., m(c)>$, где $m(t)$ задает номер модуля, который назначен в позицию p_t . В зависимости от выбранного критерия для оценки результатов размещения вводится целевая функция $\xi(M)$.

Таким образом, задача размещения состоит в отыскании оптимального значения функции ξ на множестве перестановок M .

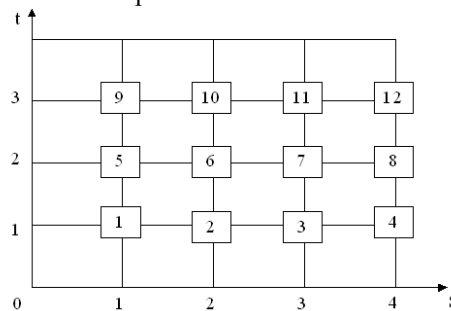


Рис. 1. Модель плоскости для размещения

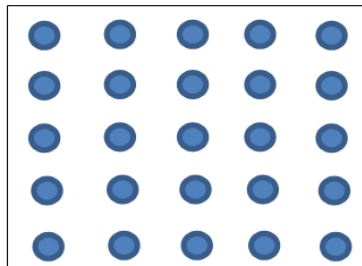


Рис. 2. Расположение позиций на коммутационном поле

Главными задачами размещения является минимизация общей площади кристалла, создание благоприятных условий для последующей трассировки (проблема трассируемости) и минимизации оценки общей длины соединений. Минимизация общей длины соединений необходима для уменьшения временных задержек возникающих, в длинных цепях и в связи с этим увеличения скорости обработки информации в СБИС [8, 9].

Задачи размещения элементов относятся к классу NP -трудных задач комбинаторной оптимизации. Основными известными критериями при размещении [1–3] являются: минимальная суммарная длина связей, минимальная длина самой длинной связи, минимум числа возможных пересечений, минимум числа изгибов соединений, минимальная площадь кристалла. Все эти критерии косвенно способствуют решению основной задачи: максимизировать число реализованных соединений при последующей трассировке [8–11].

В качестве модели схемы используется граф $B=(X,R)$ или гиперграф $H=(X,E)$, где $X=\{x_i|i=1,...,n_x\}$ – множество вершин, моделирующих элементы, а $R=\{r_j|j=1,...,n_r\}$ – множество ребер. Вершина x_i связана с вершиной x_j ребром r_{ij} , если соответствующие элементы связаны соединением. $E=\{c_j|c_j\subset X, j=1,...,n_c\}$ – множество гиперребер, моделирующих цепи, связывающие элементы. c_j – множество вершин графа H , связываемых цепью c_j . Граф адекватно моделирует двухтерминальные соединения, а гиперграф – многотерминальные.

Расстояние между двумя элементами a_i и a_j с координатами (x_i, y_i) и (x_j, y_j) определяется по формуле: $r_{ij}=|x_i - x_j| + |y_i - y_j|$.

В качестве оценки l_j длины цепи t_j , моделируемой гиперребром c_j , используются: длина минимального связывающего дерева, построенного на множестве вершин $c_j\subset X$; длина звездного графа, ребра которого инцидентны вершинам $c_j\subset X$, а корневая вершина помещена в центре «тяжести» множества вершин c_j ; длина полупериметра прямоугольника, описывающего множество вершин c_j ; суммарная длина ребер полного графа, построенного на множестве c_j [3].

Первый критерий оптимизации имеет вид: $\xi_1=\sum_j(l_j)$. Цель оптимизации минимизация ξ_1 .

На качество решения задачи трассировки при проектировании топологии СБИС значительное влияние оказывают начальные условия, сформированные в результате решения предшествующих трассировке задач конструкторского проектирования – покрытия, разбиения, планирования кристалла, размещения. Оценкой *трассируемости* является соотношение между ресурсами коммутационной среды (КС) и ресурсами, требуемыми для реализации соединений. В работе решение задачи размещения направлено на повышение *трассируемости* посредством минимизации ресурсов требуемых для реализации соединений [1–3, 12].

Формирование критерия размещения, учитывающим ресурсы КС, производится на *дискретном рабочем поле* (ДРП), представляющем собой ограниченную замкнутой линией прямоугольную фигуру в виде решетки $D=(V,R)$. Решетка разбита на квадратные ячейки, с ребрами единичной длины, где $V=\{v_i|i=1,...,n_v\}$ – множество узлов решетки, а $R=\{r_j|j=1,...,n_r\}$ – множество ребер решетки. Размеры ячеек и их количество определяется площадью поля, и размерами (площадью) позиций, необходимой для размещения в них элементов. Позиции p_i располагаются внутри ячеек решетки. Координаты (x_i, y_i) ячеек и размещенных в них позиций совпадают. Между позициями P и координатами Q их расположения на ДРП установлено биективное соответствие $f_q: P \rightarrow Q$, где $Q=\{(x_i, y_i)|i=1, ..., n_m\}$. $f_q(p_i)=(x_i, y_i)$.

В работе модель ДРП (рис. 3,а) представляется в виде матрицы $D=||d_{ij}||_{n \times m}$. Элемент d_{ij} матрицы соответствует ячейке ДРП. Значением элемента d_{ij} матрицы может быть номер элемента схемы или номер позиции, помещенных в ячейку, или расстояние до стартовой вершины.

На рис. 3 значением элемента матрицы является номер элемента схемы, размещенного в соответствующей ячейке.

Любые две смежные ячейки ДРП могут рассматриваться как единая область, ограниченная контуром. На (рис. 3,б,с,д) представлены варианты областей, модель ДРП в виде матрицы. Контур является границей объединенной области ДРП. Ребра контуров используются в качестве индикаторов распределения трассировочных ресурсов КС.

С помощью множества $\Gamma=\{\gamma_j|j=1,...,n_\gamma\}$ для каждого ребра r_i решетки задается пропускная способность γ_j – число соединений, которые могут его пересечь. Значения γ_j определяются размерами ребра и параметрами соединений: толщина, допустимое расстояние между трассами и т.п.

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

a

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

b

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

c

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

d

Рис. 3. Разбиение коммутационного поля на прямоугольные области

Границу некоторой объединенной области ω_k коммутационного поля образует цикл L_k , составленный из ребер сетки. Пропускная способность ψ_k границы L_k определяется, как сумма пропускных способностей ребер решетки, входящих в состав L_k , $\psi_k = \sum_{j \in L_k} \gamma_j$.

Пусть φ_k – число цепей, связывающих элементы, размещенные внутри области ω_k , ограниченной L_k , с элементами, расположенными вне этой области. В качестве характеристики границы используется параметр $\delta_k = (\psi_k - \varphi_k) / \psi_k$. Чем большее значение имеет δ_k , тем легче осуществить прокладку связей через границу L_k и выше трассируемость КС.

Пусть задано некоторое размещение элементов в ячейках ДРП и некоторое множество областей Ω , для которых определено множество границ $L = \{L_k | k=1, \dots, n_k\}$. Найдем среди характеристик границ наименьшую δ_{min} , т.е. $\forall k [(\psi_k - \varphi_k) / \psi_k \geq \delta_{min}]$.

Параметр $\zeta_2 = \delta_{min}$ используется в качестве критерия оптимизации. Цель оптимизации – максимизация δ_{min} .

Известно, что при одной и той же площади области, ограниченной некоторым контуром (а следовательно, при одном и том же числе позиций в области), наименьшую длину имеет контур квадратной формы. Следовательно, такая граница будет наиболее «чувствительна» к пересекающим ее цепям, т.к. для одного и того же множества элементов будет иметь наименьшую оценку ψ_k , а следовательно, и γ_k . Поэтому в работе используется система контуров, имеющих квадратную форму или по возможности близкую к ней.

Формирование множества контуров (границ) производится следующим образом [3]. Пусть имеется ДРП размером $X \times Y$, $X \leq Y$. Единицей измерения служит длина одного ребра опорной сетки (рис. 1). Выбираем контур с размерами $x \times x$, $x \leq X$. Сначала он помещается в левый угол ДРП, а затем путем сканирования (последовательного сдвига на один шаг вправо или вниз) формируется набор контуров. Число таких контуров определяется так: $n_k = (X - x + 1) \cdot (Y - x + 1)$.

2. Разработка ко-эволюционного алгоритма размещения на основе моделей адаптивного поведения муравьиной колонии. Основу любого последовательного алгоритма размещения составляют две процедуры: процедура выбора очередной позиции (ПВП) для назначения в неё выбранного элемента и процедура выбора очередного элемента (ПВЭ). В зависимости от способов, лежащих в основе этих процедур, в алгоритмах размещения используется четыре подхода.

1. Порядок выбора элементов (ПВЭ) и позиций (ПВП) задается априори.

2. Порядок выбора позиций фиксированный – задается априори. Порядок выбора элементов на основе эвристик.

3. Порядок выбора элементов – априори, позиций на основе эвристик.

4. Порядок выбора элементов и позиций на основе эвристик.

Наименьшей трудоемкостью обладают алгоритмы 1 класса, наибольшей – 4 класса. Анализ существующих методов и алгоритмов размещения [1–7] показал, что в их основе в явном или неявном виде лежит эвристическая процедура упорядочивания исходного списка позиций и элементов, последовательно распределяемых по позициям.

В работе реализован второй подход. Априори формируется поиск $S_w = \langle s_{wt} | t=1, \dots, n_s \rangle$ с фиксированным порядком выбора позиций, ориентированным на эффективное решение задачи размещения. Поиск решения задачи размещения выполняется процедурой последовательного распределения элементов по позициям в заданном порядке [12–15].

Решение задачи размещения представляется в виде двух списков:

- ♦ предварительно построенного и зафиксированного;

- ♦ *общего для популяции*, упорядоченного списка позиций $S_w = \langle s_{wt} | t=1, \dots, n_s \rangle$, где s_{wt} – соответствует номеру p_i позиции на ДРП, $p_i = f(s_{wt})$, и построенного вектора $M = \langle m_t | t=1, \dots, n_m \rangle$, где значением элемента m_t – в векторе M является номер a_i модуля, $a_i = f_m(m_t)$, размещенного в позиции s_{wt} . Если число размещаемых элементов n_m на d меньше числа позиций n_p , то в конце вектора M добавляется d элементов m_t с нулевым значением.

Пусть $S_w = \langle 3, 7, 5, 4 \rangle$, $M = \langle 11, 9, 8, 1 \rangle$: это значит, что элемент a_{11} в позиции p_3 , a_9 в позиции p_7 , a_8 в позиции p_5 , a_1 в позиции p_4 .

Для решения задачи размещения разработан поисковый алгоритм на основе модифицированного метода муравьиной колонии (МК) [9, 16].

Для исключения преждевременной сходимости и локализации глобального экстремума задачи разработка алгоритма производилась на основе ко-эволюционного подхода [9, 12].

Одновременно в пространстве поиска решения задачи размещения эволюционируют четыре субпопуляции решений, каждая из которых имеет свою стратегию оптимизации, базирующуюся на методе МК.

Ядром муравьиного алгоритма является конструктивный алгоритм, с помощью которого агенты на каждой итерации находят решение задачи [9, 12].

Предварительно для заданного порядка расположения позиций на ДРП формируются и фиксируются четыре упорядоченных списка позиций: S_1 – S_4 . За каждой субпопуляцией закрепляется свой список позиций. Стратегии каждой субпопуляции агентов отличаются конструктивными алгоритмами размещения, входящими в состав муравьиного алгоритма.

Основная идея конструктивного алгоритма размещения элементов по позициям заключается в следующем. Агент последовательно по порядковому номеру t , на каждом шаге, начиная с первого, выбирает в векторе (списке S_w) позицию s_{wt} , в которую помещает модуль, выбираемый на основе эвристических правил. Конструктивные алгоритмы, используемые субпопуляциями, отличаются порядками просмотра позиций на ДРП, задаваемым упорядоченными списками позиций: S_1 – S_4 .

На рис. 4 приведен пример расположения позиций на ДРП.

Процесс формирования списка позиций на КП осуществляется с использованием механизмов волнового алгоритма. Множество всех ячеек ДРП разбивается на подмножества: «проходимые» (свободные), т.е. при поиске пути их можно проходить, «непроходимые» (препятствия), путь через эту ячейку запрещён. Фиксируется стартовая ячейка (источник). Алгоритм предназначен для поиска кратчайшего от стартовой ячейки маршрута, включающем заданное число ячеек.

В качестве стартовых выбираются ячейки ДРП, расположенные по краям решетки: в верхнем и нижнем углах левого края; в верхнем и нижнем углах правого края. В стартовой ячейке присваивается значение весовой оценки, равное единице.

От стартовой ячейки порождается шаг в соседние ячейки. Соседними ячейками считаются только 4 ячейки по вертикали и горизонтали. Элементы, в которые пришла волна, образуют фронт волны. Каждый элемент первого фронта волны является источником вторичной волны. Элементы второго фронта волны генерируют волну третьего фронта и т.д. Волна, в свою очередь, не может проходить через ячейки, помеченные как «пройденные» или «непроходимые».

В процессе распространения волны ячейкам решетки присваиваются весовые оценки. При выполнении условий проходимости и непринадлежности к ранее помеченным в пути ячейкам, в атрибут ячейки записывается число, равное количеству шагов от стартовой ячейки, на первом шаге это будет 1. Каждая помеченная числом шагов от стартовой ячейки, становится стартовой и из неё порождаются очередные шаги в соседние ячейки. Волна движется, пока не останется непомеченных ячеек.

Далее, формируется по убыванию весовых оценок список S номеров позиций, от конечной помеченной ячейки ДРП, до стартовой ячейки ДРП, размещенных в этих ячейках.

В основу выбора окончательного списка положен принцип построения маршрута с минимальной оценкой суммарной линейной длины расстояний между позицией p_i и остальными позициями маршрута. В каждом списке позиции располагаются в порядке увеличения расстояния от стартовой вершины до позиции. В работе в качестве стартовых ячеек используются позиции, расположенные в левом верхнем углу ДРП, правом верхнем углу ДРП, левом нижнем углу ДРП, правом нижнем углу ДРП.

Варианты стратегий $S1-S4$ задаются соответственно с помощью списков: S_1-S_4 .

Пример. На рис. 4,а представлена модель ДРП в виде матрицы размером 5×5 , на которой отражены номера ячеек. В табл. 1 представлены координаты ячеек.

Нумерация ячеек на ДРП

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

а

Оценки позиций

1	2	3	4	5
2	3	4	5	6
3	4	5	6	7
4	5	6	7	8
5	6	7	8	9

б

Идентификация позиций

1	2 ₂	3 ₃	4 ₄	5 ₅
2 ₁	3 ₁	4 ₂	5 ₃	6 ₄
3 ₂	4 ₁	5 ₁	6 ₂	7 ₃
4 ₃	5 ₂	6 ₁	7 ₁	8 ₂
5 ₄	6 ₃	7 ₂	8 ₁	9 ₁

с

Рис. 4. Распространение волны. Стартовая вершина №1

Таблица 1

Координаты ячеек

Я	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
x	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
y	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1

На рис. 4,б представлена модель ДРП, в которой отражены весовые оценки ячеек после распространения волны от ячейки №1, расположенной в левом верхнем углу матрицы.

На основе матрицы (рис. 4,б) с весовыми оценками ω_i всех ячеек ДРП, полученных после распространения волны, формируется упорядоченный по возрастанию значений ω_i список $\Omega = \{\omega_i | i=1, \dots, n_\omega\}$, где $\omega_i \geq \omega_{i-1}$ и соответствующий список позиций S_ω . Список Ω имеет вид, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Упорядоченный по возрастанию значений список Ω и список позиций S_w

Ω	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	8	8	9
S_i	1	6	2	7	11	3	12	8	16	4	13	17	9	21	5	18	14	22	10	19	23	15	24	20	25

В свою очередь элементы списка Ω , имеющие одинаковое значение, упорядочиваются по возрастанию суммарного расстояния между ячейкой с весом w_i и всеми ячейками предыдущей волны (рис. 4,с). Дополнительно упорядоченный список Ω^* имеет вид, представленный в табл. 3.

Таблица 3

Дополнительно упорядоченный список Ω^*

Ω^*	1	2 ₁	2 ₂	3 ₁	3 ₂	3 ₃	4 ₁	4 ₂	4 ₃	4 ₄	5 ₁	5 ₂	5 ₃	5 ₄	5 ₅	6 ₁	6 ₂	6 ₃	6 ₄	7 ₁	7 ₂	7 ₃	8 ₁	8 ₂	9 ₁
S_i	1	6	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

Сформированный список используется субпопуляцией $S1$.

На рис. 5 и в табл. 4 и 5 представлены результаты распространения волны и формирования списка S_2 позиций в случае расположения стартовой ячейки в нижнем левом углу.

Нумерация ячеек на ДРП

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

а

Оценки позиций

5	6	7	8	9
4	5	6	7	8
3	4	5	6	7
2	3	4	5	6
1	2	3	4	5

б

Идентификация позиций

5 ₄	6 ₃	7 ₂	8 ₁	9 ₁
4 ₃	5 ₂	6 ₁	7 ₁	8 ₂
3 ₂	4 ₁	5 ₁	6 ₂	7 ₃
2 ₁	3 ₁	4 ₂	5 ₃	6 ₄
1	2 ₂	3 ₃	4 ₄	5 ₅

с

Рис. 5. Распространение волны. Стартовая вершина №2

Таблица 4

Результаты распространения волны

Ω	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	8	8	9
S_2	21	16	22	17	11	23	12	18	6	24	13	7	19	1	25	8	14	2	20	9	3	15	4	10	5

Таблица 5

Формирования списка S_2 позиций

Ω^*	1	2 ₁	2 ₂	3 ₁	3 ₂	3 ₃	4 ₁	4 ₂	4 ₃	4 ₄	5 ₁	5 ₂	5 ₃	5 ₄	5 ₅	6 ₁	6 ₂	6 ₃	6 ₄	7 ₁	7 ₂	7 ₃	8 ₁	8 ₂	9 ₁
S_2	21	16	22	17	11	23	12	18	6	24	13	7	19	1	25	8	14	2	20	9	3	15	4	10	5

Аналогичным образом осуществляется формирование списков позиций S_3 и S_4 в случае расположения стартовой ячейки в правом верхнем и нижнем углах ДРП.

Таблица 6

Формирование списков позиций S_3

Ω	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	8	8	9
S_3	5	10	4	9	15	3	14	8	20	2	13	19	7	25	1	18	12	24	6	17	23	11	22	16	21

Таблица 7

Формирование списков позиций S_4

Ω	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	8	8	9
S_4	25	20	24	19	15	23	14	18	10	22	13	9	17	5	21	8	12	4	16	7	3	11	2	6	1

Поиск агентами решений (размещения элементов в позиции фиксированного списка) осуществляется на полном графе поиска решений $G=(V,U)$, $U=U1 \cup U2$. Вершины множества $V=\{v_i | i=1, \dots, n_v\}$ соответствуют модулям a_i , размещаемым в позициях: $f_v=V \rightarrow A$, $a_i=f_v(v_i)$. В состав $U1$ входят ребра, исходящие из вершин множества V , а в состав $U2$ входят ребра, входящие в вершины множества V . Каждая пара вершин $(v_i, v_j) \in V$ связана парой ориентированных ребер (u_{ij}, u_{ji}) . Ребро u_{ij} , исходит из v_i , и входит в v_j ; ребро u_{ji} , исходит из v_j , и входит в v_i .

Работа конструктивного алгоритма размещения элементов в позиции КП заключается в следующем.

В состав разрабатываемого конструктивным алгоритмом вектора M_{kw} , (k – номер агента, w – номер списка) входят все вершины, принадлежащие множеству V графа G . Формирование вектора M_{kw} производится на графе G пошагово.

На каждом шаге t конструктивного алгоритма, начиная с первого, выбирается на основе эвристических правил вершина v_i (элемент $a_j \in A$, который помещается в позицию t формируемого вектора M_{kw} т.е. $m_t=v_i$). После выполнения $t-1$ шагов при построении вектора агентом z_k формируется множество еще не размещенных вершин $V2_k(t-1)$, таких, что каждая из вершин $v_j \in V2_k(t-1)$ может быть добавлена на шаге t в формируемый вектор $M_{kw}(t)$, и множество уже размещенных вершин $V1_k(t-1) \in V$, $V1_k(t-1) \cup V2_k(t-1) = V$.

Для каждой $v_j \in V2_k(t-1)$ рассчитывается параметр $\psi_{kj}(t)$ – суммарный уровень феромона, накопленный на множестве ориентированных ребер графа G , входящих в v_j и исходящих из вершин множества $V1_k(t-1)$ (т.е. связывающих v_j с $V1_k(t-1)$).

Значение параметра $\psi_{kj}(t)$ рассматривается в качестве степени $\delta_{kj}(t)$ привлекательности вершины $v_j \in V2_k(t-1)$ на шаге t , для включения в формируемый маршрут $M_{kw}(t)$. Вероятность P_{kj} включения вершины $v_j \in V2_k(t-1)$ в формируемый маршрут $M_{kw}(t)$ определяется следующим соотношением:

$$P_{kj} = \delta_{kj}(t) / \sum_j (\delta_{kj}(t)), \quad (\forall j | v_j \in V2_k(t-1)).$$

Агент z_k с вероятностью P_{kj} выбирает одну из вершин $v_j \in V2_k(t-1)$, которая включается в вектор M_{kw} .

После распределения всех элементов по позициям рассчитывается оценка размещения ζ_{kw} задаваемого маршрутом M_{kw} .

Коллективная эволюционная память (КЭП) муравьиной колонии представляет число ψ , показывающее полезность фрагмента при построении решений на предыдущих итерациях алгоритма. Следует отметить, что решением задачи размещения является вектор $M_k = \langle m_i | i=1, \dots, n_m \rangle$, где m_i – номер элемента, размещаемого в позиции p_i . Для фиксации взаимного расположения элементов m_i на графе G вектор M_k трансформируется в маршрут по правилу – пара соседних в векторе M_k вершин m_i и m_{i+1} связана ребром $u_{ii+1} = (m_i, m_{i+1})$ направленным от m_i к m_{i+1} . Таким образом, вектор $M_k = \langle m_1, m_2, \dots, m_i, m_{i+1}, \dots, m_k \rangle$ трансформируется в маршрут $M_k^* = (m_1, u_{12}, m_2, \dots, m_i, u_{ii+1}, m_{i+1}, \dots, m_{k-1}, u_{k-1,k}, m_k)$, отражающий решение на графе $G=(V,U)$, где все ребра в M_k^* ориентированные: каждое ребро u_{ij+1} маршрута M_k^* исходит из вершины m_i и входит в вершину m_{i+1} , где m_i – номер вершины графа G , выбранной агентом z_i , на шаге t ($i=t$) при построении маршрута, m_{i+1} – номер вершины графа G , выбранной агентом z_k , на шаге $t+1$. Маршрут M_k^* является адекватным представлением решения задачи размещения на графе G .

В качестве коллективной эволюционной памяти (КЭП) алгоритмом используется матрица $A = \|\delta_{ij}\|_{m \times m}$, в которой для каждого ребра графа G хранятся две интегральные оценки степени пригодности δ_{ij} и δ_{ji} , в зависимости от ориентации ребра графа графе $G=(V,U)$. Каждая пара вершин $(v_i, v_j) \in V$ связана парой ориентированных ребер (u_{ij}, u_{ji}) . Ребро u_{ij} , исходит из v_i , и входит в v_j ; ребро u_{ji} , исходит из v_j , и входит в v_i .

Итерационный процесс поиска решений осуществляется мультипопуляцией, включающей четыре виртуальных субпопуляции решений эволюционирующих параллельно.

Отличительной особенностью используемого ко-эволюционного подхода является то, что четыре субпопуляции решений фактически являются виртуальными и эволюционируют на базе одной популяции агентов $Z=\{z_k|k=1,...,n_k\}$. Процесс ко-эволюции реализуется одной популяцией агентов Z путем последовательного формирования и слияния виртуальных субпопуляций решений $S1-S4$ в одну популяцию.

Все стратегии используют одно и то же множество позиций, но каждая стратегия SI –индивидуальный список позиций S_i .

Взаимодействие между ко-эволюционирующими популяциями решений, решающими параллельно одну и ту же задачу оптимизации, реализуется в форме сотрудничества.

В течении заданного числа итераций производится независимое развитие четырех виртуальных субпопуляций решений, используя общую структуру коллективной эволюционной памяти (КЭП) в виде полного графа поиска решений $G=(V,U)$. Периодически по накопленным в процессе слияния результатам работы виртуальных субпопуляций производится модификация общей КЭП. На основе интегральных результатов виртуальных субпопуляций после фиксированного числа итераций модифицируются веса множества ребер полного графа G .

Моделирование поведения агентов в задаче размещения связано с распределением феромона на ребрах графа поиска решений, феромон откладывается в матрицу КЭП Δ только после полного формирования популяцией агентов всех субпопуляций решений и расчета оценок на текущей итерации. Для накопления феромона, откладываемого агентами субпопуляций за одну итерацию, используется вспомогательная накопительная матрица $КЭП-\Delta 1=||\delta I_{ij}||_{m \times m}$. Другими словами на текущей итерации агенты каждой раз после построения очередного решения откладывают феромон в накопительную $КЭП1-\Delta 1$, а после завершения итерации количество феромона, накопленное агентами всех популяций в $КЭП1-\Delta 1$, откладывается в $КЭП \Delta$.

Каждая итерация I ко-эволюционного алгоритма включает начальный этап, основную стадию и два заключительных этапа итерации.

На начальном этапе муравьиного алгоритма размещения:

- ◆ фиксируются входные данные;
- ◆ задаются начальные значения управляющих параметров;
- ◆ строится модель ДРП;
- ◆ формируются 4 списка позиций на ДРП.

Следом за начальным этапом выполняются процедуры основной стадии.

На основной стадии каждый агент $z_k \in Z$ поочередно для каждого списка S_w выполняет следующие действия:

- ◆ приводится в начальное состояние память агента;
 - ◆ обнуляются вспомогательные матрицы;
 - ◆ конструктивным алгоритмом на графе поиска решений G строится маршрут M_{kw} для списка S_w ;
 - ◆ M_{kw} трансформируется в M_{kw}^* ;
 - ◆ рассчитывается оценка ζ_{kw} решения – M_{kw}^* ;
 - ◆ рассчитывается степень пригодности $\psi_{kw} = \alpha \zeta_{kw}$ элементов маршрута M_{kw}^* ,
- где α – коэффициент пропорциональности;

♦ определяется множество ребер U_{kw} графа G , входящих в состав маршрута M_{kw}^* ;

♦ значения элементов накопительной матрицы ΔI КЭП1, соответствующих ребрам U_{kw} графа G , входящим в состав маршрута M_{kw}^* , увеличиваются на величину ψ_{kw} .

На первом заключительном этапе итерации интегральные оценки δI_{ij} , накопленные элементами промежуточной матрицы ΔI КЭП1, добавляются к соответствующим добавляются к соответствующим оценкам элементов основной матрицы $КЭП - \Delta$.

1. Задаются начальные значения управляющих параметров:

N_s – число субпопуляций и стратегий;

N_k – число агентов;

N_l – число итераций;

N – число позиций.

2. Строится модель ДРП – $D = ||d_{ij}||_{n \times m}$.

3. Задается расположение позиций в ячейках d_{ij} ДРП.

Задаются координаты (x_i, y_i) расположения позиций p_i на ДРП.

Устанавливается биективное соответствие $f_q: P \rightarrow Q$, где $Q = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n_m\}$.
 $f_q(p) = (x_i, y_i)$.

4. Для выбранного расположения позиций на КП на основе механизмов волнового алгоритма формируются четыре списка позиций $S_1 - S_4$.

5. Формируется полный граф поиска решений $G = (V, U)$.

Формируются матрицы коллективной эволюционной памяти: основная $\Delta = ||\delta_{ij}||_{m \times m}$ и накопительная $\Delta I = ||\delta I_{ij}||_{m \times m}$.

6. Элементам основной матрицы КЭП $\Delta = ||\delta_{ij}||$ присваивается начальное значение θ .

(Основная стадия)

7. $l=1$ (номер итерации).

8. Обнуляется накопительная матрица КЭП $\Delta I = ||\delta I_{ij}||_{m \times m}$, ($\forall \delta I_{ij} \in \Delta I$) [$\delta I_{ij} = 0$].

9. $k=1$ (номер агента).

10. $w=1$ (номер списка).

11. Приводится в начальное состояние память агента z_k : $V1_{kw}(0) = \emptyset$; $V2_{kw}(0) = V$.

12. Конструктивным алгоритмом на графе поиска решений $G = (V, U)$ для списка S_w агентом $z_k \in Z$ строится маршрут M_{kw} .

13. M_{kw} трансформируется в M_{kw}^* .

14. Рассчитывается оценка ζ_{kw} решения M_{kw}^* .

15. Рассчитывается степень пригодности ψ_{ij} элементов маршрута M_{kw}^* , $\psi_{kw} = \alpha \zeta_{kw}$, где α – коэффициент пропорциональности.

16. Значения элементов промежуточной матрицы ΔI КЭП1, соответствующих ребрам графа G , входящим в состав маршрута M_{kw}^* , увеличиваются на величину ψ_{kw} . ($\forall u_{ij} \in M_{kw}^*$) [$\delta I_{ij} = \delta I_{ij} + \psi_{kw}$].

17. Если $w < N_s$, то $w = w + 1$ и переход к 12, иначе переход к 18.

18. Если $k < N_k$, то $k = k + 1$ и переход к 10, иначе переход к 15.

(Первый заключительный этап итерации)

19. Интегральные оценки δI_{ij} , накопленные элементами промежуточной матрицы ΔI КЭП1, добавляются к соответствующим оценкам δ_{ij} элементов основной матрицы $КЭП - \Delta$. ($\forall u_{ij} \in U$) [$\delta_{ij} = \delta_{ij} + \delta I_{ij}$].

(Второй заключительный этап)

20. Выполняется процедура испарения феромона на всех ребрах U графа G , в соответствии с формулой: ($\forall u_{ij} \in U$) [$\delta_{ij}(u_{ij}) = \rho \delta_{ij}(u_{ij})$], где δ_{ij} количество феромона на ребре u_{ij} графа G , ρ – коэффициент обновления.

21. Если $l < N_l$, то $l = l + 1$ и переход к 8, иначе переход к 21.
22. Конец работы алгоритма.

3. Экспериментальные исследования. Ко-эволюционный алгоритм размещения реализован в виде программы **CoP**. Программа CoP написана на языке C++ в среде Microsoft Visual Studio 2010 для ОС Windows. Эксперименты проводились по аналогии с известным методом (РЕКО) [17–20].

Для экспериментальных исследований разработанной программы размещения были применены схемы набора РЕКУ с известным оптимумом F_{opt} : Ех.1 на 30 блоков, Ех.2 – 60, Ех.3 – 90, Ех.4 – 120, Ех.5 – 150. Для сравнения были выбраны известные алгоритмы размещения: Dragon v2.20 [17], Capo v.8., mPL v.2.0, mPG v1.0 и QPlace v.5.1 [18–21].

Для сравнительной оценки эффективности тестируемых алгоритмов, рассчитывался параметр: наилучшая длина соединений (для РЕКО) или (для G-РЕКУ и РЕКУ) к полученной длине соединений. Оценкой качества служит величина $\xi = F_{opt}/F$ – «степень качества», где F – оценка полученного решения. Ни один из алгоритмов размещения при исследовании не достиг значения коэффициента качества близкого к 1. В таблице 8. приведены полученные значения показателя степень качества ряда известных алгоритмов и алгоритма **CoP**.

Таблица 8

Полученные значения

Тест	Dragon	Capo	mPL	mPG	Qplace	CoP
Ех.1	0.71	0.73	0.81	0.71	0.73	0.95
Ех.2	0.72	0.72	0.84	0.72	0.78	0.95
Ех.3	0.81	0.8	0.83	0.81	0.82	0.96
Ех.4	0.83	0.84	0.85	0.83	0.81	0.98
Ех.5	0.82	0.81	0.86	0.82	0.84	0.97

Степень качества у разработанной программы **CoP** на 7% выше, чем у программ Dragon, Capo, mPL, mPG и Qplace. Временная сложность алгоритма – $O(n^2)$.

На основе результатов экспериментальных исследований была построена средняя зависимость степени качества от числа итераций (рис. 6) и от размера популяции (рис. 7).

Исследования показали, что число итераций, при которых популяция объемом в 100 агентов находил лучшее решение, лежит в пределах 122–132.

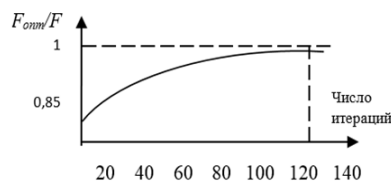


Рис. 6. Зависимость качества решений алгоритма от числа итераций

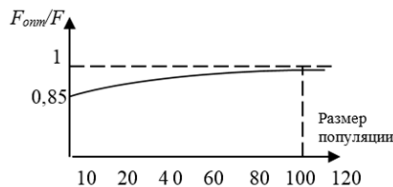


Рис. 7. Зависимость качества решений алгоритма от размера популяции

Тестирование производилось на бенчмарках 19s, PrimGA1, PrimGA2 [17, 21]. Результаты по сравнению с существующими алгоритмами улучшены на 7-8%. Вероятность получения глобального оптимума составила 0.96. В среднем решения отличаются от оптимального менее, чем на 1.5%. 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. Разработана новая методология и метод размещения элементов СБИС, отличающиеся тем, решение задачи размещения основывается на использовании фиксированного порядка выбора позиций, ориентированного на эффективное решение задачи размещения, и эвристической процедуры распределения элементов по позициям, позволяющие снизить общую трудоемкость, и повысить качество решения.

Процесс формирования списка позиций на коммутационном поле осуществляется с использованием механизмов волнового алгоритма. В основу выбора окончательного списка положен принцип построения маршрута с минимальной оценкой суммарной линейной длины расстояний между позициями маршрута. Для решения задачи размещения разработан поисковый алгоритм на основе модифицированного метода муравьиной колонии.

В работе процесс ко-эволюции реализован на основе взаимодействия субпопуляций, отличающихся стратегиями поиска. Разработана новая архитектура ко-эволюционного алгоритма размещения на основе модернизированной парадигмы муравьиного алгоритма, отличающаяся тем, что субпопуляции решений фактически являются виртуальными, а процесс ко-эволюции реализуется одной популяцией агентов путем последовательного формирования и слияния виртуальных субпопуляций решений в одну популяцию, что позволяет обеспечить более высокую вероятность локализации глобального экстремума задачи.

В работе решение задачи размещения направлено на повышение трассируемости посредством минимизации ресурсов, требуемыми для реализации соединений. Существенный вклад в минимизацию пространственной и временной сложности поисковой процедуры внесли: использование субпопуляциями общей эволюционной памяти, общего графа поиска решений, формировании единой интерпретации решения в виде маршрута на полном ориентированном графе с бинарными ориентированными ребрами. Это позволило повысить вероятность локализации глобального экстремума задачи. Для решения задачи размещения разработан поисковый алгоритм на основе модифицированного метода муравьиной колонии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тучин А.В., Бормонтов Е.Н., Пономарев К.Г. Введение в системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2017. – 110 с.
2. Казеннов Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. – 295 с.
3. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедев В.Б. Методы, модели и алгоритмы размещения. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – 150 с.
4. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Гибридный биоинспирированный алгоритм размещения базовых стандартных библиотечных элементов при проектировании топологии полужаказной СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 97-110.
5. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 448 с.
6. Воробьева Е.Ю., Карпенко А.П., Селиверстов Е.Ю. Ко-гибридизация алгоритмов роя частиц // Наука и образование. – 2012. – № 4. – С. 28-35.
7. Лебедев О.Б. Распределение ресурсов на основе гибридных моделей роевого интеллекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – № 6. – С. 1063-1073.

8. *Розе К., Радченко Д.* Платформа Synopsys для проектирования цифровых систем – новый уровень технологий проектирования СнК // *Электроника*. – 2018. – № 2. – С. 122-141.
9. *Лебедев О.Б.* Модели адаптивного поведения муравьиной колонии в задачах проектирования. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 199 с.
10. *Sur-Kolay S., Bishnu A., Das S., Nandy S.C., Bhattacharjee S.* FPGA placement using space-filling curves: Theory meets practice // *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* – 2009. – Vol. 9, № 2. – P. 1-23.
11. *Yang X., Choi B.-K., 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. – Vol. 22 (4). – P. 410-419.
12. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Жиглатый А.А.* Размещение элементов СБИС на основе моделей роевого интеллекта // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем: Сб. трудов под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского*. – М.: ИПИМ РАН, 2020. – С. 118-126.
13. *Cong J., Romesis M., Xie M.* Optimality, Scalability and Stability Study of Partitioning and Placement Algorithms // *Proc. of the International Symposium on Physical Design*. – Monterey, CA, 2003. – P. 88-94.
14. *Sherwani N.A.* Algorithms for VLSI Physical Design Automation. – 3rd ed. – Kluwer Academic Publisher. USA, 2013. – 572 p.
15. *Mourelle M.* Swarm intelligent systems. – Berlin: Heidelberg: Springer Verlag, 2006. – 217 p.
16. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования: учебник. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. – 336 с.
17. *Wang M., Yang X., Sarrafzadeh M.* Dragon2000: Standard-cell Placement Tool for Large Industry Circuits // *ICCAD 2000*. – P. 260-263.
18. *Caldwell A.E., Kahng A.B., Markov I.L.* Can Recursive Bisection Alone Produce Routable Placements? // *DAC 2000*. – P. 477-482.
19. Cadence design systems, Inc. QPlace version 5.1.55, compiled on 10/25/1999. Envisia ultra-placer reference.
20. IBM-PLACE 2.0 benchmark suits. – <http://er.cs.ucla.edu/benchmarks/-ibm-place2/bookshelf/ibm-place2-all-bookshelf-nopad.tar.gz>.
21. *Adya S.N.* ISPD02 IBM-MS Mixed-size Placement Benchmarks. – <http://vlsicad.eecs.umich.edu/BK/ISPD02bench/>.

REFERENCES

1. *Tuchin A.V., Bormontov E.N., Ponomarev K.G.* Vvedenie v sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya integral'nykh mikroskhem [Introduction to computer-aided design systems for integrated circuits]. Voronezh: Izdatel'skiy dom VGU, 2017, 110 p.
2. *Kazennov G.G.* Osnovy proektirovaniya integral'nykh skhem i system [Basics of designing integrated circuits and systems]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2010, 295 p.
3. *Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedev V.B.* Metody, modeli i algoritmy razmeshcheniya [Methods, models and placement algorithms]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, 150 p.
4. *Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Gibridnyy bioinspirirovannyi algoritm razmeshcheniya bazovykh standartnykh biblioteknykh elementov pri proektirovanii topologii poluzakaznoy SBIS [Hybrid bioinspired algorithm for placing basic standard library elements in the design of the topology of a semi-custom VLSI], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3, pp. 97-110.
5. *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. Bauman, 2016, 448 p.
6. *Vorob'eva E.Yu., Karpenko A.P., Seliverstov E.Yu.* Ko-gibridizatsiya algoritmov roya chastits [Co-hybridization of particle swarm algorithms], *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2012, No. 4, pp. 28-35.
7. *Lebedev O.B.* Raspredelenie resursov na osnove gibridnykh modeley roevogo intellekta [Resource distribution based on hybrid models of swarm intelligence], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2017, No. 6, pp. 1063-1073.

8. Roze K., Radchenko D. Platforma Synopsys dlya proektirovaniya tsifrovyykh sistem – novyy uroven' tekhnologiy proektirovaniya SnK [Synopsys platform for designing digital systems – a new level of SoC design technologies], *Elektronika* [ELECTRONICS], 2018, No. 2, pp. 122-141.
9. Lebedev O.B. Modeli adaptivnogo povedeniya murav'inoi kolonii v zadachakh proektirovaniya [Models of adaptive behavior of an ant colony in design problems]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 199 p.
10. Sur-Kolay S., Bishnu A., Das S., Nandy S.C., Bhattacharjee S. FPGA placement using space-filling curves: Theory meets practice, *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, 2009, Vol. 9, No. 2, pp. 1-23.
11. Yang X., Choi B.-K., 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, Vol. 22 (4), pp. 410-419.
12. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Zhiglaty A.A. Razmeshchenie elementov SBIS na osnove modeley roevogo intellekta [Placement of VLSI elements based on swarm intelligence models], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem: Sb. trudov pod obshch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems. Collection of works under the total. ed. Academician of the Russian Academy of Sciences A.L. Stempkovsky]. Moscow: IPPM RAN, 2020, pp. 118-126.
13. Cong J., Romesis M., Xie M. Optimality, Scalability and Stability Study of Partitioning and Placement Algorithms, *Proc. of the International Symposium on Physical Design*. Monterey, CA, 2003, pp. 88-94.
14. Sherwani N.A. Algorithms for VLSI Physical Design Automation. 3d ed. – Kluwer Academic Publisher. USA, 2013. – 572 p.
15. Mourelle M. Swarm intelligent systems. Berlin: Heidelberg: Springer Verlag, 2006, 217 p.
16. Norenkov I.P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya: uchebnik [Fundamentals of computer-aided design: textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU imeni N.E. Bauman, 2006, 336 p.
17. Wang M., Yang X., Sarrafzadeh M. Dragon2000: Standard-cell Placement Tool for Large Industry Circuits, *ICCAD 2000*, pp. 260-263.
18. Caldwell A.E., Kahng A.B., Markov I.L. Can Recursive Bisection Alone Produce Routable Placements?, *DAC 2000*, pp. 477-482.
19. Cadence design systems, Inc. QPlace version 5.1.55, compiled on 10/25/1999. Envisia ultra-placer reference.
20. IBM-PLACE 2.0 benchmark suits. Available at: <http://er.cs.ucla.edu/benchmarks/-ibm-place2/bookshelf/ibm-place2-all-bookshelf-nopad.tar.gz>.
21. Adya S.N. ISPD02 IBM-MS Mixed-size Placement Benchmarks. Available at: <http://vlsicad.eecs.umich.edu/BK/ISPD02bench/>.

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

Лебедев Олег Борисович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89085135512; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Жиглатый Артемий Александрович – e-mail: artemiy.zhiglaty@gmail.com; тел.: 89185916819; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Lebedev Oleg Borisovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79085135512; the department of computer aided design; associate professor.

Zhiglatiy Artemy Alexandrovich – e-mail: artemiy.zhiglaty@gmail.com; phone: +79185916819; the department of computer aided design; graduate student.

Т.Н. Кондратьева, Е.Р. Мунтян, И.Ф. Развеева, Г.С. Оноре

**РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА ТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕНДА РЫНКА НА ПЛАТФОРМЕ
METATRADER 5**

Рассмотрены возможности применения эффективных методов технического анализа для определения направления тренда финансовых активов на мультирыночной платформе MetaTrader 5. Показаны преимущества и целесообразность применения методов технического анализа в разных сферах финансовых рынков на примерах работ российских и зарубежных авторов. В работе для определения направления и силы тренда обоснована недостаточность применения таких технических индикаторов, как полосы Боллинджера (BB), MACD, MA, EMA, построенных по различным законам распределения цен финансовых активов. Рассмотрены инструменты графического анализа, как частный случай технического анализа, отличающийся особой наглядностью и визуализацией исследуемого процесса. В статье приведены примеры фигур технического анализа, показана их принадлежность к базовым типам графического анализа. Рассмотрено понятие современной торговой стратегии – инновационный трейдинг, проведен сравнительный анализ торговой стратегии, ее возможности и риски. В работе приводится описание разработанного программного модуля в виде торгового индикатора на платформе MetaTrader 5 на языке Meta Quotes Language 5 (MQL5) в сочетании со скриптом на высокоуровневом языке Python для алготрейдинга с применением методов технического анализа. В основу индикатора заложено построение линий поддержки и сопротивления для определения направления и силы тренда. Разработан алгоритм определения направления и силы тренда инструментами технического анализа, что в результате позволит повысить точность прогноза направленности тренда путем интеграции технического индикатора в систему. Для экспериментальной части процесса использован финансовый инструмент – валютная пара EUR/USD, общий период исследования составил шесть месяцев. В результате алгоритм корректно отработал в реальном режиме времени без участия человека в течение двадцати четырех недель. По результатам тестирования можно судить о перспективности исследований данного направления для решения большого спектра прикладных задач финансовой математики и аналитики. Применение созданного индикатора может быть расширено на любые торговые операции по различным финансовым инструментам и на их комбинации.

Графический анализ; технический анализ; мультирыночная платформа; MetaTrader 5; Forex; алготрейдинг; инновационный трейдинг; торговая стратегия; технический индикатор.

T.N. Kondratieva, E.R. Muntyan, I.F. Razveeva, G.S. Onore

**IMPLEMENTATION OF AN EFFECTIVE METHOD OF TECHNICAL
ANALYSIS FOR DETERMINING THE MARKET TREND
ON THE METATRADER 5 PLATFORM**

The article discusses the possibilities of using effective methods of technical analysis to determine the trend direction of financial assets on the multi-market platform MetaTrader 5. The advantages and expediency of using technical analysis methods in various areas of financial markets are shown by examples of works by Russian and foreign authors. In order to determine the direction and strength of the trend, the insufficiency of the use of such technical indicators as Bollinger bands (BB), MACD, MA, EMA, constructed according to various laws of the distribution of prices of financial assets, is justified. Graphical analysis tools are considered as a special case of technical analysis, characterized by special visibility and visualization of the process under study. The article provides examples of technical analysis figures, shows them to belong to the basic types of graphical analysis. The concept of a modern trading strategy – innovative trading is considered, a comparative analysis of the trading strategy, its opportunities and risks is carried

out. The paper describes the developed software module in the form of a trading indicator on the MetaTrader 5 platform in Meta Quotes Language 5 (MQL5) in combination with a script in the high-level Python language for algotrading using technical analysis methods. The indicator is based on the construction of support and resistance lines to determine the direction and strength of the trend. An algorithm for determining the direction and strength of the trend with technical analysis tools has been developed, which as a result will improve the accuracy of the trend direction forecast by integrating a technical indicator into the system. For the experimental part of the process, a financial instrument was used – the EUR/USD currency pair, the total study period was six months. As a result, the algorithm worked correctly in real time without human intervention for twenty-four weeks. Based on the test results, it is possible to judge the prospects of research in this area for solving a large range of applied problems of financial mathematics and analytics. The application of the created indicator can be extended to any trading operations on various financial instruments and their combinations.

Graphical analysis; technical analysis; multimarket platform; MetaTrader 5; Forex; algorithmic trading; innovative trading; trading strategy; technical indicator.

Введение. Платформа MetaTrader 5 – это инструмент трейдера, позволяющий проводить технический анализ и совершать торговые операции на международном валютном рынке Forex и фондовых биржах [1], в том числе проводить комплексный анализ динамики цен различных финансовых инструментов, котировок валют и акций [2–4].

В течение многих лет аналитики продолжают активно заниматься вопросами изучения рыночных цен финансовых активов, пытаясь понять скрытые и явные тенденции динамики рынка, его направленность в условиях нисходящего и восходящего рынков. Задача трейдера – отследить закономерности на различных участках графиков финансовых активов и определить паттерны, формирующие дальнейшее поведение цен на выбранных участках, рыночные цены финансовых активов, их доходность и возможные риски. Особый интерес у трейдеров, инвесторов и экономистов вызывает прогнозирование изменения цены финансовых активов, в том числе правильная оценка того, как изменяется цена, что является определяющим фактором. Важно понимать, что фигуры технического анализа являются не просто графической визуализацией процесса образования цен, а непосредственной психологией рынка. Поведение участников торгов часто повторяется и не может не отражаться на формировании цен активов, мы же, в свою очередь, наблюдаем это на графиках и используем для определения наиболее подходящего момента для покупки либо продажи финансового актива.

Однако наряду с графическим и техническим анализами существуют количественные методы и математические модели для принятия решений, позволяющие проводить эффективную торговлю финансовыми активами [5]. Технический анализ используют для построения модели технических индикаторов, разрешающую инвестору агрегировать сформированные фрагменты информации по динамике цен [6–8].

Для анализа фондового рынка также применимы графовые модели [9, 10]. Например, в работе [10] рассчитывается доходность по финансовым активам при помощи модели, в которой вершинами графа представлены активы, а веса ребер определяются степенями зависимости активов. Предложенные графовые модели позволяют представить только однотипные объекты и отношения между ними, в то время как целесообразно использовать модели с более широким функционалом, например, предложенные в работах [11–13]. Однако данные модели лежат за пределами данного исследования.

В данном исследовании реализуется эффективный метод технического анализа, заключающийся в построении линий поддержки и сопротивления для определения тренда рынка на платформе MetaTrader 5.

1. Анализ предметной области. Наиболее распространенные фигуры технического анализа представляют собой достаточно простую геометрию, так, например: прямоугольники – «Голова и плечи», «Двойное дно», «Канал»; треугольники и симметричные треугольники – «Вымпел», «Восходящий треугольник», «Нисходящий треугольник». Такие названия эти фигуры получили не случайно, каждая из них дает возможность определения направленности тренда и его силу, продолжение тренда и разворот, а также неопределенные паттерны. Фигуры «Голова и плечи», «Двойное дно», «Двойная вершина» дают сигнал о ближайшей смене направленности тренда и относятся к разворотному типу графического анализа. Фигуры «Флаг», «Вымпел» сигнализируют о продолжении движения цены и относятся к типу продолжающегося тренда. Фигуры «Восходящий треугольник», «Нисходящий треугольник» могут давать сигнал, как о смене тренда, так и о его продолжении и относятся к неопределенному типу. В табл. 1 представлены наиболее часто используемые фигуры технического анализа и их принадлежность к базовым типам графического анализа.

Таблица 1

Типы графического анализа

Тип графического анализа	Фигура	Геометрия фигуры
Разворотный тренд	«Голова и плечи»	
	«Двойное дно»	
	«Двойная вершина»	
	«Канал»	
Боковой тренд	«Прямоугольник»	
	«Флаг»	
	«Вымпел»	
	«Восходящий канал»	
	«Нисходящий канал»	
Неопределенный паттерн	«Симметричный треугольник»	
	«Восходящий треугольник»	
	«Нисходящий треугольник»	

Инструменты технического анализа позволяют определить динамику цен финансовых активов, часто выступают в качестве базы для автоматической торговой системы. В своих ранних работах [14] для прогнозирования динамики цен финансовых активов нами использованы инструменты технического анализа, в том числе технические индикаторы: полосы Боллинджера (BB), MACD, MA, EMA и другие. В работе [15] обоснована востребованность технических индикаторов на российских и других фондовых рынках (на примере китайского фондового рынка).

Зарубежные ученые в своих работах при построении модели прогноза цен финансовых активов в качестве инструмента анализа, также используют технические индикаторы и их комбинации [16–18].

Перспективным направлением развития алготрейдинга является внедрение методов искусственного интеллекта, превосходящих по точности и производительности линейные регрессионные модели и древовидные структуры [19, 20]. Торговые системы на основе интеллектуальных алгоритмов способны обрабатывать большие и зачастую неструктурированные массивы данных [21–23], подобные гибридные системы обладают преимуществами в скорости, точности и масштабируемости [24].

Чаще всего трейдеры для эффективной торговли на рынке применяют инновационный трейдинг, копируя сделки успешных трейдеров и не занимаются изучением силы и направления тренда того или иного финансового актива. Таким образом, задача сводится к выбору успешного трейдера по его показателям торговли в прошлых сделках и копированию его сделок. В таком подходе есть ряд недостатков: во-первых, сложности с поиском лицензированного брокера; во-вторых, трудности с выбором успешного трейдера; в-третьих, возможность расчета рисков в лучшем случае сводится к нулю, а в худшем случае растет в экспоненциальном порядке.

Существующие системы, предназначенные для определения направления тренда финансовых активов на платформе MetaTrader 5, являются закрытыми системами, т. е. пользователи таких систем вынуждены «доверять» прогнозам самой платформы, и соответственно, не могут быть уверены в точности полученных рекомендаций к действиям.

Для решения этих проблем в рамках данного исследования предлагается использование инструментов технического анализа для определения направления и силы тренда финансовых активов на платформе MetaTrader 5, что обуславливает необходимость разработки программного модуля в виде торгового индикатора на этой платформе.

Таким образом, применение инструментов технического анализа для разработки программного модуля гарантирует пользователю не только открытость системы, но и позволит обеспечить заданную точность прогноза направленности тренда путем интеграции технических индикаторов в систему.

2. Постановка цели и задачи исследования. Целью исследования является получение гарантированной точности рекомендаций к действиям участников финансового рынка.

Задача исследования заключается в разработке программного модуля в виде торгового индикатора на платформе MetaTrader 5 с применением методов технического анализа. Для реализации программного модуля используется язык программирования Meta Quotes Language 5 (MQL5) в сочетании со скриптом на Python. В основу индикатора заложено вычисление силы и направления тренда.

3. Математическая модель реализации эффективного метода технического анализа для определения тренда рынка на платформе MetaTrader 5. В работе использован классический технический индикатор «линии поддержки и сопротивления», с помощью которого можно прогнозировать силу тренда и его направление.

Для построения математической модели применяются формулы (1-2), при этом построение параметрического уравнения данного технического индикатора l_m^k выполняется на основе формулы (3):

$$\overline{Q_{max}^{(1k)} Q_{max}^{(2k)}} = \left(\frac{t_{max}^{(2k)} - t_{max}^{(1k)}}{p_{max}^{(2k)} - p_{max}^{(1k)}} \right) \quad (1)$$

$$\overline{Q_{max}^{(2k)} Q_i^{(2k)}} = \left(\frac{t_i^{(2k)} - t_{max}^{(1k)}}{p_i^{(2k)} - p_{max}^{(1k)}} \right) \quad (2)$$

$$l_m^k: \frac{t_i^{(2k)} - t_{max}^{(1k)}}{t_{max}^{(2k)} - t_{max}^{(1k)}} = \frac{p_i^{(2k)} - p_{max}^{(1k)}}{p_{max}^{(2k)} - p_{max}^{(1k)}}, \quad (3)$$

где $m = \{1; M\}$ – период исследования, равный 1 неделе;

M – весь период исследования (24 недели);

t_i – время рассматриваемого периода (24 часа);

$t_i^{(1k)}, t_i^{(2k)}$ – текущее значение параметра по оси абсцисс на первую (1k) и вторую (2k) половину выбранного периода соответственно;

$p_i^{(1k)}, p_i^{(2k)}$ – текущее значение цен открытия/закрытия по оси ординат на первую и вторую половину выбранного периода соответственно;

$Q_i^{(2k)}$ – текущее значение функции $f^{(2)}$ на вторую половину выбранного периода;

$t_{max}^{(1k)}, t_{max}^{(2k)}$ – значение параметра t по максимумам функций $f^{(1)}$ и $f^{(2)}$ соответственно;

$p_{max}^{(1k)}, p_{max}^{(2k)}$ – цена открытия/закрытия по максимумам функций $f^{(1)}$ и $f^{(2)}$ соответственно;

$Q_{max}^{(1k)} = f^{(1)}(t_{max}^{(1k)}, p_{max}^{(1k)}), Q_{max}^{(2k)} = f^{(2)}(t_{max}^{(2k)}, p_{max}^{(2k)})$ – максимальные значения функций $f^{(1)}$ и $f^{(2)}$ (координаты на плоскости) на первую и вторую половину выбранного периода соответственно.

Сила тренда Θ_m^k вычисляется по формулам (4, 5):

$$\Theta_m^k = p_{max}^{(2k)} / d_m^k, \quad (4)$$

$$d_m^k = ((t_{max}^{(2k)})^2 + (p_{max}^{(1k)})^2)^{1/2}, \quad (5)$$

где d_m^k – расстояние между $Q_{max}^{(1k)}$ и $Q_{max}^{(2k)}$.

В качестве объекта изучения выбран финансовый инструмент валютная пара EUR/USD, общий период исследования составил 24 недели с 03.05.2022 по 29.10.2022.

Научная новизна данной работы заключается в использовании предложенного математического аппарата и реализации на его основе алгоритма торговой стратегии для повышения эффективности метода технического анализа с целью определения направления и силы тренда финансового актива на платформе MetaTrader 5.

4. Реализация алгоритма торговой стратегии. На рис. 1 приведена блок-схема разработанного алгоритма определения направления и силы тренда, который можно представить в виде последовательности действий:

1) построение тренда за день с периодом в 1 час (таймфрейм);

2) разбиение цен открытия/закрытия за дневной период на две категории: первая половина дня $p_i^{(1k)}$ и вторая половина дня $p_i^{(2k)}$;

- 3) определение экстремумов по ценам открытия/закрытия за дневной период по категориям $p_{max}^{(1k)}, p_{max}^{(2k)}, p_{min}^{(1k)}, p_{min}^{(2k)}$;
- 4) определение координат точек экстремумов за дневной период по категориям по дням недели $Q_{max}^{(1k)}, Q_{max}^{(2k)}, Q_{min}^{(1k)}, Q_{min}^{(2k)}$;
- 5) построение параметрического уравнения направления тренда l_m^k ;
- 6) определение силы тренда;
- 7) проверка условия на смену тренда θ_m^k ;
- 8) переход к пункту 2) и повторение пунктов 2) – 7) 120 раз;
- 9) выводы результатов работы алгоритма определения направления и силы тренда.

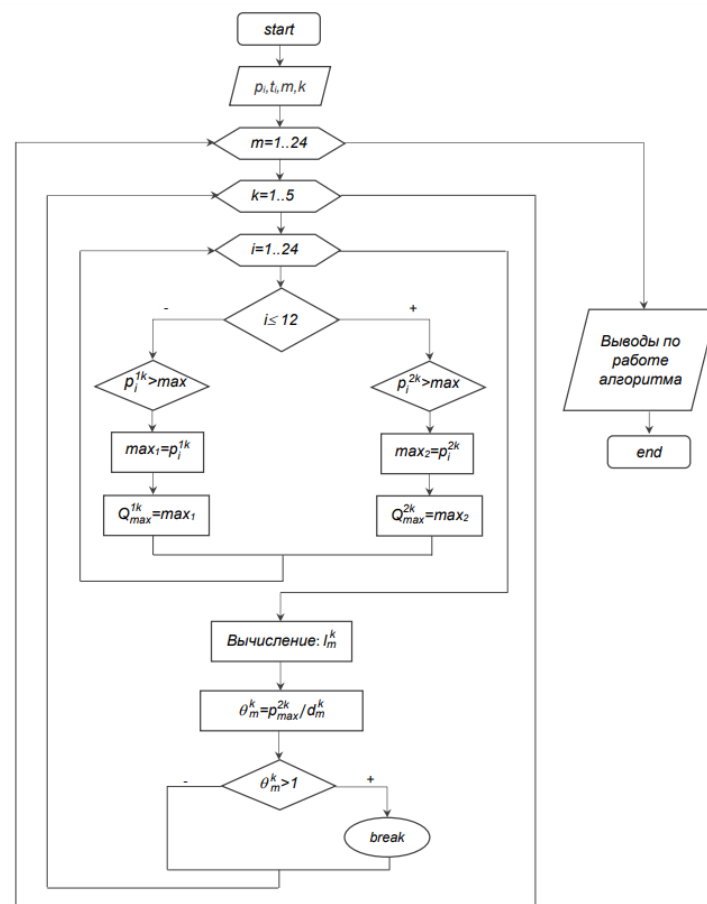


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения направления и силы тренда

При создании скрипта на *Python* для интеграции с платформой MetaTrader 5, необходимо выполнить ряд действий:

- ♦ определиться с выбором библиотек, в первую очередь библиотек средств визуализации данных, так как большую роль при проведении графического анализа (как раздела технического анализа) играет удобство используемого инструмента (в данном случае – графика);
- ♦ убедиться в наличии соединения с терминалом, и в случае возникновения ошибки вывести ее код для возможности устранения (рис. 2);

♦ получить данные из терминала MetaTrader 5 за определенный период времени (в нашем случае с 02.05.2022 по 28.10.2022), используя метод `mt5.copy_rates_range` с таймфреймом равным 1 час.

```
if not mt5.initialize():
    print("initialize() failed, error code =", mt5.last_error())
    mt5.shutdown()
```

Рис. 2. Проверка на наличие ошибок при подключении терминала

Затем для построения графика необходимо определить точки, в которых цена закрытия за каждые 12 часов была максимальной (рис. 3).

Результаты работы реализованного алгоритма определения направления и силы тренда представлены в следующем разделе.

```
for M in range(1, 25):
    for k in range(1, 6):
        for i in range(1, 25):
            if i<=12:
                max_1 = ticks_frame[k:i]['close'].max()
                if max_1 not in max_1_list:
                    max_1_list.append(max_1)
                max_11_i = ticks_frame[k:i]['close'].idxmax()
                if max_11_i not in max_11_list:
                    max_11_list.append(max_11_i)
            else:
                max_2 = ticks_frame[k:i]['close'].max()
                if max_2 not in max_2_list:
                    max_2_list.append(max_2)
                max_21_i = ticks_frame[k:i]['close'].idxmax()
                if max_21_i not in max_21_list:
                    max_21_list.append(max_21_i)
```

Рис. 3. Алгоритм поиска локальных максимумов

5. Результаты тестирования торгового индикатора. Рассмотрим графики, построенные согласно нашему алгоритму с использованием библиотеки *Plotly* за 03.10.2022 (а, с); 13.10.2022 (b, d) (рис. 4).

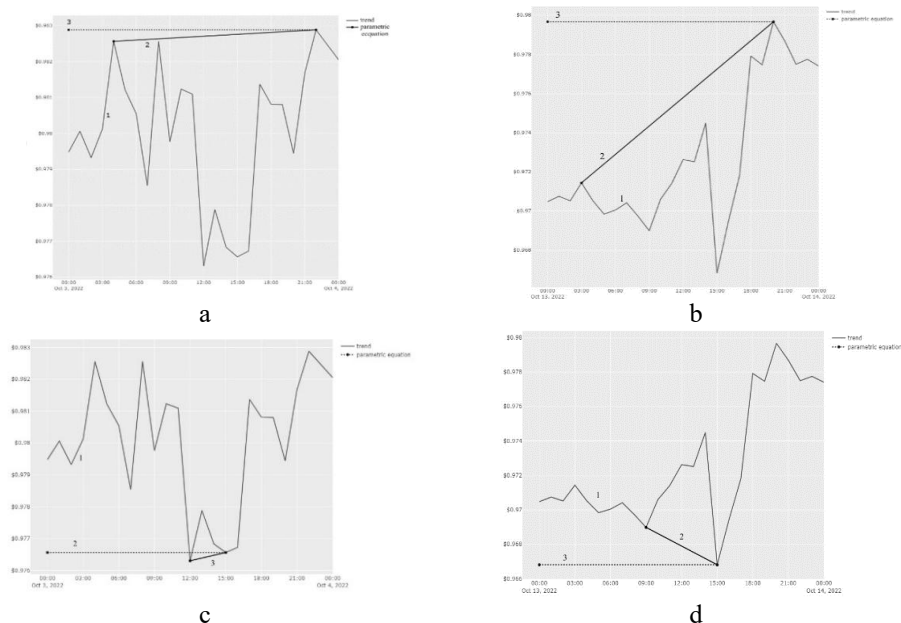


Рис. 4. Графики работы алгоритма 03.10.2022 и 13.10.2022.
Построение линии поддержки и сопротивления

На графике: 1 – график цен валютной пары EUR/USD; 2 – параметрическое уравнения линии сопротивления; 3 – вспомогательная линия для определения силы линии сопротивления (рис. 4,a,b – построение линии поддержки; с, d – построение линии сопротивления).

На графиках рис. 4,a,c видно, что в течение дня на часовом таймфрейме наблюдается восходящий тренд с умеренной силой роста (данный факт подтверждается при оценке угла между линиями 2 и 3). При этом на графиках рис. 4,b,d – восходящий тренд с достаточно высокой силой роста.

Аналогичным способом предложенный алгоритм работает при построении линии поддержки с заменой пп. 3 и 4 следующим образом:

3) определяется минимум по ценам открытия/закрытия за дневной период по категориям $p_{min}^{(1k)}, p_{min}^{(2k)}$;

4) определяется координаты точек минимумов за дневной период по категориям по дням недели $Q_{min}^{(1k)}, Q_{min}^{(2k)}$.

Для наглядной демонстрации работы реализованного алгоритма приведен тренд выбранного финансового актива за период с 05.06.2022 по 01.09.2022 (рис. 5).



Рис. 5. Результат работы алгоритма за весь период исследования

Для уменьшения нагрузки на вычислительную систему алгоритм позволяет отобразить исключительно линии поддержки и сопротивления, построенные по уровням локального минимума и максимума за первый и последний день. В данном случае наблюдается устойчивый нисходящий тренд. Отсюда можно сделать вывод: на таком рынке опасно открывать *long*-позиции, но можно заработать, торгуя в *short*.

Параметр Θ принимает два значения и отвечает за силу направления тренда: Θ^{sup} – Θ поддержка; Θ^{res} – Θ сопротивление. Переменная k_j^m принимает значения согласно рассматриваемому периоду ($m = \{1:M\}$, где M – весь период исследования) с учётом дней недели с понедельника по пятницу $k_{1,2,\dots,5}$: $j = \{1:5\}$ (k_1 – понедельник; k_2 – вторник; и т.д. по аналогии; k_5 – пятница).

В табл. 2 представлены значения параметра Θ^{res} , рассчитанные с помощью алгоритма при построении линии сопротивления. Так как число параметров $\Theta_m^k = 120$, следует ограничиться лишь фрагментом полученных значений параметра Θ^{res} . Аналогично рассчитываются Θ^{sup} при построении линии поддержки.

Таблица 2

Данные тестирования Θ^{res}

Дата	m	k_j^m	Θ^{res}	Рекомендации
02.05.2022	1	1	1,002	восходящий тренд (тенденция к смене тренда)
03.05.2022	2	2	1,005	нисходящий тренд (тенденция к смене тренда)
04.05.2022	3	3	0,75	восходящий тренд
05.05.2022	4	4	1,61	восходящий тренд
06.05.2022	5	5	0,82	нисходящий тренд
09.05.2022	6	1	0,15	нисходящий тренд (флэтовая тенденция тренда)

Окончание табл. 2

Дата	m	k_j^m	Θ^{res}	Рекомендации
10.05.2022	7	2	1,12	восходящий тренд
11.05.2022	8	3	1,2	нисходящий тренд
...				
19.09.2022	91	1	1,024	восходящий тренд (тенденция к смене тренда)
20.09.2022	92	2	0,915	нисходящий тренд
21.09.2022	93	3	0,789	нисходящий тренд
22.09.2022	94	4	0,68	нисходящий тренд
21.09.2022	95	5	0,24	нисходящий тренд (флэтовая тенденция тренда)
26.10.2022	118	3	0,86	восходящий тренд
27.10.2022	119	4	1,1	восходящий тренд (тенденция к смене тренда)
28.10.2022	120	5	0,32	нисходящий тренд (флэтовая тенденция тренда)

На рис. 6 представлен результат работы реализованного алгоритма за период с 5.06.2022 по 19.06.2022.

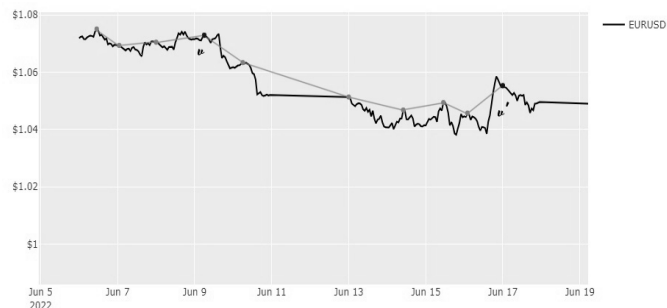


Рис. 6. Результат работы алгоритма за указанный период

На графике наблюдается сформированный нисходящий тренд, однако стоит отметить, что в точке Θ (локальный экстремум указанного периода) была попытка перелома тренда, но закрепиться в данном направлении не удалось. В точке Θ' локального экстремума указанного периода при оформлении заявки типа *Sell Stop* по данной цене, открывается *short*-позиция, которая на момент закрытия сделки принесла бы трейдеру определённую доходность ($\gamma_i = 2,13\%$), что является высоким показателем для рынка *Forex* за столь короткий промежуток времени, при низкой волатильности цен финансового актива. Поскольку данный алгоритм не несет прогнозный характер, то при смене локального тренда следует закрывать сделку во избежание убыточной торговли.

Общая доходность по сделкам вычисляется по формуле $Y = \sum_{i=1}^M \gamma_i$, где γ_i – дневная доходность. За весь период исследования (см. табл. 2) общая доходность по сделкам составила $Y = 3,8374\%$.

Преимущества данного алгоритма заключаются в следующем: при незначительных изменениях появляется возможность строить как линии поддержки, так и линии сопротивления, что позволяет открывать не только *short*-позиции, но и *long*-позиции. Так же имеется возможность изменения используемых параметров алгоритма, что позволят пользователям подстроить его под себя.

Исследования разработанного алгоритма показали:

- ◆ эффективность его работы на различных временных промежутках;
- ◆ возможность его использования для различных стратегий: трейдинга (на малых таймфреймах внутри дня), среднесрочного и долгосрочного инвестирования;
- ◆ гибкость и масштабируемость алгоритма.

Однако, выявлен недостаток предложенного алгоритма: для построения трендовой линии на больших временных периодах (более 1 года) возникает необходимость в достаточно мощных вычислительных системах, поскольку построение трендовой линии происходит внутри цикла.

Заключение. Выполнена реализация алгоритма программного модуля в виде торгового индикатора на платформе MetaTrader 5 на языке Meta Quotes Language 5 (MQL5) в сочетании со скриптом на Python для алготрейдинга с применением методов технического анализа. В основу алгоритма заложено определение направленности тренда и его силы по встроенному критерию оценки согласно предложенному математическому аппарату.

Применение инструментов технического анализа для разработки программного модуля позволяет гарантировать пользователю не только открытость системы, но и заданную точность прогноза направленности тренда.

Перспективы исследования данного направления прослеживаются в решении большого спектра прикладных задач финансовой математики и аналитики. Применение созданного индикатора может быть расширено на любые торговые операции по различным финансовым инструментам. Апробировав индикатор на валютной паре EUR/USD, открывается возможность использовать его и на других финансовых инструментах или на их комбинациях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hernández Martínez Robert*. Automated Investing. Algorithmic Trading in Financial Markets: Expert Advisor (EA), 2022.
2. *Кондратьева Т.Н., Мунтян Е.Р., Развеева И.Ф.* Реализация торгового советника для мультиязычной платформы MetaTrader 5 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 157-169.
3. *Еремин В.В.* Выбор технического индикатора для российского фондового рынка // Аллея науки. – 2020. – Т. 1, № 11(50). – С. 97-105.
4. *Кондратьева Т.Н.* Комплексный подход анализа современных индикаторов финансового рынка // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2015. – Т. 22, № 5. – С. 589-590.
5. *Кондратьева Т.Н., Трипуста И.Г., Прудников С.Е.* Оптимизация и тестирование советника в клиентском терминале MetaTrader 5 // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 12-1. – С. 77-83.
6. *Irwin S.H.; Park C.-H.* What do we know about the profitability of technical analysis? J. Econ. Surv. – 2007. – 21. – P. 786-826.
7. Market Technicians Association. CMT Level I 2016: An Introduction to Technical Analysis; JohnWiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015.
8. *Северюгин Ю.В., Сошин Н.А.* Классификация автоматизированных биржевых торговых стратегий - торговых роботов // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. – 2022. – № 2(40). – С. 7-11.
9. *Визгунов А.Н., Гольденгорин Б.И., Замараев В.А., Калягин В.А., Колданов А.П., Колданов П.А., Пардалос П.М.* Применение рыночных графов к анализу фондового рынка // Журнал НЭА. – 2012. – № 3 (15). – С. 66-81.
10. *Визгунов А.Н., Трифонов Ю.В.* Применение модели графа доходностей для анализа фондового рынка // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – № 6 (1). – С. 285-289.
11. *Мунтян Е.Р.* Реализация нечеткой модели взаимодействия объектов сложных технических систем на основе графов // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32, № 3. – С. 411-418. – DOI:10.15827/0236-235X.127.411-418.
12. *Мунтян Е.Р.* Использование нечетких ГН-моделей для представления сложных технических систем // Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 55-60. – DOI: 1034219/2078-8320-2021-12-3-55-60.

13. Vereshun V.D., Kolodenkova A.E., Muntyan E.R. Integrated approach to modeling the objects of complex technical systems // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Т. 330. – LNNS. – P. 199-204. – DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9_20.
14. Кондратьева Т.Н. Предсказание тенденций развития рискованных активов при помощи полус Боллинджера для российского финансового рынка // *Обзор прикладной и промышленной математики*. – 2014. – Т. 21, № 1. – С. 63-64.
15. Yanyun Yao, Shangzhen Cai & Huimin Wang. Are technical indicators helpful to investors in china's stock market? A study based on some distribution forecast models and their combinations, *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*. – 2022. – 35:1. – 2668-2692. – DOI: 10.1080/1331677X.2021.1974921.
16. Han Yufeng, Liu Yang, Zhou Guofu and Zhu Yingzi. Technical Analysis in the Stock Market: A Review (May 21, 2021). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3850494> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3850494>.
17. Nazário R.T.F., Silva J.L., Sobreiro V.A., Kimura H. A literature review of technical analysis on financial asset markets // *Q. Rev. Econ. Financ.* – 2017. – 66. – P. 115-126.
18. Кондратьева Т.Н., Развеева И.Ф. Автоматическая торговая система в клиентском терминале MetaTrader 5 // *Современные наукоемкие технологии*. – 2018. – № 10. – С. 56-60.
19. Белокопская Е.Г., Калягин И.И. Развитие инструментальных средств алготрейдинга на основе применения нейронных сетей // *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством*. – 2017. – № 1 (31). – С. 53-56.
20. Zhang Chao, Zhang Yihuang, Cucuringu Mihai and Qian Zhongmin. Volatility Forecasting with Machine Learning and Intraday Commonality (May 2022).
21. Kondratieva T., Prianishnikova L., Razveeva I. Machine learning for algorithmic trading // *E3S Web of Conferences*. Moscow. – 2020. – P. 01019. – DOI: 10.1051/e3sconf/202022401019.
22. Кондратьева Т.Н. Прогнозирование тенденции финансовых временных рядов с помощью нейронной сети LSTM // *Интернет-журнал «Науковедение»*. – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 61.
23. Chen W. Comparative study on volatility prediction effect of Shanghai Composite Index Based on deep learning // *Stat. Inf. Forum* 2018. – 2018. – 33. – P. 99-106.
24. Lei B., Zhang B., Song Y. Volatility Forecasting for High-Frequency Financial Data Based on Web Search Index and Deep Learning Model. *Mathematics*. – 2021. – 9 (4). – 320 p. – <https://doi.org/10.3390/math9040320>.

REFERENCES

1. Hernández Martínez Robert. Automated Investing. Algorithmic Trading in Financial Markets: Expert Advisor (EA), 2022.
2. Kondrat'ieva T.N., Muntyan E.R., Razveeva I.F. Realizatsiya torgovogo sovetnika dlya mult'irynnochnoy platformy MetaTrader 5 [Implementation of a trading advisor for the MetaTrader 5 multi-market platform]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4, pp. 157-169.
3. Eremin V.V. Vybor tekhnicheskogo indikatora dlya rossiyskogo fondovogo rynka [The choice of a technical indicator for the Russian stock market]. *Alleya nauki* [Alley of Science], 2020, Vol. 1, No 11(50), pp. 97-105.
4. Kondrat'ieva T.N. Kompleksnyy podkhod analiza sovremennykh indikatorov finansovogo rynka [An integrated approach to the analysis of modern indicators of the financial market]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2015, Vol. 22, No 5, pp. 589-590.
5. Kondrat'ieva T.N., Triputa I.G., Prudnikov S.E. Optimizatsiya i testirovanie sovetnika v klientskom terminale MetaTrader 5 [Optimization and testing of the Expert Advisor in the MetaTrader 5 client terminal], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2018, No 12-1, pp. 77-83.
6. Irwin S.H.; Park C.-H. What do we know about the profitability of technical analysis?, *J. Econ. Surv.*, 2007, 21, pp. 786-826.
7. Market Technicians Association. CMT Level I 2016: An Introduction to Technical Analysis; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015.
8. Sevryugin Yu.V., Soshin N.A. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh birzhevykh torgovykh strategiy - torgovykh robotov [Classification of automated exchange trading strategies - trading robots]. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya ekonomiki: rossiyskiy i zarubezhnyy opyt* [Actual problems and prospects for the development of the economy: Russian and foreign experience], 2022, No. 2 (40), pp. 7-11.

9. Vizgunov A.N., Goldengorin B.I., Zamaraev V.A., Kalyagin V.A., Koldanov A.P., Koldanov P.A., Pardalos P.M. Primenenie rynochnykh grafov k analizu fondovogo rynka [Application of market graphs to stock market analysis]. *Zhurnal NEA* [NEA Journal], 2012, No. 3 (15), pp. 66-81.
10. Vizgunov A.N., Trifonov Yu.V. Primenenie modeli grafa dohodnostey dlya analiza fondovogo rynka [Application of the yield graph model for stock market analysis]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky], 2013, No. 6 (1), pp. 285-289.
11. Muntyan E.R. Realizatsiya nechetkoy modeli vzaimodeystviya ob"ektov slozhnykh tekhnicheskikh sistem na osnove grafov [Implementation of a fuzzy model of interaction between objects in complex technical systems based on graphs], *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2019, Vol. 32, No. 3, pp. 411-418. DOI: 10.15827/0236-235X.127.411-418.
12. Muntyan E.R. Ispolzovanie nechetkikh GH-modeley dlya predstavleniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Using fuzzy GH-models to represent the complex technical systems], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2020, No. 3, pp. 55-60. DOI: 1034219/2078-8320-2021-12-3-55-60.
13. Vereshun V.D., Kolodenkova A.E., Muntyan E.R. Integrated approach to modeling the objects of complex technical systems, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, Vol. 330, LNNS, pp. 199-204. DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9_20.
14. Kondrat'ieva T.N. Predskazanie tendentsiy razvitiya riskovykh aktivov pri pomoshchi polos Bollindzhera dlya rossiyskogo finansovogo rynka [Prediction of trends in the development of risky assets using Bollinger bands for the Russian financial market], *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2014, Vol. 21, No. 1, pp. 63-64.
15. Yanyun Yao, Shangzhen Cai & Huimin Wang. Are technical indicators helpful to investors in china's stock market? A study based on some distribution forecast models and their combinations, *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*, 2022, 35:1, 2668-2692. DOI: 10.1080/1331677X.2021.1974921.
16. Han Yufeng, Liu Yang, Zhou Guofu and Zhu Yingzi. Technical Analysis in the Stock Market: A Review (May 21, 2021). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3850494>.
17. Nazário R.T.F., Silva J.L., Sobreiro V.A., Kimura H. A literature review of technical analysis on financial asset markets. *Q. Rev. Econ. Financ.* 2017, 66, pp. 115-126.
18. Kondrat'ieva T.N., Rveveeva I.F. Avtomaticheskaya trgovaya sistema v klientskom terminale MetaTrader 5 [Automated trading system in the MetaTrader 5 client terminal], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2018, No. 10, pp. 56-60.
19. Belokonskaya E.G., Kalyagin I.I. Razvitie instrumental'nykh sredstv algotreydinga na osnove primeneniya neyronnykh setey [Development of tools for algorithmic trading based on the use of neural networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Ekonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom* [News of higher educational institutions. Series: Economics, finance and production management], 2017, No. 1 (31), pp. 53-56.
20. Zhang Chao, Zhang Yihuang, Cucuringu Mihai and Qian Zhongmin. Volatility Forecasting with Machine Learning and Intraday Commonality (May 2022).
21. Kondratieva T., Prianishnikova L., Razveeva I. Machine learning for algorithmic trading. *E3S Web of Conferences*, Moscow, 2020, pp. 01019. DOI 10.1051/e3sconf/202022401019.
22. Kondrat'ieva T.N. Prognozirovanie tendentsiy finansovykh vremennykh ryadov s pomoshch'yu neyronnoy seti LSTM [Forecasting trends of financial time series using the LSTM neural network]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* [Online journal of "Science Studies"], 2017, Vol. 9, No. 4, pp. 61.
23. Chen W. Comparative study on volatility prediction effect of Shanghai Composite Index Based on deep learning. *Stat. Inf. Forum*, 2018, 33, 99-106.
24. Lei B., Zhang B., Song Y. Volatility Forecasting for High-Frequency Financial Data Based on Web Search Index and Deep Learning Model. *Mathematics*, 2021, 9 (4), 320 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/math9040320>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник

Кондратьева Татьяна Николаевна – Донской государственный технический университет; e-mail: ktn618@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 88632738628; кафедра математики и информатики; к.т.н.; доцент.

Развеева Ирина Федоровна – e-mail: razveevai@mail.ru; тел.: 88632738628; кафедра математики и информатики; старший преподаватель.

Оноре Глеб Станиславович – e-mail: onoreg@mail.ru; тел.: 89613213583; студент.

Мунтян Евгения Ростиславна – Южный федеральный университет; e-mail: ermuntyan@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371608; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Kondratieva Tatyana Nikolaevna – Don State Technical University; e-mail: ktn618@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632738628; the department of mathematics and informatics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Razveeva Irina Fedorovna – e-mail: razveevai@mail.ru; phone: +78632738628; the department of mathematics and informatics; senior lecturer.

Onore Gleb Stanislavovich – e-mail: onoreg@mail.ru; phone: +78632738628; the department of mathematics and informatics; student.

Muntyan Evgenia Rostislavna – Southern Federal University; e-mail: ermuntyan@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371608; the department of computer science; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.35.035

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-75-85

С.П. Новиков

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ОТКЛИКА

Обнаружение опасных газов и паров, актуально как на производстве, так и в повседневной жизни. Сенсорные элементы на основе полупроводниковых структур обладают высокой чувствительностью к газам самой различной природы. Для повышения точности измерений, калибровки и скорости определения концентрации требуются специальные методы, такие, например, как обработка сигналов различными способами. В исследовании используются газовые сенсоры на основе кремний-углеродных пленок, чувствительные к целому набору газов. В первой части статьи рассматриваются общие проблемы и метод их решения позволяющий повысить селективность полупроводниковых сенсоров газа. Проведен анализ динамических параметров, таких как первая и вторая производная кривых отклика, а также анализ уравнения Еловица. Такие калибровочные зависимости, построенные по экстремумам производных и коэффициентам наклона уравнения Еловица, показывают высокую линейность. В качестве перспективного решения предлагается использование набора калибровочных прямых, для определения концентрации искомого газа. Разработанный метод позволяет, используя динамические параметры отклика определить газ и его концентрацию, используя единственный сенсор, также повысить точность измерений, наряду, с сокращением времени детектирования. Представлены экспериментально полученные результаты обработки данных с определением искомого газа и его концентрации, используя описанный метод. Для сенсора на основе кремний-углеродных материалов разработанный метод и алгоритмы позволили провести измерения с использованием единичного сенсорного элемента для набора газов (NO_2 , CO , SO_2) с различной концентрацией. При этом наименьшая относительная погрешность, не превысила 3.6% для SO_2 , 2.7% для NO_2 , 2% для CO . Отличительными особенностями разработанного метода является использование нескольких калибровочных прямых в многомерном пространстве, а не одной, а также оригинальный алгоритмический аппарат обработки сигналов.

Газоанализатор; сенсор; отклик; обработка данных; метод измерений; калибровочные зависимости; распознавание.

S.P. Novikov

METHOD FOR MEASURING THE GAS-SENSITIVE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR SENSORS BY DYNAMIC RESPONSE PARAMETERS

Detection of dangerous gases and vapors is relevant both at work and in everyday life. Sensor elements based on semiconductor structures are highly sensitive to gases of a very different nature. To increase the accuracy of measurements, calibration and the speed of concentration determination, special methods are required, such as signal processing in various ways. The study uses gas sensors based on silicon-carbon films that are sensitive to a whole set of gases. In the first part of the article, general problems and a method for solving them are considered, which makes it possible to increase the selectivity of semiconductor gas sensors. The analysis of dynamic parameters, such as the first and second derivatives of the response curves, as well as the analysis of the Elovich equation is carried out. Such calibration dependences, constructed from the extremes of the derivatives and the slope coefficients of the Elovich equation, show high linearity. As a promising solution, it is proposed to use a set of calibration lines to determine the concentration of the target gas. The developed method allows, using dynamic response parameters, to determine the gas type and its concentration using a single sensor, also to increase the accuracy of measurements, along with a reduction in detection time. The experimental results of data processing with the determination of the gas type and its concentration using the described method are presented. For a sensor based on silicon-carbon materials, the developed method and algorithms made it possible to carry out measurements using a single sensor element for a set of gases (NO_2 , CO , SO_2) with different concentrations. At the same time, the smallest relative error did not exceed 3.6% for SO_2 , 2.7% for NO_2 , 2% for CO . The distinctive features of the developed method are the use of several calibration lines in a multidimensional space, rather than one, as well as an original algorithmic signal processing methods.

Gas analyzer; sensor; response; data processing; measurement method; calibration dependences; recognition.

Введение. Развитие газовых сенсоров показало, что одними из перспективных для применения в газоаналитической аппаратуре являются полупроводниковые газовые сенсоры, отличающиеся высокой надежностью, простотой в эксплуатации и относительно низкой стоимостью [1]. Такие сенсоры часто используются для определения в воздухе загрязнителей, таких как диоксид азота, оксид углерода и диоксид серы [1–3].

Принцип действия полупроводниковых сенсоров резистивного типа основан на изменении проводимости газочувствительного слоя при хемосорбции на его поверхности анализируемых газов [1, 4]. Малогабаритные резистивные полупроводниковые датчики газа, которые наряду с множеством положительных свойств, обладают малой селективностью и сравнительно невысоким быстродействием.

При этом необходимо улучшать данные потребительские свойства. Еще одной задачей является снижение энергопотребления, особенно при работе в автономном режиме, при питании от батарей или аккумуляторов [5].

Для преодоления этого недостатка существуют различные методы, в том числе связанные с обработкой отклика сенсора, что позволит обеспечить большую избирательность газового датчика, а также повышение быстродействия. При этом ключевые параметры сигнала могут быть просмотрены и проанализированы для идентификации или количественной оценки обнаруженных газов с использованием этих методов. Для этого применяется частотно-временной и переходный анализ для динамической обработки сигналов [6, 7].

Применение новых методов и алгоритмов обработки откликов системы, а также определение функциональных характеристик сенсоров позволит получать более полную картину о составе газовой смеси [8, 9].

Данный подход позволит различать реакцию на исследуемый газ по характеру отклика сенсора, при этом не только определять концентрацию, но и различать семейства газов. Это позволит получать более полную картину о составе газовой смеси, в том числе на единичном сенсоре.

Одна из задач, стоящих в настоящее время при разработке и эксплуатации сенсоров, повышение чувствительности и скорости детектирования применительно к задачам газового анализа [10, 11]. При проведении измерений малых концентраций газов существует проблема погрешности измерений из-за того, что реакция резистивного сенсора по амплитуде, может быть сопоставима с возникающим шумом.

Для решения проблем детектирования при наличии шума используется предварительная фильтрация получаемых данных одним из выбранных фильтров.

Другой подход заключается в использовании информации из переходной части кривой отклика, когда датчики подвергаются ступенчатому изменению состава газа. Таким образом, используя больше параметров, чем просто максимальное изменение отклика при воздействии газа, характеризующий измерение и чувствительность сенсора, могут быть улучшены параметры чувствительности [11].

Так же используются оценки отклика датчика на основе производной по времени первого порядка для описания его стабильности во времени по сравнению со стандартным откликом сенсора [12].

Анализ данных отклика сенсора позволяет решить проблему дрейфа сигнала, который возникает из-за длительной работы или внешнего воздействия [13] и может быть использован для уменьшения погрешности измерения и повышения стабильности и селективности сенсора [14–16].

Ранее в работе [17] было показано, что в качестве калибровочных зависимостей можно использовать не только полное значение сопротивления, но также и другие параметры, такие как первая ($S'(t)$) и вторая производная ($S''(t)$) сигнала, коэффициент наклона аппроксимирующей прямой из уравнения Еловича, начальная скорость изменения сигнала (S_0'). Такие данные могут быть получены по динамическим параметрам отклика.

Целью исследования является разработка метода измерения газочувствительных характеристик полупроводниковых сенсоров, который позволит определить газ и его концентрацию единичным сенсорным элементом за меньшее время и с большей точностью, чем стандартным методом. При этом необходимо решить следующие задачи: получение и обработка динамических параметров отклика сенсорного элемента, построения набора калибровочных зависимостей в многомерном пространстве, разработку и реализацию алгоритмов определения целевых газов и их концентрации.

Описание метода. Предлагается метод, который без использования сложных алгоритмов и построения нейронных сетей, позволяет с высокой точностью определять газ из известного перечня и его концентрацию, используя одиночный неселективный полупроводниковый сенсор.

Схема метода приведена на рис. 1.

Данные с сенсора представляют из себя массив значений сопротивления от времени, снимаемых с частотой, одна секунда.

На рис. 2 представлен алгоритм, позволяющий решить проблемы дрейфа, построить калибровочные зависимости по сигналу с сенсора, а также повышать скорость детектирования: проводится серия измерений, выбор данных по размеру скользящего окна и фильтрация данных, затем в каждой серии измерений определяется первая и вторая производная изменения сопротивления сенсора от времени при воздействии на него газом при разных эталонных концентрациях. Строится калибровочная зависимость на основе экстремумов первой производной от концентрации. В этом случае можно посчитать погрешность измерения, как разность

полученного значения с установочным. Также строим калибровочную зависимость на основе экстремумов второй производной, при достижении экстремумов принимается решение о прекращении измерений и вывод результатов.

В работе [17] показано использование коэффициентов наклона из уравнения Еловича, они применяются для извлечения признаков, а также для построения калибровочных зависимостей.

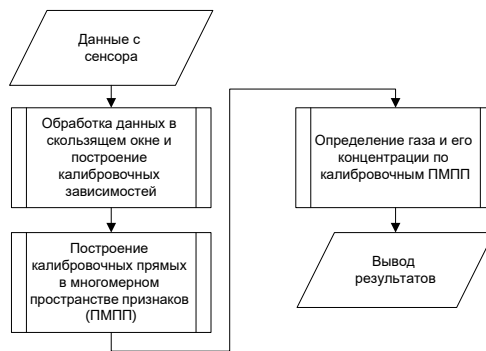


Рис. 1. Схема метода измерения газочувствительных характеристик

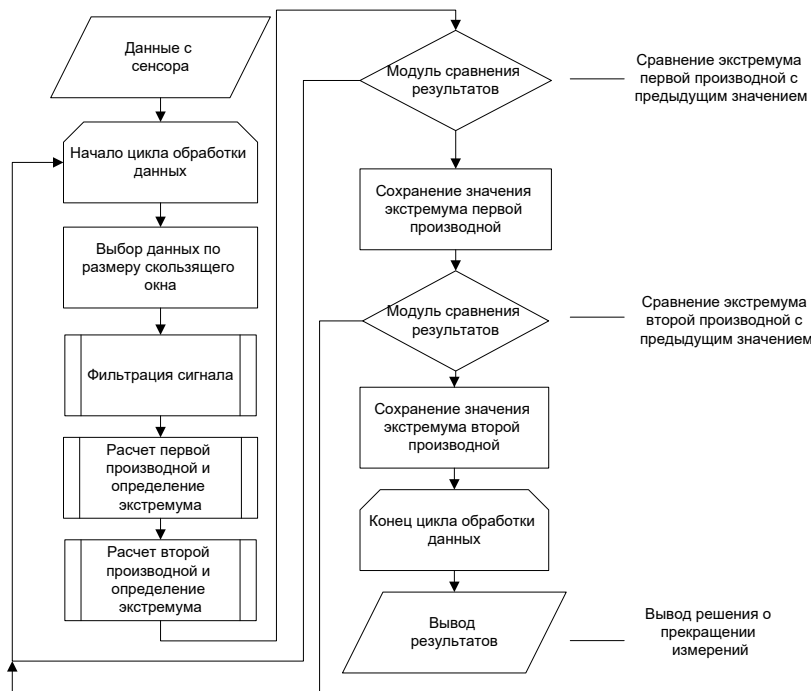


Рис. 2. Схема алгоритма обработки сигнала в скользящем окне

Для определения концентрации с высокой точностью необходимо выбрать калибровочные зависимости, обладающие свойствами линейности. С целью более точного определения концентрации и уменьшения ошибки строятся прямые в многомерном пространстве признаков (ПМПП), где каждая прямая характеризует газ, для этого используется следующий алгоритм (рис. 3).

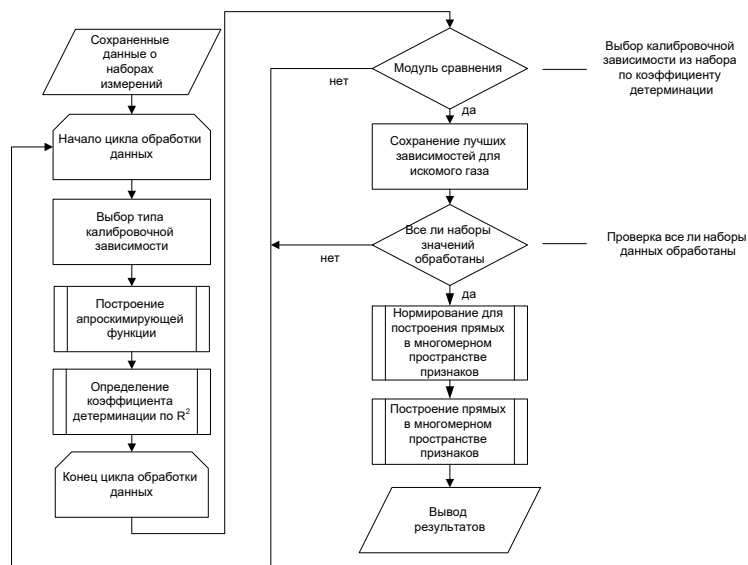


Рис. 3. Схема построения калибровочных прямых в многомерном пространстве признаков

Система построенных прямых в многомерном пространстве признаков (ПМПП) в дальнейшем будет использоваться для идентификации газа и определения его концентрации (рис. 4).

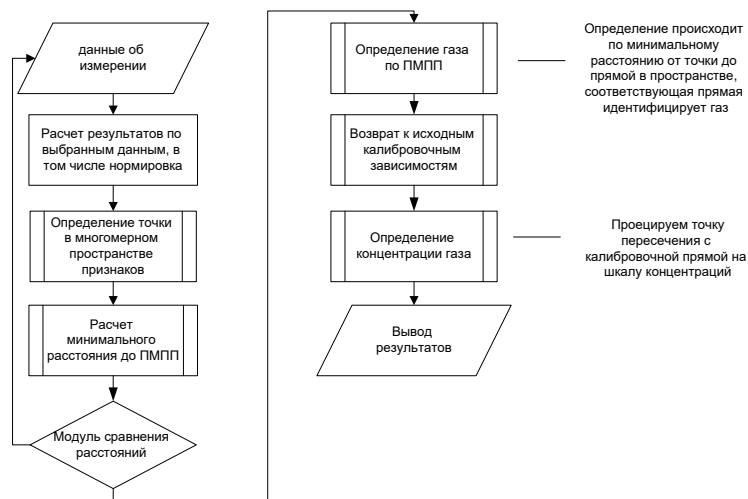


Рис. 4. Схема идентификации газа и определение его концентрации газа по ПМПП

По схеме, приведенной на рис. 4 система построенных прямых в многомерном пространстве признаков (ПМПП) будет использоваться для идентификации искомого газа. Для этого будет использоваться следующий алгоритм:

- ♦ данные об измерении, поступающие с сенсора, проходят предварительную обработку, в том числе нормируются по тем же коэффициентам, что и при построении ПМПП в алгоритме на рис. 3;

- ♦ определение точки в многомерном пространстве, соответствующей измерению;
- ♦ расчет минимального расстояния до всех ПМПП;
- ♦ сравнение минимальных расстояний до ПМПП;
- ♦ определение типа газа по минимальному расстоянию до ПМПП;
- ♦ возврат к исходным калибровочным зависимостям, в соответствии с типом газа;
- ♦ определение концентрации газа по набору калибровочных зависимостей;
- ♦ вывод результатов.

Определения концентрации для искомого газа происходит при переходе из многомерного пространства признаков в пространство калибровочных зависимостей и концентрации, при этом по коэффициенту детерминации R^2 выбираются обладающие лучшей линейностью. От точки в пространстве, соответствующей измерению, находится кратчайшее расстояние до калибровочной прямой и строится проекция на ось концентраций.

Экспериментальная часть. Апробирование метода и алгоритмов представляло собой серию измерений с сенсорными элементами, полученные методом электрохимического осаждения на основе кремний-углеродных пленок, легированных медью [18, 19].

Для обеспечения обработки сигналов, использовано разработанное программное обеспечение (ПО), позволяющее не только получать и сохранять сигнал с сенсоров, но также проводить обработку данных с использованием разработанного метода.

Условия проведения эксперимента описаны в работе [20]. Для получения набора откликов проведена серия экспериментов с концентрациями газов в диапазоне 5-50 ppm, таких как NO_2 , SO_2 , CO . В качестве рабочей температуры выбрана температура 100°C . При таких параметрах наблюдается хорошая реакция сенсора при небольшом уровне шума.

Сигнал с сенсора поступает на вход алгоритма обработки данных в скользящем окне (рис. 2), где проходит предварительную фильтрацию с помощью экспоненциального сглаживания и другие этапы, необходимые для получения соответствующего измерению отклика.

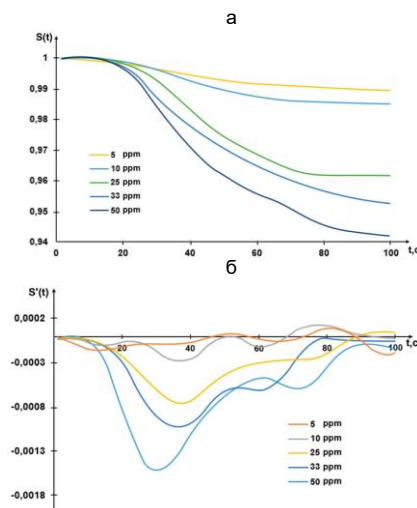


Рис. 6. Типичный отклик для исследуемого сенсорного элемента при концентрациях 5–50 (а) ppm газа CO , первая (б) производная $S(t)$

В результате применения разработанных алгоритмов построены наборы калибровочных зависимостей для исследуемых газов. В качестве примера рассмотрены отклик, его динамические параметры и калибровочные зависимости для оксида углерода (рис. 6–8). Аналогично получены для диоксида серы и диоксида азота.

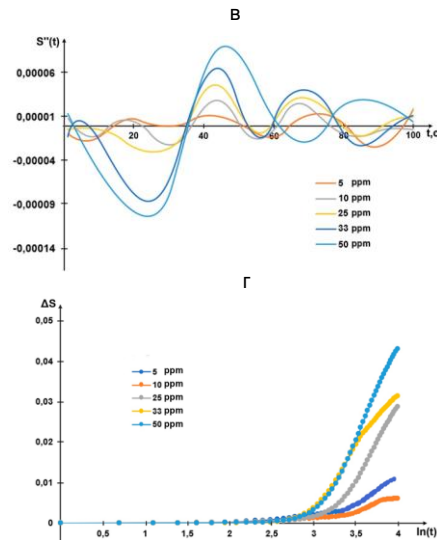


Рис. 7. Типичный отклик для исследуемого сенсорного элемента при концентрациях 5–50 (а) ppm газа CO, вторая (б) производная $S(t)$, график в координатах уравнения Еловича ΔS от $\ln(t)$ (в)

Соответствующие калибровочные прямые представлены на рис. 8.

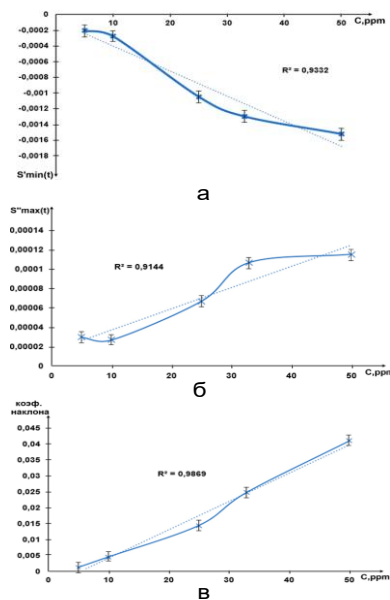


Рис. 8. Калибровочные зависимости по экстремумам первой (а) и второй (б) производной $S(t)$, а также коэффициентам наклона аппроксимирующих прямых уравнения Еловича при концентрациях 5–50ppm газа CO (в)

Построение прямых в многомерном пространстве признаков для CO , NO_2 , SO_2 представлено на рис. 9.

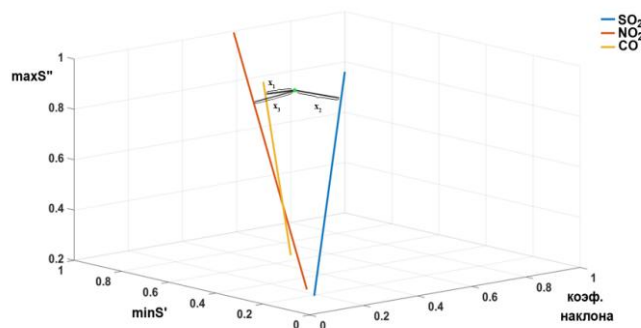


Рис. 9. Построение прямых в многомерном пространстве признаков

Для полученного набора данных применен метод определения концентрации по калибровочным прямым в многомерном пространстве. Графическая интерпретация работы алгоритма приведенного на рис. 4 отображена на рис. 10.

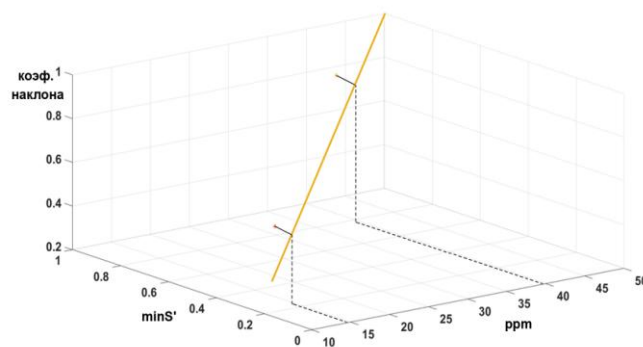


Рис. 10. Определение концентрации по калибровочным прямым в пространстве

Для проверки работоспособности алгоритма по идентификации и определения концентрации газа был проведен эксперимент. Датчик подвергался воздействию оксида углерода, диоксида серы и диоксида азота с концентрацией 15 и 40 ppm. Результаты эксперимента с использованием разработанного метода измерения и стандартной методики, а также полученные погрешности приведены в табл. 1. В случае приведенного примера для оксида углерода и диоксида азота выбраны калибровочные зависимости, построенные по экстремумам первой производной и коэффициентам наклона аппроксимирующей прямой из уравнения Еловича. В случае с диоксидом серы лучшие результаты у зависимостей построенным по экстремумам второй производной и коэффициентам наклона аппроксимирующей прямой из уравнения Еловича.

Таблица 1

**Результаты измерения характеристик сенсора с использованием
разработанного метода и стандартного метода определения
концентрации газа**

Эталонная концентра- ция, ppm	Газ	Разработанный метод		Стандартный метод	
		Измеренная концентра- ция, ppm	Относительная погрешность, %	Измеренная концентра- ция, ppm	Относительная погрешность, %
15	CO	14.7	2.0	13.2	12
40	CO	39.6	1.0	43	7.5
15	SO ₂	14.5	3.6	12.9	14
40	SO ₂	39.2	2.0	38	5
15	NO ₂	14.6	2.7	12.7	15.3
40	NO ₂	40.3	0.75	37.2	7

Относительная погрешность при оценке концентрации газа по калибровочной ПМПП, не превысила 3.6 процента.

Заключение. Применение нескольких калибровочных зависимостей концентрации газа от динамических параметров отклика сенсора позволит существенно уменьшить влияние случайной составляющей погрешности, так как используемые параметры характеризуют различные временные интервалы процесса адсорбции на поверхность чувствительного элемента.

Разработанный метод измерения газочувствительных характеристик полупроводниковых сенсоров позволяет не дожидаться полного времени насыщения при подаче газа для оценки концентрации, сократить время детектирования в 4–7 раз, погрешность уменьшается на 6–12 процентов в зависимости от целевого газа, также решить проблему дрейфа характеристик. При применении разработанного метода на единичном сенсоре определяется целевой газ, а также его концентрация.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Khan Md A.H., Thomson B., Debnath R., Motayed A., Rao M.V. Nanowire-based sensor array for detection of cross-sensitive gases using PCA and machine learning algorithms // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 20 (11). – P. 6020-6028.
2. Баркалин В.В., Белогуров Е.А., Таратын И.А., Хатько В.В., Шукевич Я.И. Конечное-элементное моделирование термомеханических свойств нанопористых материалов // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 1. – С. 18-24.
3. Cat V.V., Dinh N.X., Phan V.N., Tuan L.A., Nam M.H., Lam V.D., Dang T.V., Quy N.V. Realization of graphene oxide nanosheets as a potential mass-type gas sensor for detecting NO₂, SO₂, CO, and NH₃ // Mater. Today Commun. – 2020. – Vol. 25. – 101682.
4. Morrison S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors // Sensor & Actuator. – 1997. – No. 12. – P. 425-440.
5. Myasoedova T.N., Mikhailova T.S., Plugotarenko N.K. A Study on A NO₂ Sensor Based on SiO₂-ZrO₂ Composite Film // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2018): 14-th International scientific-technical conference: in 8 vol. Novosibirsk, 02–06 октября 2018 г. Vol. 1, Part 1. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – P. 105-108.
6. Wei G., An W., Gao F., Tang Z., Yu J. The Hilbert-Huang transform and its application in processing dynamic signals of gas sensors // 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, IEEE, Wuhan, China, 19-20 Dec. 2009.
7. An W., Yang C.-Y., Wei G. Dynamic signal processing for gas sensors based on Hilbert-Huang Transform // 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, IEEE, Chengdu, China, 9-11 July 2010.

8. Mittova I.Y., Kostryukov V.F., Ilyasova N.A. [et al.]. Modification of nanoscale thermal oxide films formed on indium phosphide under the influence of tin dioxide // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2020. – Vol. 11, No. 1. – P. 110-116.
9. Xie T., Xie G., Du H., Su Y., Ye Z., Chen Y., Jiang Y. Two novel methods for evaluating the performance of OTFT gas sensors // *Sensors and Actuators: B. Chem.* – 2016. – Vol. 230. – P. 176-183.
10. Обвинцева Л.А., Губанова Д.П. Быстрая идентификация хлора и диоксида хлора в воздухе полупроводниковыми сенсорами // *Журнал аналитической химии*. – 2004. – Т. 59, № 8. – С. 876-878.
11. Marius Rodner, Jens Eriksson First-order time-derivative readout of epitaxial graphene-based gas sensors for fast analyte determination // *Sensors and Actuators Reports*. – 2020. – No. 2. – 100012.
12. Magna G., Di Natale C., Martinelli E. Self-Repairing classification algorithms for chemical sensor array // *Sensors & Actuators B: Chemical*. – 2019. – Vol. 297. – 126721.
13. Sorocki J., Rydosz A. A prototype of a portable gas analyzer for exhaled acetone detection // *Appl. Sci.* – 2019. – No. 9 (13). – 2605.
14. Isaichenko O., Maksymovych N., Yatsimirsky V. Determination of the sensitive layer temperature of the adsorption semiconductor gas sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2005. – Vol. 108, No 1–2. – P. 134-142.
15. Satterthwaite P.F., Eberle S., Nedelcu S., Roman C., Hierold C. Transient and steady-state readout of nanowire gas sensors in the presence of low-frequency noise // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2019. – Vol. 297. – 126674.
16. Gomri S., Seguin J.-L., Guerin J., Aguir K. A mobility and free carriers density fluctuations based model of adsorption-desorption noise in gas sensor // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 41, No 6. – 065501.
17. Plugotarenko N.K., Myasoedova T.N., Novikov S.P. and Mikhailova T.S. Comparative Analysis of Derivative Parameters of Chemoresistive Sensor Signals for Gas Concentration Estimation // *Chemosensors*. – 2022. – No. 10 (4). – 126.
18. Obvintseva L.A., Sharova T.B., Avetisov A.K., Sukhareva I.P. Semiconductor sensors for studying the heterogeneous destruction of ozone at low concentrations // *Russ. J. of Phys. Chem. A*. – 2018. – Vol. 92, No. 6. – P. 1099-1106.
19. Myasoedova T.N., Plugotarenko N.K., Moiseeva T.A. Copper-containing films obtained by the simple citrate sol-gel route for NO₂ detection: Adsorption and kinetic study // *Chemosensors*. – 2020. – No. 8. – P. 79.
20. Новиков С., Плуготаренко Н. Метод обработки данных откликов резистивных сенсоров газа для сокращения времени определения концентрации // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. – 2022. – № 6 (217). – С. 102-106.

REFERENCES

1. Khan Md A.H., Thomson B., Debnath R., Motayed A., Rao M.V. Nanowire-based sensor array for detection of cross-sensitive gases using PCA and machine learning algorithms, *IEEE Sensors Journal*, 2020, Vol. 20 (11), pp. 6020-6028.
2. Barkalin V.V., Belogurov E.A., Taratyn I.A., Khat'ko V.V., Shukevich Ya.I. Konechno-elementnoe modelirovanie termomekhanicheskikh svoystv nanoporistykh materialov [Finite element modeling of thermomechanical properties of nanoporous materials], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem engineering], 2012, No. 1, pp. 18-24.
3. Cat V.V., Dinh N.X., Phan V.N., Tuan L.A., Nam M.H., Lam V.D., Dang T.V., Quy N.V. Realization of graphene oxide nanosheets as a potential mass-type gas sensor for detecting NO₂, SO₂, CO, and NH₃, *Mater. Today Commun.*, 2020, Vol. 25, 101682.
4. Morrison S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors, *Sensor & Actuator*, 1997, No. 12, pp. 425-440.
5. Myasoedova T.N., Mikhailova T.S., Plugotarenko N.K. A Study on A NO₂ Sensor Based on SiO₂-ZrO₂ Composite Film, *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2018): 14-th International scientific-technical conference: in 8 vol. Novosibirsk, 02–06 октября 2018 г.* Vol. 1, Part 1. Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2018, pp. 105-108.

6. Wei G., An W., Gao F., Tang Z., Yu J. The Hilbert-Huang transform and its application in processing dynamic signals of gas sensors, *2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, IEEE, Wuhan, China, 19-20 Dec. 2009*.
7. An W., Yang C.-Y., Wei G. Dynamic signal processing for gas sensors based on Hilbert-Huang Transform, *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, IEEE, Chengdu, China, 9-11 July 2010*.
8. Mittova I.Y., Kostyukov V.F., Ilyasova N.A. [et al.]. Modification of nanoscale thermal oxide films formed on indium phosphide under the influence of tin dioxide, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2020, Vol. 11, No. 1, pp. 110-116.
9. Xie T., Xie G., Du H., Su Y., Ye Z., Chen Y., Jiang Y. Two novel methods for evaluating the performance of OTFT gas sensors, *Sensors and Actuators: B. Chem.*, 2016, Vol. 230, pp. 176-183.
10. Obvintseva L.A., Gubanova D.P. Bystraya identifikatsiya khloro i dioksida khloro v vozdukh poluprovodnikovymi sensorami [Rapid identification of chlorine and chlorine dioxide in the air by semiconductor sensors], *Zhurnal analiticheskoy khimii* [Journal of Analytical Chemistry], 2004, Vol. 59, No. 8, pp. 876-878.
11. Marius Rodner. Jens Eriksson First-order time-derivative readout of epitaxial graphene-based gas sensors for fast analyte determination, *Sensors and Actuators Reports*, 2020, No. 2, 100012.
12. Magna G., Di Natale C., Martinelli E. Self-Repairing classification algorithms for chemical sensor array, *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2019, Vol. 297, 126721.
13. Sorocki J., Rydosz A. A prototype of a portable gas analyzer for exhaled acetone detection, *Appl. Sci.*, 2019, No. 9 (13), 2605.
14. Isaienko O., Maksymovych N., Yatsimirsky V. Determination of the sensitive layer temperature of the adsorption semiconductor gas sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, Vol. 108, No 1–2, pp. 134-142.
15. Satterthwaite P.F., Eberle S., Nedelcu S., Roman C., Hierold C. Transient and steady-state readout of nanowire gas sensors in the presence of low-frequency noise, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, Vol. 297, 126674.
16. Gomri S., Seguin J.-L., Guerin J., Aguir K. A mobility and free carriers density fluctuations based model of adsorption-desorption noise in gas sensor, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, Vol. 41, No 6, 065501.
17. Plugotarenko N.K., Myasoedova T.N., Novikov S.P. and Mikhailova T.S. Comparative Analysis of Derivative Parameters of Chemoresistive Sensor Signals for Gas Concentration Estimation, *Chemosensors*, 2022, No. 10 (4), 126.
18. Obvintseva L.A., Sharova T.B., Avetisov A.K., Sukhareva I.P. Semiconductor sensors for studying the heterogeneous destruction of ozone at low concentrations, *Russ. J. of Phys. Chem. A*, 2018, Vol. 92, No. 6, pp. 1099-1106.
19. Myasoedova T.N., Plugotarenko N.K., Moiseeva T.A. Copper-containing films obtained by the simple citrate sol–gel route for NO₂ detection: Adsorption and kinetic study // *Chemosensors*. – 2020. – No. 8. – P. 79.
20. Novikov S., Plugotarenko N. Metod obrabotki dannykh otklikov rezistivnykh sensorov gaza dlya sokrashcheniya vremeni opredeleniya kontsentratsii [A method of processing data of responses of resistive gas sensors to reduce the time of concentration determination], *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2022, No. 6 (217), pp. 102-106.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.И. Сухинов.

Новиков Сергей Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: n_serg7@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185194965; аспирант.

Novikov Sergey Petrovich – Southern Federal University; e-mail: n_serg7@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185194965; graduate student.

С.В. Онищенко, А.В. Козловский, Э.В. Мельник**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО МЕТОДА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ
НА ИЗОБРАЖЕНИИ**

В настоящее время развитие различных систем автоматизации процессов с каждым днем находит все более широкое применение в различных областях и отраслях остается актуальной задача разработки методов обеспечения для соответствующих автоматизированных систем. Одной из отраслей, где востребовано использование и применение систем автоматизации процессов, является область бесконтактного измерения объектов и их параметров. В качестве примера была выбрана задача по определению геометрических параметров круглых лесоматериалов, уложенных в штабели. В связи с этим в данной работе были предложены методы для определения геометрических параметров объектов на основе операций математической морфологии, организованный с использованием детектора Канны и алгоритма Хафа, и метод с использованием нейросетевого подхода, на основе архитектуры сверточной нейронной сети YOLOv5. В результате проведенных экспериментальных исследований, для организации которых использовались специально изготовленные на 3d-принтере модели бревен, было установлено что метод на основе использования нейронных сетей является более точным по сравнению с методом на основе математической морфологии. При решении задачи подсчета количества объектов на изображении, с использованием метода на основе нейросетевого подхода были определены все объекты, расположенные на изображении, тогда как метод с использованием операций математической морфологии смог определить лишь 13 из 16 расположенных бревен, и определил один ложный объект, в результате чего ошибка результата составила порядка 19% для изображения полученного из Интернета. При проведении эксперимента на изготовленных моделях цилиндров, метод на основе операций математической морфологии показал неудовлетворительные результаты. Еще одним достоинством метода на основе нейросетевого подхода является возможность реализации вычисления площади торцов бревен на изображении и определение объема каждого из расположенных бревен в штабеле, а также общего суммарного объема всей пачки измеряемых круглых лесоматериалов.

Бесконтактные методы измерения; геометрические параметры объектов; детектор Канны; алгоритм Хафа; YOLOv5; математическая морфология; сверточные нейронные сети.

S.V. Onishchenko, A.V. Kozlovsky, E.V. Melnik**DEVELOPMENT OF A HIGH-PERFORMANCE METHOD
FOR DETERMINING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF OBJECTS
IN THE IMAGE**

Currently, the development of various process automation systems is becoming more widely used every day in various fields and industries, the task of developing software methods for the corresponding automated systems remains urgent. One of the industries where the use and application of process automation systems is in demand is the field of non-contact measurement of objects and their parameters. As an example, the task of determining the geometric parameters of round timber stacked was chosen. In this regard, in this paper, methods were proposed for determining the geometric parameters of objects based on mathematical morphology operations, organized using the Canny detector and the Hough algorithm, and a method using a neural network approach based on the architecture of the YOLOv5 convolutional neural network. As a result of the conducted experimental studies, for the organization of which specially 3d-printed models of logs were used, it was found that the method based on the use of neural networks is more accurate than the method based on mathematical morphology. When solving the problem of counting the number of objects in the image, using the method based on the neural network approach, all objects located in the image were determined, whereas the method using mathematical morphology

operations was able to determine only 13 of the 16 logs located, and I identified one false object, as a result of which the result error was about 19% for an image obtained from the Internet. When conducting an experiment on manufactured cylinder models, the method based on mathematical morphology operations showed unsatisfactory results. Another advantage of the method based on the neural network approach is the possibility of calculating the area of the ends of logs in the image and determining the volume of each of the logs located in the stack, as well as the total total volume of the entire pack of measured round timber.

Contactless measurement methods; geometric parameters of objects; Canny detector; Hough algorithm; YOLOv5; mathematical morphology; convolutional neural networks.

Введение. На настоящий момент в современном мире все более широкое распространение получает автоматизация различных областей производства и различных отраслей экономического хозяйства. Одним из примеров может послужить область организации измерения геометрических параметров объектов. Для решения подобных задач может использоваться множество методов, одним из которых является использование бесконтактного подхода по организации измерений параметров объектов, позволяющего без организации дополнительных трудоемких действий получить искомые результаты [1].

Данный подход можно подразделить на два больших класса состоящих из активных и пассивных способов получения информации об измеряемом объекте. Поскольку организация активных способов требует приобретения специализированных устройств, например таких как PMD-камеры [2,3], наиболее оптимальным будет использовать пассивные способы, позволяющие ограничиться лишь изображениями измеряемых объектов, что позволяет использовать методы из теории распознавания образов [4].

Развитие данного направления позволило производить в автоматизированном режиме идентификацию различных объектов на изображениях, производить их подсчет, определять их размеры и классифицировать их по типу. Распознавание объектов может использоваться в самых различных отраслях, таких как: архитектура, дорожное строительство, медицина, различные системы безопасности, системы распознавания дорожных знаков и регистрационных номеров автомобилей и т.д.

Становится понятно, что создание некоторых комплексов, позволяющих производить учет необходимых нам объектов является актуальной задачей. Однако, предварительным этапом является разработка методов и алгоритмов, на основе которых будет происходить функционирование данных устройств учета и измерения.

В качестве задачи, для которой необходимо разработать метод можно выбрать задачу подсчета количества бревен в штабеле лесоматериалов, а также определение их геометрических параметров таких как площади торцов бревен и объем каждого из измеряемых бревен, поскольку в предыдущих работах была рассмотрена актуальность решения данной задачи [5–7].

Существующие методы для решения задачи подсчета количества круглых лесоматериалов и определения их геометрических параметров зачастую реализуются за счет использования нескольких подходов, в результате чего их использование затрудняется за счет сложной корректировки параметров настройки для обработки изображений, а точность получаемых за счет их применения результатов остается недостаточно высокой [7, 9], в связи с чем предлагается произвести реализацию подхода, позволяющего комплексно определять такие параметры складированных круглых лесоматериалов как подсчет их количества, площадь торцевых сечений, объемы бревен и всего штабеля в целом.

Материалы и методы. В целом, можно сказать, что в геометрии под параметрами объектов зачастую понимаются признаки такие как: положение в пространстве, формы объектов и величины, которые позволяют выделять различные множества однотипных объектов или единственный объект [10].

Для решения задачи по определению геометрических параметров объектов на изображении необходимо использовать наиболее оптимальные методы, обладающие высокой производительностью, к которым можно отнести подход, основанный на операциях математической морфологии и подход с использованием различных архитектур нейронных сетей.

Для определения совокупности геометрических параметров объектов прежде всего необходимо определить геометрическую форму объекта и произвести подсчет количества данных объектов, относящихся к одной классификации, для чего достаточно хорошо подходит подход, основанный на операциях математической морфологии [11]. Если будут определены две этих величины, то тогда можно будет говорить о возможности решения задачи расчета и получения точных численных значений, например таких как ширина, длина, глубина объектов их объемы и даже массы, но нахождение прочих характеристик при использовании данного подхода является не простой, поскольку необходима организация динамической подстройки параметров в алгоритме в зависимости от каждого обрабатываемого изображения.

В связи с этим, для реализации возможности определения таких параметров как площадь торцов бревен и их объемы предлагается реализовать метод на основе использования сверточных нейронных сетей, позволяющий производить классификацию объектов по принадлежности их к определенному типу, производить подсчет объектов одного типа, определение площади каждого из определенных объектов и в дальнейшем их объемов, при условии, что изначальные параметры длин бревен, уложенных в штабель нам известны.

Было произведено сравнение предложенных подходов при решении задачи определения количества объектов, расположенных на изображении, для определения наиболее точного из них и рассмотрения возможности совместного применения с существующими подходами.

Методы будут исследованы на примере штабелей круглых лесоматериалов, а для полной верификации предлагается использовать специально изготовленные на 3d-принтере цилиндрические модели, имеющие строго определенными геометрическими параметрами.

Метод на основе операций математической морфологии. При использовании данного, подхода можно с легкостью провести детектирование границ объектов, принадлежащих к одному из заранее определенных классов и осуществить подсчет количества объектов этого типа.

Для этого можно применить библиотеку OpenCV [12], используя которую можно будет вызвать детектор Канни, необходимый для определения контуров объектов на изображении [13]. Как правило, имеется необходимость производить предварительную подготовку изображения для повышения его качества и удаления различных шумов, однако мы рассматриваем случай, когда используется уже предварительно обработанное изображение, поэтому эти процедуры для нас являются необязательными. Обязательным этапом является конвертация изображения в черно-белый формат, поскольку работа детектора Канни возможно только в таком виде, и сам результат работы будет представлен в виде бинарного изображения [14].

Метод `canny()` основываясь на пороговой фильтрации изображения производит операцию по определению границ контуров объектов, в результате чего получается бинарное изображение, где белыми пикселями выделяются детектированные границы изображения.

Следующим этапом организуется этап, позволяющий за счет применения операций математической морфологии устранить прерывистость контуров объектов, полученных при помощи использования детектора Канни. Основными параметрами являются параметры пороговых значений, изменение величины которых позволяет определить, насколько точно будут идентифицироваться границы исследуемых объектов.

После необходимо реализовать процедуру, которая позволит провести подсчет объектов одного типа, для чего необходимо использовать подход с применением алгоритма Хафа [15]. Одним из недостатков данного метода является то, что для работы с новым изображением может потребоваться калибровка предустановленных параметров, что снижает его универсальность даже при работе с одним исследуемым классом объектов.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма предлагаемого метода для определения геометрических параметров использованием операций математической морфологии:

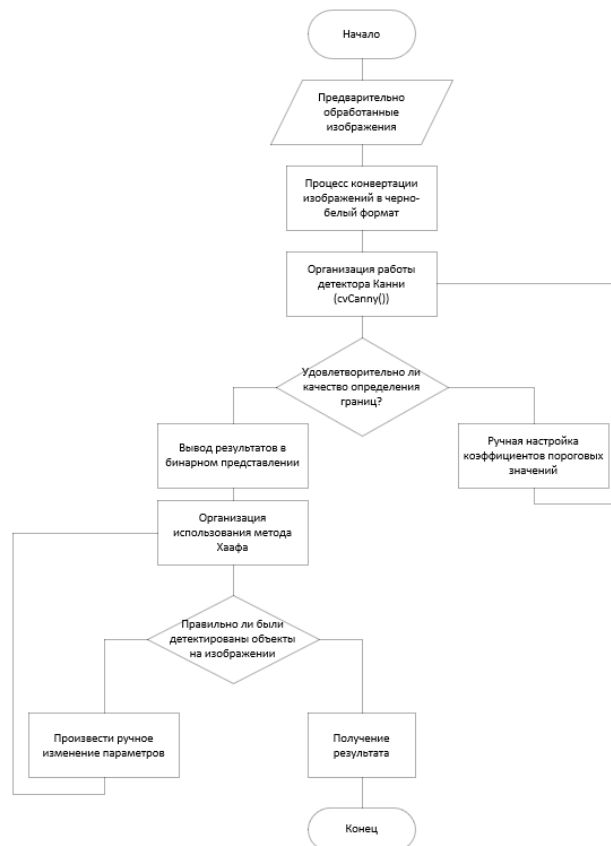


Рис. 1. Блок-схема алгоритма для метода определения геометрических параметров объектов на основе операций математической морфологии

При использовании подхода, основанного на операциях математической морфологии, реализуется этап нахождения объектов на изображении и процедура подсчета их общего количества. Для решения задачи по определению площади торцевых сечений и объемов измеряемых объектов предлагается рассмотреть метод, основанный на использовании нейросетевого подхода.

Метод определения геометрических параметров на основе использования сверточных нейронных сетей. В данном методе используется архитектура сверточных нейронных сетей, а именно архитектура YOLOv5, поскольку данный вид архитектуры наилучшим образом подходит для решения задач, связанных с обработкой изображений и определением объектов, изображенных на них [16].

Поскольку в качестве объектов измерения выбраны круглые лесоматериалы, расположенные в штабелях, задача определения площади может быть сведена к нахождению радиуса каждого из бревен, после чего будет необходимо вычислить площадь каждого из сечений торцов бревен, форма которых с некоторой погрешностью может быть интерпретирована как круг [17]:

$$S_{\text{тор}} = \pi R_{\text{тор}}^2, \quad (1)$$

где $R_{\text{тор}}$ – числовое значение радиуса торца измеряемого объекта.

После чего объем каждого из бревен может быть вычислен по формуле нахождения объема цилиндра:

$$V_{\text{бр}} = S_{\text{тор}} H = \pi R_{\text{тор}}^2 H, \quad (2)$$

где H – длина измеряемых лесоматериалов, которая как правило известна заранее и не требует вычисления.

Для нахождения объема всех измеряемых лесоматериалов, находящихся в штабеле необходимо произвести суммирование объемов каждого из бревен:

$$V_{\text{общий}} = \sum_i^n V_{i \text{ бр}}, \quad (3)$$

где n – количество распознанных бревен в общем штабеле, $V_{i \text{ бр}}$ – объем одного измеренного бревна.

Поскольку нам необходим некоторый маркер, в сравнении с которым мы сможем определить интересующие нас параметры, мы предполагаем необходимость ввода радиуса самого большого бревна в ручном режиме. Для нахождения объема необходимо ввести длину бревен в штабеле, но эта величина как правило известна заранее и не требует дополнительных измерений.

На рис. 2 представлена блок-схема нейросетевого метода определения геометрических параметров объектов [18].



Рис. 2. Блок-схема алгоритма для нейросетевого метода по определению геометрических параметров объектов на изображении

Далее, согласно методу с применением сверточных нейронных сетей, была реализована возможность для определения площади торцов бревен и их общего объема, что представлено ниже фрагментом кода:

```

middle_half_max = 0 # Максимальный радиус в пикселях
for res in results.xyxy[0]: # Анализ каждого объекта
    (tl, tr, br, bl) = [res[0], res[1]], [res[2], res[1]], [res[2], res[3]], [res[0],
res[3]] # Создании массива из 4-х координат углов
    (tlblX, tlblY) = midpoint(tl, bl) # Середина грани
    (trbrX, trbrY) = midpoint(tr, br) # Середина грани
    dB = dist.euclidean((tlblX, tlblY), (trbrX, trbrY)) # Поиск расстояния между
гранями
    if (dB / 2) / 2 > middle_half_max: # Поиск самого большого радиуса в пикселях
        middle_half_max = (dB / 2) / 2
    print('MAX: ' + str(middle_half_max)) # Вывод самого большого радиуса в
пикселях
    sum = 0
    for res in results.xyxy[0]:
        (tl, tr, br, bl) = [res[0], res[1]], [res[2], res[1]], [res[2], res[3]], [res[0], res[3]]
        (tlblX, tlblY) = midpoint(tl, bl)
        (trbrX, trbrY) = midpoint(tr, br)
        dB = dist.euclidean((tlblX, tlblY), (trbrX, trbrY))
        rad = (dB / 2) / 2 # Вычисление радиуса в пикселях
        pixelsPerMetric = middle_half_max / float(self.sm.text) # Получение метрики
зависимости пикселя от радиуса
        rad = rad / pixelsPerMetric
        area = math.pi * (rad**2)
        V = area * float(self.dlin.text)
        sum += V
    print("Радиус: " + str(rad) + " см |" + "Площадь: " + str(area) + "см^2 |" +
"Объем: " + str(V) + " см^3")

```

После того как задан радиус самого большого из измеряемых объектов, происходит присвоение данного значения самому крупному идентифицированному объекту на изображении, после чего находится коэффициент связи между линейным размером и пикселями на изображении.

После получения метрики зависимости числового значения пикселя от радиуса становится возможным определить радиусы всех остальных объектов, расположенных на изображении, после чего уже происходил вычисление площади торца бревна для каждого объекта и последующее нахождение объема согласно формуле (2).

Экспериментальные исследования предлагаемых методов. Для проведения экспериментальных исследований ранее рассмотренных методов использовались изображения бревен, полученные из Интернета и изображение, полученное путем съемки изготовленных моделей на камеру мобильного телефона. Обучение производилось с использованием фотографий с изображением круглых лесоматериалов, уложенных в штабели.

Для первого этапа эксперимента использовались изображения круглых лесоматериалов, уложенные в штабель, полученные из Интернета. В результате тестирования методов для решения задачи определения количества объектов на изображении были получены следующие результаты, представленные на рисунке ниже (рис. 3).



Рис. 3. Результат подсчета количества бревен для метода с использованием математической морфологии и метода на основе сверточных нейронных сетей на примере изображения из Интернета

В результате определено, что подход на основе математической морфологии позволил идентифицировать 13 из 16 расположенных объектов на изображении, и при этом выделил еще один ложный объект, в результате чего ошибка точности идентификации объектов составила порядка 19% [19]. Метод на основе сверточных нейронных сетей позволил определить все 16 объектов, а в качестве 17 объекта был определен с вероятностью равной 72% фрагмент бревна, расположенного слева на изображении, что может быть разрешено за счет изменения порога вероятности определения объектов, в результате чего объекты вероятность принадлежности которых к определенному классу ниже установленной не будут идентифицированы и учтены.

На следующем этапе были использованы изображения изготовленных моделей, а результат выполнения операции идентификации и подсчета объектов представлен на рис. 4.

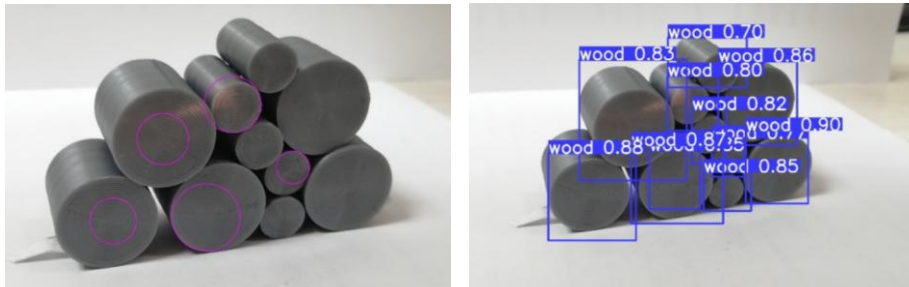


Рис. 4. Результат подсчета количества объектов для метода с использованием математической морфологии и метода на основе сверточных нейронных сетей на примере изображения с 3d моделями

В результате мы видим, что метод на основе нейронных сетей так же успешно произвел определение объектов на изображении, определив все 10 объектов, в то время как подход на основе математической морфологии показал неудовлетворительные результаты, что связано с фактом необходимости подстройки параметров алгоритма для каждого обрабатываемого изображения.

Следующим этапом являлась организация расчета площади торцов объектов и их объемов с использованием метода на основе нейронных сетей, поскольку метод на основе математической морфологии сложноадаптируем для решения данной задачи [20]. В результате проведенного измерения были получены следующие результаты, представленные на рис. 5.

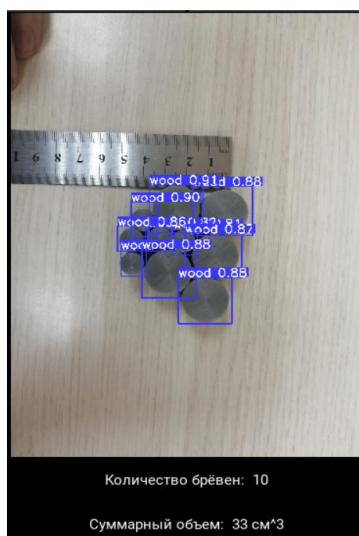


Рис. 5. Результат определения количества объектов на изображении и их общего объема с использованием метода на основе нейронных сетей

Поскольку изначальные параметры изготовленных моделей нам были известны, возможно оценить точность полученных результатов. При определении радиуса каждого объекта наибольшая ошибка расчета составила не более 7%, для определения значений площади торцов объектов наибольшее отклонение составило 9,32% как и для определения объема каждого из объектов.

Заключение. В результате выполненной работы были предложены два метода для определения геометрических параметров объектов на изображении: на основе математической морфологии и нейросетевого подхода. В результате экспериментальных исследований было установлено, что метод на основе математической морфологии, предназначенный для решения задачи определения классов объектов на изображении и подсчета их общего количества показал точность выполнения процедуры равную 81%, при реализации эксперимента с использованием изображения, полученного из сети Интернет. При использовании изображений ранее изготовленных моделей брусков, метод показал неудовлетворительные результаты, подтверждающие необходимость проведения процедуры корректировки параметров детекторов для работы с каждым конкретным изображением.

Более точным и универсальным оказался второй подход на основе сверточных нейронных сетей, позволяющий не только идентифицировать объект и произвести подсчет их количества, но и осуществить расчет площади сечения объектов и их объема при известном значении радиуса самого большого объекта и их длины. При решении задачи подсчета количества объектов на изображении были идентифицированы и распознаны все объекты, расположенные на нем, а так же определена вероятность принадлежности каждого из объектов к рассматриваемому классу. Было выяснено, что ошибки точности измерения параметров составляют до 9,5%, что в дальнейшем может быть минимизировано за счет более глубокого обучения нейронной сети и осуществления процедур предварительной обработки изображений.

В результате можно сделать вывод, что метод на основе нейросетевого подхода является вполне самостоятельным и может использоваться для решения поставленных задач по определению геометрических параметров объектов, является более точным, многофункциональным, не требует дополнительных изменений параметров при работе с изображением, по сравнению с методом на основе морфологического подхода, а его точность в дальнейшем может быть улучшена за счет организации процедуры предварительной обработки изображений и повышения их качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Peter Kačuch, Miroslav Dovica, Stanislav Slosarč'k, Jozef Kováč.* Comparison of Contact and Contactless Measuring Methods for Form Evaluation // *Procedia Engineering.* – 2012. – Vol. 48. – P. 273-279. – ISSN 1877-7058. – <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.514>.
2. *Adam D., Nissan S. B., Friedman Z., Behar V.* The Combined Effect of spatial compounding and nonlinear Filtering on the Speckle Reduction in Ultrasound Images // *Ultrasonics.* – 2006. – Vol. 44. – P. 166-181.
3. *Beder Chr., Bartczak B. and Koch R.* A Comparison of PMD-Cameras and Stereo-Vision for the Task of Surface Reconstruction using Patchlets // *Computer Vision and Pattern Recognition.* – IEEE, 2007. – P. 1-8.
4. *Чабан Л.Н.* Теория и алгоритмы распознавания образов: учеб. пособие. – М.: МИИГАиК. 2004. – 70 с.
5. *Козловский А.В., Онищенко С.В., Авдеев В.Е.* Исследование методов измерения круглых лесоматериалов // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сб. статей VII Всероссийской научно-технической конференции*, Таганрог, 05–11 апреля 2021 г. – Таганрог: ЮФУ, 2021. – С. 357-360.
6. *Онищенко, С.В., Козловский А.В.* Исследование метода определения геометрических параметров объектов по предварительно обработанным цифровым изображениям // *Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2021): Сб. трудов XIX Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов.* – Ростов-на-Дону - Таганрог: ЮФУ, 2020. – С. 59-62.
7. *Мельник Э.В., Онищенко С.В., Козловский А.В.* Исследование возможности реализации мобильных комплексов для бесконтактного измерения геометрических параметров объектов // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сб. статей VIII Всероссийской научно-технической конференции.* Таганрог, 2022.
8. *Herbon C., Tonnie K., Stock B.* Detection and segmentation of clustered objects by using iterative classification, segmentation, and Gaussian mixture models and application to wood log detection // *Pattern Recognition.* Springer International Publishing. – 2014. – P. 354-364.
9. *Galsgaard B., Lundtoft D.H., Nikolov I., Nasrollahi K., Moeslund T.B.* Circular Hough Transform and Local Circularity Measure for Weight Estimation of a Graph-Cut Based Wood Stack Measurement // *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Waikoloa, HI,* 2015. – P. 686-693.
10. *Антипов В.А.* Начертательная геометрия: курс лекций. – Самара: СамГАПС, 2005. – 64 с.
11. *Lestari Wiji and Sri Sumarlinda.* Application of Mathematical Morphology Algorithm for Image Enhancement Of Breast Cancer Detection. – 2019.
12. *Kavitha D.* Multiple Object Recognition Using OpenCV // *Revista Gestão Inovação e Tecnologias.* – 2021. – No. 11. – P. 1736-1747. – 10.47059/revistageintec.v11i2.1795.
13. *Li J., Ding S.* A research on improved canny edge detection algorithm. In: *Applied Informatics and Communication // ICAIC 2011. Communications in Computer and Information Science.* – Vol. 228. – Springer, Berlin, 2011.
14. *Canny John.* A Computational Approach to Edge Detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence // IEEE Transactions on. PAMI-8.* – 1986. – P. 679-698. – 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
15. *Shehata Allam & Mohammad Sherien & Abdallah Mohamed & Ragab Mohammad.* A Survey on Hough Transform, Theory, Techniques and Applications. – 2015.

16. Zhu Xingkui, Shuchang Lyu, Xu Wang and Qi Zhao. PH-YOLOv5: Improved YOLOv5 Based on Transformer Prediction Head for Object Detection on Drone-captured Scenarios // 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW). – 2021. – P. 2778-2788.
17. Самойлов А.Н., Сергеев Н.Е., Волошин А.В., Козловский А.В. Метод фотограмметрического измерения геометрических параметров объектов, инвариантный к фоторегистрирующим устройствам // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. – 2021. – Вып. 4 (291). – С. 58-69. – URL: <http://vestnik.adygnet.ru>.
18. Бучацкий П.Ю., Онищенко С.В., Теплоухов С.В. Разработка метода определения геометрических параметров объектов на изображении на основе нейросетевого подхода // Вестник Адыгейского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 57-62.
19. Бучацкий П.Ю., Онищенко С.В., Теплоухов С.В. Разработка метода подсчета количества объектов на цифровом изображении на основе морфологического подхода // Дистанционные образовательные технологии: Матер. VII международной научно-практической конференции, Ялта, 20–22 сентября 2022 года. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2022. – С. 120-123.
20. Онищенко С.В., Козловский А.В., Мельник Э.В. Разработка бесконтактной системы измерения геометрических параметров объектов на изображении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – С. 177-181.

REFERENCES

1. Peter Kačuch, Miroslav Dovica, Stanislav Slosarč'k, Jozef Kováč. Comparision of Contact and Contactless Measuring Methods for Form Evaluation, *Procedia Engineering*, 2012, Vol. 48, pp. 273-279. ISSN 1877-7058. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.514>.
2. Adam D., Nissan S. B., Friedman Z., Behar V. The Combined Effect of spatial compounding and nonlinear Filtering on the Speckle Reduction in Ultrasound Images, *Ultrasonic*, 2006, Vol. 44, pp. 166-181.
3. Beder Chr., Bartczak B. and Koch R. A Comparison of PMD-Cameras and Stereo-Vision for the Task of Surface Reconstruction using Patchlets, *Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2007, pp. 1-8.
4. Chaban L.N. Teoriya i algoritmy raspoznavaniya obrazov: ucheb. posobie [Theory and algorithms of pattern recognition: textbook]. Moscow: MIIGAiK. 2004, 70 p.
5. Kozlovskiy A.V., Onishchenko S.V., Avdeev V.E. Issledovanie metodov izmereniya kruglykh lesomaterialov [Research of methods for measuring round timber], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: Sb. statey VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Taganrog, 05–11 aprelya 2021 g.* [Fundamental and applied aspects of computer technologies and information security : collection of articles in the VII All-Russian Scientific and Technical Conference, Taganrog, 05-11 April 2021]. Taganrog: YuFU, 2021, pp. 357-360.
6. Onishchenko, S.V., Kozlovskiy A.V. Issledovanie metoda opredeleniya geometricheskikh parametrov ob"ektov po predvaritel'no obrabotannym tsifrovym izobrazheniyam [Research of a method for determining geometric parameters of objects from preprocessed digital images], *Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie (ITSAU-2021): Sb. trudov XIX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Information technologies, system analysis and management (ITSAU-2021): Proceedings of the XIX All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, postgraduates and students]. Rostov-on-Don - Taganrog: YuFU, 2020, pp. 59-62.
7. Mel'nik E.V., Onishchenko S.V., Kozlovskiy A.V. Issledovanie vozmozhnosti realizatsii mobil'nykh kompleksov dlya beskontaktnogo izmereniya geometricheskikh parametrov ob"ektov [Investigation of the possibility of implementing mobile complexes for contactless measurement of geometric parameters of objects], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: Sb. statey VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [The proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Fundamental and applied aspects of computer technology and information security"]. Taganrog, 2022.

8. Herbon C., Tonnie K., Stock B. Detection and segmentation of clustered objects by using iterative classification, segmentation, and Gaussian mixture models and application to wood log detection, *Pattern Recognition. Springer International Publishing*, 2014, pp. 354-364.
9. Galsgaard B., Lundtoft D.H., Nikolov I., Nasrollahi K., Moeslund T.B. Circular Hough Transform and Local Circularity Measure for Weight Estimation of a Graph-Cut Based Wood Stack Measurement, *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Waikoloa, HI*, 2015, pp. 686-693.
10. Antipov V.A. Nachertatel'naya geometriya: kurs lektsiy [Descriptive geometry: a course of lectures]. Samara: SamGAPS, 2005, 64 p.
11. Lestari Wiji and Sri Sumarlinda. Application of Mathematical Morphology Algorithm for Image Enhancement of Breast Cancer Detection, 2019.
12. Kavitha D. Multiple Object Recognition Using OpenCV [Recognition of Multiple Objects Using OpenCV], *Revista Gestão Inovação e Tecnologias* [Revision of the Concept of innovation and technology], 2021, No. 11, pp. 1736-1747. 10.47059/revistageintec.v11i2.1795.
13. Li J., Ding S. A research on improved canny edge detection algorithm. In: *Applied Informatics and Communication, ICAIC 2011. Communications in Computer and Information Science*, Vol. 228. Springer, Berlin, 2011.
14. Canny John. A Computational Approach to Edge Detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. PAMI-8*, 1986, pp. 679-698. 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
15. Shehata Allam & Mohammad Sherien & Abdallah Mohamed & Ragab Mohammad. A Survey on Hough Transform, Theory, Techniques and Applications, 2015.
16. Zhu Xingkui, Shuchang Lyu, Xu Wang and Qi Zhao. PH-YOLOv5: Improved YOLOv5 Based on Transformer Prediction Head for Object Detection on Drone-captured Scenarios, *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, 2021, pp. 2778-2788.
17. Samoylov A.N., Sergeev N.E., Voloshin A.V., Kozlovskiy A.V. Metod fotogrammetricheskogo izmereniya geometricheskikh parametrov ob"ektov, invariantnyy k fotoregistriruyushchim ustroystvam [The method of photogrammetric measurement of geometric parameters of objects, invariant to photo-recording devices], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adygea State University. Ser.: Natural-mathematical and technical sciences], 2021, Issue. 4 (291), pp. 58-69. Available at: <http://vestnik.adygnet.ru>.
18. Buchatskiy P.Yu., Onishchenko S.V., Teploukhov S.V. Razrabotka metoda opredeleniya geometricheskikh parametrov ob"ektov na izobrazhenii na osnove neyrosetevogo podkhoda [Development of a method for determining geometric parameters of objects in an image based on a neural network approach], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adygea State University. Technical sciences], 2022, No. 3, pp. 57-62.
19. Buchatskiy P.Yu., Onishchenko S.V., Teploukhov S.V. Razrabotka metoda podscheta kolichestva ob"ektov na tsifrovom izobrazhenii na osnove morfologicheskogo podkhoda [Development of a method for counting the number of objects in a digital image based on a morphological approach], *Distantsionnye obrazovatel'nye tekhnologii: Mater. VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, YAlta, 20–22 sentyabrya 2022 goda* [Distance learning technologies: Materials of the VII International Scientific and Practical Conference, Yalta, September 20-22, 2022]. Simferopol': Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Izdatel'stvo Tipografiya «Arial», 2022, pp. 120-123.
20. Onishchenko S.V., Kozlovskiy A.V., Mel'nik E.V. Razrabotka beskontaktnoy sistemy izmereniya geometricheskikh parametrov ob"ektov na izobrazhenii [Development of a contactless system for measuring geometric parameters of objects in an image], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical sciences], 2022, pp. 177-181.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Онищенко Стефан Владимирович – Адыгейский государственный университет; e-mail: osv@adygnet.ru; г. Майкоп, Россия; кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; ассистент.

Мельник Эдуард Всеволодович – Южный федеральный университет; e-mail: evmelnik@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; д.т.н.

Козловский Александр Вячеславович – e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Onishchenko Stefan Vladimirovich – Adygea State University; e-mail: osv@adygnet.ru; Maykop, Russia; the department of automated information processing and management systems; assistant.

Melnik Eduard Vsevolodovich – Southern Federal University; e-mail: evmelnik@sfedu.ru; Taganrog, Russia; dr. of eng. sc.

Kozlovsky Alexander Vyacheslavovich – e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; the department of computer engineering; graduate student.

УДК 004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-97-105

Н.В. Драгныш

РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Использование генераторов случайных чисел находит широкое распространение. Программные генераторы как правило выдают псевдослучайные числа. Для улучшения характеристик, необходим источник "хаоса". В данной статье рассматривается реализация генератора случайных чисел, использующего идею перемешивания полного набора чисел в параллельном потоке. На работу процессора в таком режиме оказывают влияние множество случайных факторов, что позволяет выдавать случайные числа. У предложенного генератора каждое последующее число не зависит от предыдущего. Генератор может выдать любое число заданного диапазона, несмотря на то сколько и какие числа выпадали ранее. В том числе может выпасть с малой вероятностью одно и то же число несколько раз подряд. Отсутствует заранее определенная последовательность выдачи случайных чисел. Период, свойственный программным генераторам псевдослучайных чисел, также отсутствует. Но при этом снижается быстродействие выдачи случайных чисел, в сравнении с программными генераторами псевдослучайных чисел. Целью исследования было оценить свойства предложенного генератора, в первую очередь статистические характеристики генерируемых чисел. В статье рассмотрены вопросы идеи параллельного перемешивания. Вопросы реализации на языке программирования. Представлен программный интерфейс класса MixRandomBase и особенности реализации класса MixRandomByte, использующего рабочий массив из байтов. Для проверки качества работы генераторов случайных и псевдослучайных чисел применяют различные тесты. Приведены результаты проверки работы генератора такими тестами как распределение на плоскости, тест равномерности, тест "стопка книг". Результаты тестирования позволяют судить о хороших статистических характеристиках разработанного генератора. Оценено быстродействие генератора. В сравнении с линейными конгруэнтными генераторами псевдослучайных чисел время выдачи последовательности чисел больше в сотни раз.

Генератор случайных чисел; перемешивание случайных чисел; параллельное программирование; тесты генераторов случайных чисел.

N.V. Dragnysh

IMPLEMENTATION AND STUDY OF THE RANDOM NUMBER GENERATOR BASED ON PARALLEL MIXING

The use of random number generators is widespread. Software generators usually produce pseudo-random numbers. To improve characteristics, it needs a source of "chaos". This article discusses the implementation of a random number generator that uses the idea of mixing a complete set of numbers in a parallel thread. The operation of the processor in this mode is influenced

by many random factors, which allows issuing random numbers. For the proposed generator, each subsequent number does not depend on the previous one. The generator can give out any number of the given range, regardless of how many and what numbers fell out earlier. Including the same number can fall out with a low probability several times in a row. There is no predetermined sequence of issuing random numbers. The period inherent in software pseudo-random number generators is also missing. However, at the same time, the speed of issuing random numbers decreases, in comparison with software pseudo-random number generators. The purpose of research was to evaluate the properties of the proposed generator, primarily the statistical characteristics of the generated numbers. The article deals with the idea of parallel mixing. Implementation issues in a programming language. The programming interface of the MixRandomBase class and implementation features of the MixRandomByte class, which uses a working array of bytes, are presented. Various tests are used to check the quality of the work of random and pseudo-random number generators. The results of checking the operation of the generator by such tests as the distribution on the plane, the uniformity test, the "stack of books" test are given. The test results make it possible to judge the good statistical characteristics of the developed generator. The speed of the generator is estimated. In comparison with linear congruent pseudo-random number generators, the time for issuing a sequence of numbers is hundreds of times longer.

Random number generator; random number mixing; parallel programming; random number generator tests.

Введение. Генераторы случайных и псевдослучайных чисел (ГСЧ и ГПСЧ) находят все большее применение во многих прикладных задачах. Изначально использовались в имитационном моделировании [1] (метод Монте-Карло), криптографии. Затем все активнее в многих областях программирования, системах и методах искусственного интеллекта. Случайные числа используются в том числе в педагогической деятельности [2, 3]. Неплохой обзор ГСЧ приведен в [1, 4, 5], также в [6–8]. Рекомендации построения генераторов в [9–11].

В статье [12] мною был предложен генератор случайных чисел, использующий идею перемешивания полного набора чисел в параллельном потоке.

Такой генератор содержит рабочий массив, заполненный всеми числами некоторого диапазона. Каждое число встречается один раз. Постоянно, в параллельном потоке, независимо от вызывающей программы и других программ, происходит перемешивание рабочего массива. Вспомогательным ГСЧ выбираются две позиции массива и эти элементы меняются местами. Когда необходимо выдать случайное число, тот же вспомогательный ГСЧ выбирает позицию и выдает соответствующее число вызывающей основной программе. В результате параллельной работы потока выдачи чисел и потока перемешивания, с учетом, что вспомогательный генератор для них один, получаются непредсказуемые постоянные сдвиги в алгоритме работы вспомогательного генератора.

У предложенного конечного генератора каждое последующее число не зависит от предыдущего, так как при выдаче генератор каждый раз работает с новым массивом чисел, число перемешиваний непредсказуемо. Генератор может выдать любое число заданного диапазона, несмотря на то сколько и какие числа выпадали ранее. В том числе может выпасть с малой вероятностью одно и то же число несколько раз подряд. Отсутствует заранее определенная последовательность выдачи случайных чисел, так как выбору нового случайного числа генератором предшествует перемешивание рабочего массива, и количество замен до следующего выбора случайного числа не определено. Период, свойственный программным генераторам псевдослучайных чисел, также отсутствует.

Особенности реализации. Различные варианты описанного генератора были реализованы на языке программирования C#. Пробовались рабочие массивы разного размера (разрядность элементов от 8 бит до 64). В качестве вспомогательного генератора использовался комбинированный линейный конгруэнтный генератор,

код которого приведен в [1], а также встроенный генератор языка программирования (класс Random). При этом отличные статистические результаты получались уже на разрядности в 8 бит. С ростом размера массива качество сгенерированных чисел оставалось по-прежнему отличным, но существенно увеличивались затраты на системные ресурсы. Похожие результаты получались и при рассмотренных вариантах вспомогательных генераторов. Поэтому в конечном варианте реализации использовался 8 битный рабочий массив и встроенный генератор в качестве вспомогательного.

Программный интерфейс генератора (MixRandomBase) содержит функции:

- ◆ NextByte() - возвращает один случайный байт от 0 до 255;
- ◆ NextBytes(int size) – возвращает массив случайных байтов;
- ◆ NextUInt16() – возвращает целое от 0 до UInt16.MaxValue;
- ◆ NextUInt32() – возвращает целое от 0 до UInt32.MaxValue;
- ◆ NextUInt64() – возвращает целое от 0 до UInt64.MaxValue;
- ◆ NextDouble() – возвращает вещественное число от 0 до 1 на основе 32-разрядного целого;
- ◆ NextDecimal() – возвращает вещественное число от 0 до 1 на основе 64-разрядного целого;
- ◆ StartMix() – старт параллельного перемешивания;
- ◆ StopMix() – остановка(пауза) параллельного перемешивания;
- ◆ SaveTxtFile(string filename) – сохранение внутреннего массива в текстовый файл;
- ◆ LoadTxtFile(string filename) – чтение внутреннего массива из текстового файла.

Класс MixRandomByte реализует этот интерфейс используя в качестве рабочего массив байт со значениями от 0 до 255. Программа, использующая генератор, создает объект этого класса. При создании экземпляра создается рабочий массив, инициализируется стартовыми значениями. Изначально этот экземпляр имеет перемешанный рабочий массив. Перемешанный можно прочитать из файла функцией LoadTxtFile.

Функция StartMix запускает параллельный поток, в котором постоянно выполняется перемешивание рабочего массива:

- ◆ выполняется блокировка/захват (lock) вспомогательного генератора (чтобы избежать коллизий с основным потоком);
- ◆ вспомогательным генератором генерируются два числа от 0 до 255 – индексы элементов, которые меняются местами;
- ◆ освобождается вспомогательный генератор, чтобы мог использоваться основным потоком;
- ◆ блокируется рабочий массив (в процессе замены элементов есть момент времени, когда в рабочем массиве два одинаковых элемента, а один отсутствует);
- ◆ два элемента рабочего массива с выбранными индексами меняются местами;
- ◆ снимается блокировка с рабочего массива.

После старта перемешивания основная программа может вызывать функции возвращающие случайные числа. Функция NextByte блокирует вспомогательный генератор, берет от него индекс от 0 до 255, снимает блокировку и возвращает элемент рабочего массива с этим индексом. Остальные функции, возвращающие сгенерированные числа, используют необходимое количество вызовов NextByte и преобразуют в необходимый формат.

Когда основной программе не нужны случайные числа можно остановить перемешивание функцией StopMix. Текущее состояние рабочего массива можно сохранить в файл (SaveTxtFile).

Типичное использование генератора имеет вид:

```
...
MixRandomByte mr1 = new MixRandomByte();
mr1.LoadTxtFile("save.txt");
mr1.StartMix();
...
current = mr1.NextDouble();// вызываем случайные числа
...
mr1.StopMix();
mr1.SaveTxtFile("save.txt");
...
```

Таким образом, предложенный генератор случайных чисел на основе параллельного перемешивания (MixRandom) был программно реализован в виде класса C#. Этот класс может быть использован в любой программе, для которой необходимы более качественные (в статистическом смысле) последовательности случайных чисел.

Исследование характеристик. Для проверки качества работы генератора случайных и псевдослучайных чисел применяют различные тесты [5, 13–15]. Часто методы оценки качества генераторов разделяют на две группы:

- ♦ графические тесты – свойства последовательностей сгенерированных чисел отображаются в виде графических зависимостей, по виду которых делают выводы (человек-исследователь) о свойствах исследуемой последовательности;
- ♦ оценочные (статистические) тесты – статистические свойства последовательностей определяются числовыми характеристиками (критериями). На основе критериев делаются заключения о близости свойств анализируемой и случайной последовательностей.

К результатам работы рассматриваемого генератора были применены множество различных тестов. Все эти тесты успешно пройдены. Далее в статье приводятся результаты некоторых из них.

Тест (графический) *распределение на плоскости* [5, 13]. Предназначен для определения зависимостей между элементами сгенерированной последовательности (выборки). На квадратном поле наносятся точки с координатами (x_i, x_{i+1}) , где x_i – элементы исследуемой выборки, $i = 0, 1, \dots, n - 2$, n – объем выборки. Затем анализируется полученная картинка. Если на поле присутствуют закономерности (фигуры, узоры, пятна, линии) – выборка не является случайной, элементы зависимы. На рис. 1 представлены результаты работы генератора перемешивания MixRandom.

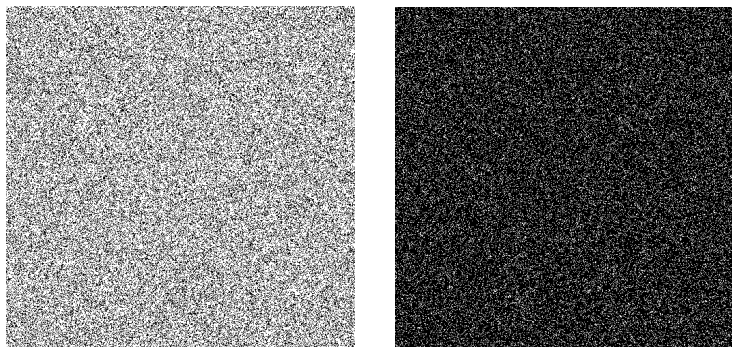


Рис. 1. Результаты теста распределение на плоскости

Поле справа заполнено точками выборки, объем которой больше в 5 раз, чем выборки поля слева.

Для сравнения на рис. 2 приведены результаты теста распределение на плоскости для неудачных реализаций ГСЧ [5, 13].

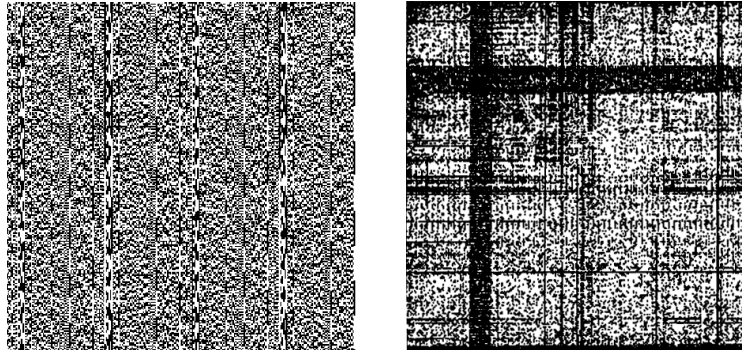


Рис. 2. Результаты теста распределение на плоскости для “плохих” ГСЧ

Для проверки на равномерность распределения применялся классический статистический критерий χ^2 (хи квадрат) Пирсона [16]. Сгенерированная выборка $x_1, x_2, \dots, x_n$ ($x_i \in [0; 1)$) разбивается на k интервалов одинаковой длины ($h = 1/k$). Количество интервалов определялось формулой Стерджесса: $k = 1 + \log_2 n$ (округляется до целого). Теоретическая вероятность попадания в интервал в случае равномерного закона, при одинаковой длине, одинаковая $p_j = 1/k$.

Наблюдавшееся значение критерия вычисляется по формуле

$$\chi^2_{\text{набл}} = \sum_{j=1}^k \frac{n_j^2}{n \cdot p_j} - n,$$

где n_j – частота попадания в интервал, n – объем выборки.

Наблюдавшееся значение критерия сравнивается с квантилями χ^2 распределения. Причем в случае тестирования ГСЧ применение критерия один раз ничего не дает (с определенной вероятностью гипотеза о равномерности примется или отклонится). Гораздо интереснее результаты многократного применения критерия к различным выборкам (проверок N выборок, каждая объемом n). И соответственно, сравнение результатов с квантилями χ^2 распределения.

В табл. 1 приведены результаты проверки генератора MixRandom на равномерный закон распределения с помощью критерия χ^2 . Где n – объем одной сгенерированной выборки, N – число применений критерия (оно же количество сгенерированных выборок), k – число интервалов, $\chi^2_{\alpha; k-1}$ – α -квантиль критерия (α – уровень значимости, $k-1$ – число степеней свободы), Q_α – сколько раз из N применений критерия наблюдавшееся значение критерия $\chi^2_{\text{набл}}$ превысило $\chi^2_{\alpha; k-1}$. Проверялись квантили уровней $\alpha = 0,5$ и $\alpha = 0,05$. При $N=1000$ математическое ожидание превышения квантиля уровня 0,5 равно 500 ($0,5 \cdot 1000$), квантиля уровня 0,05 равно 50.

Таблица 1

Результаты проверки на равномерность

n	N	к	$\chi^2_{0,5; k-1}$	$\chi^2_{0,05; k-1}$	$Q_{0,5}$	$Q_{0,05}$
1000	1000	11	9,342	18,307	504	48
10000	1000	14	12,340	22,362	515	53
100000	1000	18	16,338	27,587	494	52

Результаты проверки хорошо согласуются с ожидаемыми результатами. $Q_{0,5}$ колеблется в районе 500, а $Q_{0,05}$ в районе 50.

Рябко Б.Я. и Пестуновым А.И. был предложен статистический тест «Стопка книг» [17]. В работах [18, 19] показана эффективность этого теста в сравнении с тестами NIST STS [14]. Тест позволил выявить проблемы многих генераторов, и в настоящее время считается одним из главных тестов генераторов случайных и псевдослучайных чисел [20, 21].

Пусть генератор порождает элементы из алфавита $A = \{a_1, a_2, \dots, a_S\}$, $S > 1$, и требуется по выборке $x_1, x_2, \dots, x_n$ проверить гипотезу H_0 , заключающуюся в том, что элементы выборки независимы и вероятность появления любого символа алфавита одинаковая ($P(x_i = a_j) = 1/S$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, S$). Альтернативной гипотезы H_1 является отрицанием H_0 .

Перед тестированием выборки в алфавите A фиксируется произвольный порядок, который меняется после анализа каждого выборочного элемента x_i следующим образом: буква x_i получает номер 1; номера тех букв, которые были меньше номера этой буквы, увеличиваются на 1; у остальных букв номера не меняются.

Формально эту процедуру можно описать так: пусть $\omega^i(a)$ это номер элемента $a \in A$ после анализа элементов $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}$, тогда

$$\omega^{i+1}(a) = \begin{cases} 1, & x_i = a \\ \omega^i(a) + 1, & \omega^i(a) < \omega^i(x_i) \\ \omega^i(a), & \omega^i(a) > \omega^i(x_i) \end{cases}$$

Такая конструкция похожа на стопку книг, если считать, что номер книги совпадает с ее положением в стопке. Книга извлекается из стопки, после чтения кладется наверх, и ее номер становится первым. Книги, которые первоначально были над ней, двигаются вниз, а остальные остаются на месте.

Заметим, что $\omega^i(x_i)$ – номер элемента x_i в алфавите до обработки значения выборки x_i .

В отличие от многих других тестов, например, критерия хи квадрат, здесь подсчитывается не частота встречаемости букв в выборке, а частота встречаемости номеров букв при описанном упорядочивании.

Перед тестированием множество всех номеров $\{1, \dots, S\}$ разбивается на две непересекающиеся части: $A_1 = \{1, 2, \dots, \sqrt{S}\}$ и $A_2 = \{\sqrt{S} + 1, \dots, S\}$. Затем по выборке $x_1, x_2, \dots, x_n$ подсчитывается n_1 – количество номеров $\omega^i(x_i)$, принадлежащих подмножеству A_1 , т. е. количество попаданий элементов в “верхнюю часть” “стопки книг”. Число $(n - n_1)$, очевидно, равно количеству попаданий в “нижнюю часть”. Далее вычисляется статистика [16] (которая при верности гипотезы H_0 должна быть распределена по закону χ^2 с одной степенью свободы)

$$\chi_{\text{набл}}^2 = \frac{(n_1 - np_1)^2}{np_1} + \frac{((n - n_1) - n(1 - p_1))^2}{n(1 - p_1)}.$$

После преобразований статистику можно привести к виду

$$\chi_{\text{набл}}^2 = \frac{(n_1 - np_1)^2}{np_1(1 - p_1)}.$$

Так как, внутренняя реализация генератора MixRandom подразумевает естественный возврат одного случайного байта (остальные возвращаемые значения других типов собираются из байтов), алфавит при проверке был выбран $A = \{0, 1, \dots, 255\}$.

В табл. 2 приведены результаты проверки генератора MixRandom тестом «Стопка книг». Где n – объем одной сгенерированной выборки, N – число применений критерия (оно же количество сгенерированных выборок). Q_α – сколько раз из N применений критерия наблюдавшееся значение критерия $\chi^2_{\text{набл}}$ превысило $\chi^2_{\alpha;1}$. Квантиль χ^2 с одной степенью свободы уровня 0,5 $\chi^2_{0,5;1} = 0,455$, а уровня 0,05 $\chi^2_{0,05;1} = 3,841$. При $N=1000$ математическое ожидание превышения квантиля уровня 0,5 равно 500, квантиля уровня 0,05 равно 50.

Таблица 2

Результаты проверки тестом «Стопка книг»

n	N	$Q_{0,5}$	$Q_{0,05}$
1000	1000	516	41
10000	1000	502	45
100000	1000	499	52
1000000	1000	501	50

Результаты проверки хорошо согласуются с ожидаемыми результатами. $Q_{0,5}$ колеблется в районе 500, а $Q_{0,05}$ в районе 50.

Кроме статистических характеристик генератор MixRandom был проверен на быстродействие. Замерялось время генерации выборки заданного объема вещественных чисел типа double (8 байт). Результаты представлены в таблице 3. Приводится сравнение с встроенным ГСЧ класса Random.

Таблица 3

Результаты теста на быстродействие

n	Время, мс		
	1000	10000	100000
MixRandom	1	43	644
Random	<1	<1	2

Как видно встроенный генератор выполняет выдачу в сотни раз быстрее. Что и неудивительно, так как он является линейным конгруэнтным генератором, выдающим результат на основе простой формулы от предыдущего числа. При этом числа встроенного генератора являются псевдослучайными, с неплохими статистическими характеристиками, но с периодом (пусть и очень большим) и с памятью (если числа появлялись чаще в некоторой части диапазона, то в будущем будут чаще появляться в тех где их было меньше).

Выводы. Таким образом, был реализован генератор случайных чисел MixRandom. Основанный на перемешивании массива байт в параллельном потоке от основной программы. Результаты тестирования позволяют судить о хороших статистических характеристиках последовательностей, выдаваемых генератором. Оценено быстродействие генератора. В сравнении с линейными конгруэнтными генераторами псевдослучайных чисел время выдачи последовательности чисел больше в сотни раз. Но реализация данного генератора была в первую очередь предназначена для оценки статистических характеристик. Для интенсивной работы генератора возможна модификация и оптимизация алгоритмов, которая улучшит быстродействие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кельтон В. Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
2. Драгныш Н.В. Использование методов имитационного моделирования для преподавания курса «Теория вероятностей и математическая статистика» // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2011. – № 12. – С. 26-29.
3. Драгныш Н.В. Использование инновационных технологий для преподавания курса "Теория вероятностей и математическая статистика" // Дискуссия. – 2010. – № 8. – С. 80-83.
4. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Т. 2: Получисленные алгоритмы. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2019. – 832 с.
5. Иванов М.А., Чугунков И.В. Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003. – 240 с.
6. L'Ecuyer P. Tables of linear congruential generators of different sizes and good lattice structure // Math. of Comp. – 1999. – Vol. 68. – P. 249-260.
7. Подорожний И.В. Обзор аппаратных генераторов случайных чисел // Молодой ученый. – 2016. – № 1 (105). – С. 190-194.
8. Задков В.Н., Владимирова Ю.В. Классические и квантовые генераторы случайных чисел // Суперкомпьютеры. – 2013. – № 2. – С. 12-20.
9. Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators. – URL: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-90Ar1.pdf> (дата обращения: 05.11.2022).
10. Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation. – URL: http://csrc.nist.gov/publications/drafts/800-90/sp800-90b_second_draft.pdf (дата обращения: 05.11.2022).
11. Recommendation for Random Bit Generator (RBG) Constructions. – URL: <http://csrc.nist.gov/publications/drafts/800-90/draft-sp800-90c.pdf> (дата обращения: 05.11.2022).
12. Драгныш Н.В. Построение генератора случайных чисел на основе параллельного перемешивания // Наука, техника и образование. – 2015. – № 6 (12). – С. 12-14.
13. Григорьев А.Ю. Методы тестирования генераторов случайных и псевдослучайных последовательностей // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. – 2017. – № 1. – С. 22-28.
14. NIST Statistical Test Suite. – URL: http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/rng/documentation_software.html (дата обращения: 05.11.2022).
15. Rukhin A. and others. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. NIST Special Publication 800-22 (with revisions dated May 15, 2001) NIST Statistical Test Suite. – URL: http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/rng/documentation_software.html (дата обращения: 05.11.2022).
16. Р 50.1.033–2001. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. I. Критерии типа хи-квадрат. – М.: Изд-во стандартов. 2002. – 87 с.
17. Рябко Б.Я., Пестунов А.И. "Стопка книг" как новый статистический тест для случайных чисел // Проблемы передачи информации. – 2004. – Т. 40. – Вып. 1. – С. 73-78.
18. Пестунов А.И. Теоретическое исследование свойств статистического теста "stopka книг" // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, № 6. – С. 96-103.
19. Миненко А.И. Экспериментальное исследование эффективности тестов для проверки генераторов случайных чисел // Вестник СибГУТИ. – 2010. – № 4. – С. 36-46.
20. Ryabko B., Monarev V. Using information theory approach for randomness testing // J. of Statistical Planning and Reference. – 2005. – Vol. 133, No. 1. – P. 95-110.
21. Ryabko B., Stognienko V., Shokin Yu. A new test for randomness and its application to some cryptographic problems // J. of Statistical Planning and Reference. – 2004. – Vol. 123, No. 2. – P. 365-376.

REFERENCES

1. Kel'ton V. Lou A. Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS [Simulation modeling. CS classic]. Saint Petersburg: Piter; Kiev: Izdatel'skaya gruppa BHV, 2004, 847 p.
2. Dragnysh N.V. Ispol'zovanie metodov imitatsionnogo modelirovaniya dlya prepodavaniya kursa «Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika» [The use of simulation methods for teaching the course "Probability Theory and Mathematical Statistics"], *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of the humanities and natural sciences], 2011, No. 12, pp. 26-29.

3. *Dragnysh N.V.* Ispol'zovanie innovatsionnykh tekhnologiy dlya prepodavaniya kursa "Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika" [The use of innovative technologies for teaching the course "Probability Theory and Mathematical Statistics"], *Diskussiya* [Discussion], 2010, No. 8, pp. 80-83.
4. *Knut D.E.* Iskustvo programmirovaniya. T. 2: Poluchislennyye algoritmy [The art of programming. Vol. 2: Obtained algorithms]. Moscow: Izd. dom "Vil'yams", 2019, 832 p.
5. *Ivanov M.A., Chugunkov I.V.* Teoriya, primeneniye i otsenka kachestva generatorov psevdosluchaynykh posledovatel'nostey [Theory, application and evaluation of the quality of generators of pseudo-random sequences]. Moscow: KUDITS-OBRAZ, 2003, 240 p.
6. *L'Ecuyer P.* Tables of linear congruential generators of different sizes and good lattice structure, *Math. of Comp.*, 1999, Vol. 68, pp. 249-260.
7. *Podorozhnyy I.V.* Obzor apparatnykh generatorov sluchaynykh chisel [Overview of hardware random number generators], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2016, No. 1 (105), pp. 190-194.
8. *Zadkov V.N., Vladimirova Yu.V.* Klassicheskie i kvantovye generatory sluchaynykh chisel [Classical and quantum random number generators], *Superkomp'yutery* [Supercomputers], 2013, No. 2, pp. 12-20.
9. Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators. Available at: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-90Ar1.pdf> (accessed 05 November 2022).
10. Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation. Available at: http://csrc.nist.gov/publications/drafts/800-90/sp800-90b_second_draft.pdf (accessed 05 November 2022).
11. Recommendation for Random Bit Generator (RBG) Constructions. Available at: <http://csrc.nist.gov/publications/drafts/800-90/draft-sp800-90c.pdf> (accessed 05 November 2022).
12. *Dragnysh N.V.* Postroyeniye generatora sluchaynykh chisel na osnove parallel'nogo peremeshivaniya [Building a random number generator based on parallel mixing], *Nauka, tekhnika i obrazovaniye* [Science, technology and education], 2015, No. 6 (12), pp. 12-14.
13. *Grigor'ev A.Yu.* Metody testirovaniya generatorov sluchaynykh i psevdosluchaynykh posledovatel'nostey [Methods for testing generators of random and pseudo-random sequences], *Uchenye zapiski UIGU. Ser. Matematika i informatsionnye tekhnologii* [Uchenye zapiski UIGU. Ser. Mathematics and Information Technology. UIGU. Electron. Magazine], 2017, No. 1, pp. 22-28.
14. NIST Statistical Test Suite. Available at: http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/mg/documentation_software.html (accessed 05 November 2022).
15. *Rukhin A. and others.* A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. NIST Special Publication 800-22 (with revisions dated May 15, 2001) NIST Statistical Test Suite. Available at: http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/mg/documentation_software.html (accessed 05 November 2022).
16. R 50.1.033–2001. Rekomendatsii po standartizatsii. Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytnogo raspredeleniya s teoreticheskim. Ch. I. Kriterii tipa khi-kvadrat [R 50.1.033–2001. Recommendations for standardization. Applied Statistics. Rules for checking the agreement between the experimental distribution and the theoretical one. Part I. Chi-square tests]. Moscow: Izd-vo standartov. 2002, 87 p.
17. *Ryabko B.Ya., Pestunov A.I.* "Stopka knig" kak novyy statisticheskiy test dlya sluchaynykh chisel ["Pack of books" as a new statistical test for random numbers], *Problemy peredachi informatsii* [Problems. transfer of information], 2004, Vol. 40, Issue 1, pp. 73-78.
18. *Pestunov A.I.* Teoreticheskoye issledovaniye svoystv statisticheskogo testa "stopka knig" [Theoretical study of the properties of the "stack of books" statistical test], *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational technologies], 2006, Vol. 11, No. 6, pp. 96-103.
19. *Minenko A.I.* Eksperimental'noye issledovaniye effektivnosti testov dlya proverki generatorov sluchaynykh chisel [Experimental study of the effectiveness of tests for testing random number generators], *Vestnik SibGUT* [Vestnik SibSUTI], 2010, No. 4, pp. 36-46.
20. *Ryabko B., Monarev V.* Using information theory approach for randomness testing, *J. of Statistical Planning and Reference*, 2005, Vol. 133, No. 1, pp. 95-110.
21. *Ryabko B., Stognienko V., Shokin Yu.* A new test for randomness and its application to some cryptographic problems, *J. of Statistical Planning and Reference*, 2004, Vol. 123, No. 2, pp. 365-376.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.Е. Сергеев.

Драгныш Николай Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: dragnysh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79085110461; кафедра ИАСБ; к.т.н.; доцент.

Dragnysh Nikolay Vasilievich – Southern Federal University; e-mail: dragnysh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79085110461; the department IASB; cand. of eng. sc.; associate professor.

Раздел II. Моделирование процессов и систем

УДК 0004.912

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-106-116

Е. М. Герасименко, В.В. Стеценко

АНАЛИЗ ТОНАЛЬНОСТИ ТЕКСТОВЫХ ОТЗЫВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОНАЛЬНЫХ СЛОВАРЕЙ И КАРДИНАЛЬНОСТИ НЕЧЕТКОГО МНОЖЕСТВА

Анализ тональности или мнений направлен на определение полярности мнения людей в отношении к какому-либо продукту, услуге, мероприятию или любому человеку. Один из самых распространенных методов, применяемый при анализе тональности текстового контента – обработка естественного языка. Тональность текста на естественном языке может быть оценена с помощью многочисленных методологий, таких как алгоритмы машинного обучения и статистические инструменты, в то время как применение нечеткой логики не является распространенным явлением. Использование нечеткой логики было выбрано по следующим причинам. Во-первых, нечеткая логика хорошо справляется с лингвистической неопределенностью. Такой способ определения проблемы приводит к уменьшению предвзятости как с положительной, так и с отрицательной стороны. Во-вторых, подходы к обучению на основе нечетких правил коренным образом отличаются от тех подходов к обучению, которые широко используются при классификации настроений, таких как метод опорных векторов, метод наивного Байеса и т. д., так как относятся к генеративному обучению, т. е. целью обучения является оценка степени принадлежности экземпляра к каждому отдельному классу. Предлагаемая модель для анализа тональности текстовых обзоров основана на использовании тональных словарей с применением нечеткой логики и состоит из четырех основных этапов. Этапы включают в себя токенизацию, формулировку модели мешка слов, формулировку нечеткой оценки тональности и присвоение полярности. В предложенной модели используется мощность нечеткого множества как мера оценки показателей полярности слов. Значения полярности слов получены путем применения двух тональных словарей: SentiWordNet и AFINN. Созданы две версии модели в зависимости от типа используемого словаря: на основе SentiWordNet и AFINN. Сравнение представленного подхода на основе нечеткой логики с другими методами на основе словарей демонстрирует превосходство разработанных моделей, основанных на применении нечеткой логики.

Анализ тональности; обработка естественного языка; нечеткая логика; оценка тональности; SentiWordNet; AFINN.

E.M. Gerasimenko, V.V. Stetsenko

SENTIMENT ANALYSIS OF TEXT REVIEWS USING TONE DICTIONARIES AND FUZZY SET CARDINALITY

Sentiment or opinion analysis aims to determine the polarity of people's opinions in relation to any product, service, event or any person. One of the most common methods used in sentiment analysis of text content is natural language processing. Sentiment analysis of natural language text can be assessed using numerous methodologies such as machine learning algorithms and statistical tools, while the application of fuzzy logic is not common. The use of fuzzy logic was chosen for the following reasons. First, fuzzy logic handles linguistic uncertainty well. This way of defining the problem leads to a reduction in bias, both positively and negatively. Secondly, learn-

ing approaches based on fuzzy rules are fundamentally different from those learning approaches that are widely used in sentiment classification, such as support vector machines, naive Bayes, etc., as they relate to generative learning, i.e. the goal of learning is to assess the degree to which an instance belongs to each individual class. The proposed model for sentiment analysis of text reviews is based on the use of tone lexicons using fuzzy logic and consists of four main stages. The steps include tokenization, word bag model formulation, sentiment fuzzy score formulation, and polarity assignment. In the proposed model, the power of the fuzzy set is used as a measure of the evaluation of the indicators of the polarity of words. Word polarity values are obtained by applying two sentiment lexicons: SentiWordNet and AFINN. Two versions of the model were created depending on the type of vocabulary used: based on SentiWordNet and AFINN. Comparison of the presented approach based on fuzzy logic with other dictionary-based methods demonstrates the superiority of the developed models based on the application of fuzzy logic.

Sentiment analysis; NLP; fuzzy logic; sentiment score; SentiWordNet; AFINN.

Введение. Анализ тональности – это интерпретация и изучение мнения, отношения и эмоции людей по отношению к какой-либо сущности. Сущность может быть представлена отдельными лицами, событиями или темами. Это способ анализа письменной или устной речи, чтобы определить, является ли сказанное благоприятным, неблагоприятным или нейтральным, и в какой степени. В настоящее время применение анализа тональности востребовано в таких областях как: маркетинг, электронная коммерция, фильмы [1], новости [2], политика [3–5], отели [6–8], рестораны, социальные сети [9] и т.д. Интернет стал неотъемлемой частью современной жизни. Цифровая вселенная на начало 2020 г., по оценкам, состояла из 44 зеттабайт данных. В 2019 г. Google обработал 3,7 миллионов запросов, в Facebook (организация, деятельность которой запрещена на территории РФ) был осуществлен миллион входов в систему, и YouTube зафиксировал 4,5 миллионов видео, просматриваемых каждые 60 секунд. Количество интернет-пользователей выросло с 3,7 миллиардов в 2018 году до 4,9 миллиардов в 2021 году. Объем производства данных высок, они создаются каждую минуту интернет-приложениями, такими как электронная почта, Google-приложения, WhatsApp, музыкальными приложениями и т.д., а также соцсетями. Это огромное количество данных может быть использовано в качестве входных данных для осуществления анализа тональности с целью прогнозирования, маркетинга, всевозможных исследований, интеллектуального анализа данных и многого другого. В маркетинге необходимо анализировать мышление клиентов. Что именно клиенты хотят от продукта или услуги может быть проанализировано путем проведения опроса или путем сбора отзывов о товаре или услуге [10]. Области применения анализа тональности показаны на рис. 1.



Рис. 1. Сферы применения анализа тональности

Интернет и социальные сети являются неиссякаемым источником информации, выраженной в форме отзывов (обзоров). Все эти отзывы (обзоры) могут быть использованы в качестве входных данных в процессе извлечения мнений, выходом же будет являться тональность: положительная либо отрицательная, если речь идет о бинарной классификации мнений. Общественные настроения по любому социальному вопросу также могут легко анализироваться с помощью применения методов анализа тональности. Основные этапы процесса тонального анализа включают в себя: сбор данных (ввод), подготовку текста (предварительная обработка), извлечение признаков, выбор признаков, обнаружение мнений, классификацию мнений и представление результатов. Анализ тональности можно проводить с помощью естественной обработки языка (NLP). Исследователи используют NLP для сбора информации и знаний о том, как люди понимают и используют язык, для разработки модели, инструментов и методов, применяемых при анализе тональности. Большая часть данных, используемых при анализе тональности, связана с реальными проблемами. Эти проблемы сложны, поэтому они требуют умной и интеллектуальной системы для интеграции знаний, методов и методик из разных источников. Предполагается, что данные системы будут обладать такой мощностью, что смогут имитировать процесс человеческого мышления и будут являться экспертами в определенной области; адаптироваться и учиться самосовершенствоваться в постоянно меняющейся среде. Для решения реальных проблем была создана концепция нечеткости. Нечеткое множество состоит из таких элементов, которые не имеют четких границ [11]. В данной работе нечеткая логика применяется к онлайн-обзорам, чтобы вычислить оценку настроений. Для вычисления оценки тональности слов применялись словари тональности SentiWordNet и AFINN. Данные словари представляют собой лексические ресурсы, содержащие список слов и их оценку полярности.

Обзор источников. Анализ тональности является одной из самых молодых и перспективных областей исследования. Самый простой способ определить настроение – классифицировать его как положительное либо же отрицательное. В [10] процесс анализа тональности классифицируется по пяти признакам. Прежде всего, он может быть разделен по уровням: уровень документа, уровень предложения и уровень аспекта. Второй способ – это полярность настроений. Существует несколько типов классификации: бинарный подход, многоуровневый подход и контекстный или нечеткий подход. В [12] пользователи мобильных телефонов высказывают свое мнение о мобильных телефонах на основе их функций. Есть множество функций, но только те характеристики, которые имеют решающее значение и необходимы для выполнения мобильным телефон своих функций, выбраны для определения настроений. В статье [13] обсуждались общие перспективы, связанные с анализом тональности, в основе которых лежит анализ текста и эмоций. Количество веб-сайтов и блогов с отзывами об отелях постоянно увеличивается. Данные обзоры с этих веб-сайтов и блогов помогают людям определиться с выбором при планировании своего следующего отпуска. В ряде исследований предлагались различные подходы к вычислению тональности отзывов и рейтингов [14] об отелях. В работе [15] были проанализированы реакция и отношение людей, выраженные в сети интернет во время естественного бедствия (наводнение в Керале) с использованием Наивного Байесовского классификатора. В [16–17] авторы исследовали влияние демонетизации на мировом и индийском финансовом рынках. Общественное мнение о демонетизации было собрано из твитов по всей стране.

Постановка задачи. В основе многих подходов к анализу тональности лежат такие классификаторы, такие как наивный Байес (Naïve Bayes), метод опорных векторов (SVM) и Максимальная энтропия. Но мало кто использует классификато-

ры на основе нечетких множеств. Важность нечеткости вступает в игру при работе с естественным языком из-за наличия двусмысленности в языке. Понятие нечетких множеств было сформулировано Лотфи Заде. Нечеткие множества могут быть применены к определению степени того насколько положительным или отрицательным является слово при помощи нечетких членств для оценки настроений. В [18] предложенная модель для определения тональности показывает, что не все положительные или отрицательные слова можно рассматривать как равные, поскольку некоторые слова имеют более положительную или отрицательную окраску по сравнению с другими словами. Концепция нечеткости помогает справляться с реальными проблемами. Анализ тональности был применен к обзорам продуктов, чтобы классифицировать их как положительные, отрицательные или нейтральные с помощью нечеткой модели. В [19] системы на основе нечетких правил при осуществлении анализа тональности показали лучшие результаты, чем обычно используемые Наивный байесовский алгоритм, деревья решений и SVM. Задача этих систем состоит в том, чтобы определить значение степени классификации полярности. Существуют и системы, основанные на нечеткой логике, для классификации настроений онлайн-обзоров с использованием систем нечеткого вывода на основе правил. Методы машинного обучения [20–21] и методы глубокого обучения наряду с нечетким подходом в текстовых обзорах показали хорошие результаты. В отдельных работах нечеткая энтропия и кластеризация k-средних были применены для выделения краткого списка важных слов из обзоров с высоким коэффициентом полярности. Нечеткие оценки этих слов, включенных в короткий список, вычислялись с использованием словаря SentiWordNet; далее полученные результаты отправлялись в нейронную сеть LSTM для классификации тональности. А в предыдущей работе авторов данной работы применялся метод обучения с учителем – SVM для набора данных, состоящего из видеобзоров, размещенных в социальных сетях. В этом методе применялось сочетание акустических и лингвистических особенностей для классификации настроений в мультимодальном анализе тональности.

В Интернете содержатся миллионы онлайн-обзоров на различные темы, события, продукты или услуги. Эти обзоры были проанализированы многочисленными исследователями с применением методов тонального анализа, но они не смогли получить достоверные результаты для неопределенных или неоднозначных данных, присутствующих в языке. Анализ тональности – это процесс определения и вычисления мнений, установок, чувств, выраженных людьми на естественном языке. Слова – это основной строительный блок языка. Каждый язык устный или письменный состоит из слов. Подход к анализу тональности на уровне слов в NLP является первым шагом к пониманию естественного языка. Компьютер должен понимать, как вещи работают в реальном мире, но эта попытка, хоть и очень прогрессивная, имеет ограничение. Существует пробел в интеллекте между человеком и машиной. Нечеткую логику можно использовать чтобы машина смогла восполнить этот пробел лучшим образом, потому что она имеет дело с неопределенностью, расплывчатостью и факторами неточности, присутствующими в языке.

Таким образом, это побудило нас включить нечеткую логику в модель анализа тональности, чтобы добиться лучших результатов при классификации. В данной статье мы применили подход на основе нечеткой логики для определения и классификации настроений в отзывах на уровне слов. Большинство существующих работ в области тонального анализа используют алгоритмы обучения с учителем. Мы применили подход без учителя, потому что в отличие от обучения с учителем, в процессе обучения без учителя нет необходимости в заранее размеченных данных, однако, длительность обучения и вычислительные сложности при таком подходе также присутствуют. В следующем разделе описывается предлагаемая методология.

Предлагаемая модель. В основе предлагаемой модели для анализа тональности текстовых обзоров лежит применение тональных словарей, но для расчета итогового результата мы применили кардинальность нечеткого множества, что, как показали результаты экспериментов, позволило повысить точность определения тональности. Модель состоит из четырех основных этапов. Этапы включают в себя токенизацию, формулировку модели мешка слов, формулировку нечеткой оценки тональности и присвоение полярности. Созданы две версии модели в зависимости от типа используемого словаря: на основе SentiWordNet и AFINN. Ниже приводится описание шагов.

1. Токенизация и лемматизация.

Отзывы содержатся в документе. Для работы с документами необходимо сначала разбить текст документа на отдельные предложения. Разделение абзацев на предложения называется токенизацией предложений. Токенизация предложения – это процесс разбиения предложения на список слов (токенов). Вывод процесса токенизации хранится в динамическом списке. Каждое слово предложения подвергается процессу лемматизации.

2. Мешок слов.

Термин «мешок слов» в анализе тональности относится к тем ключевым словам, которые важны при извлечении отзывов, мнений и т.д. Технически, это модель, которая преобразует документ в векторную (числовую) форму, где каждому слову в документе присваивается некоторая оценка в диапазоне от 0 до 1. Данный процесс можно интерпретировать как нечеткую принадлежность к нечетким множествам Pos и Neg. В предложенной модели использован также NLTK Part of Speech (POS) Tagger для извлечения слов, которые являются существительными, прилагательными, глаголами или наречиями. Нечеткое множество A можно представить в виде $A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U\}$, где x — элемент из универсального множества и μ_A является принадлежностью элемента x . Нечеткие множества Pos и Neg представлены в виде:

$$Pos = \{(a, \mu_{Pos}(a)), a \in X_i\}. \quad (1)$$

$$Neg = \{(a, \mu_{Neg}(a)), a \in X_i\}, \quad (2)$$

где a – слово, X_i – i -й набор мешка слов. Если общее количество отзывов равно n ; тогда для каждого отзыва создается мешок слов. Переименуем функции множества μ_{Pos} и μ_{Neg} в μ_{swnPos} и μ_{swnNeg} для вычисления при использовании словаря тональности SentiWordNet и в μ_{afPos} и μ_{afNeg} при использовании словаря AFINN

$$\mu_{swnPos}(a) = \frac{\sum_{synsets} [syn.pos_score()]}{length(synsets)}. \quad (3)$$

$$\mu_{swnNeg}(a) = \frac{\sum_{synsets} [syn.neg_score()]}{length(synsets)}. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) представляют собой нечеткие функции принадлежности слова для словаря SentiWordNet, где $syn.pos_score()$ и $syn.neg_score()$ – это баллы, полученные из SentiWordNet; $synsets$ – это набор синонимов каждого слова, присутствующего в SentiWordNet.

Второй вариант предполагает использование словаря AFINN. В уравнении (5) вычисляется оценка μ_{af} каждого слова с использованием AFINN и делится на пять, потому что оценка по AFINN находится в диапазоне между -5 и +5. Если полученное в результате число больше или равно нулю – это положительная оценка – μ_{afPos} , в противном случае – это отрицательная оценка – μ_{afNeg} .

$$\mu af(a) = \frac{af.score(a)}{5} \quad (5)$$

В уравнениях (6) и (7) представлены вычисления нечетких функций принадлежности слова для словаря AFINN.

$$if(\mu af(a) \geq 0) then(\mu afPos(a) = \mu af(a)). \quad (6)$$

$$if(\mu af(a) < 0) then(\mu afNeg(a) = -\mu af(a)). \quad (7)$$

3. Мощность (кардинальность) нечеткого множества.

Мы использовали мощность нечеткого множества для оценки тональности каждого отзыва. Нечеткие множества Pos и Neg содержат положительные и отрицательные оценки слова в отзыве. Положительная мощность множества Pos и отрицательная мощность множества Neg вычисляется путем суммирования всех элементов в соответствующих наборах. Эта мера показывает мощность нечеткого множества. Ниже приведены формулы для расчета положительной и отрицательной кардинальности:

$$Pos_cardinality = \sum_{j=1}^l \mu Pos(a), a \in X_i. \quad (8)$$

$$Neg_cardinality = \sum_{j=1}^l \mu Neg(a), a \in X_i. \quad (9)$$

где l – длина отзыва, a – слово, X – множество мешка слов, принадлежащее i – мешку слов.

4. Присвоение полярности.

Бинарная классификация полярности отзывов предполагает разделение их на «положительные» и «отрицательные». Функции принадлежности μPos и μNeg являются мощностями множества (уравнения (8) и (9)) и вычисляются для определения общей полярности каждого текстового обзора. Если количество положительных отзывов больше или равно количеству отрицательных, это означает, что отзыв положительный, в противном случае, это отрицательный отзыв.

$$Polarity(i) = \begin{cases} P, & Pos_Cardinality \geq Neg_Cardinality \\ N, & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

где, $Polarity(i)$ – это полярность i -го обзора, а P и N – метки для положительной и отрицательной полярности.

Таким образом, с помощью приведенного выше сравнения все обзоры делятся на два класса: Положительные (P) и Отрицательные (N). Технологический процесс предлагаемого нечеткого подхода изображен на рис. 2.



Рис. 2. Технологический процесс предлагаемого подхода

Экспериментальные данные. Предлагаемая модель для определения тональности текстовых отзывов, основанная на тональных словарях с применением нечеткой логики была реализована на языке Python. Эксперименты проводились на трех наборах данных, которые содержат онлайн-обзоры пользователей. Два набора данных включают в себя отзывы на фильмы: набор данных v2.0 от Pang-Lee [22] и IMDB. Третий набор данных содержит обзоры отеля. Эти отзывы были предоставлены путешественниками, которые останавливались в этом отеле. Все наборы данных находятся в свободном доступе в сети Интернет. Первый набор данных содержит 2000 отзывов, набор данных с IMDB содержит 50 000 отзывов, а набор данных отзывов об отеле – 38 932. Распределение всех наборов данных в соответствии с каждым классом тональности представлен в табл. 1.

Таблица 1

Распределение отзывов по классам тональности

Набор данных	Положительные	Отрицательные	Всего
Pang-Lee Movie	1000	1000	2000
IMDB Movie	25000	25000	50000
Hotel Reviews	26521	12411	38932

В данной работе применены два тональных словаря: SentiWordNet и AFINN для вычисления полярности слов. В табл. 2 показаны положительные и отрицательные оценки некоторых слов, с применением словаря SentiWordNet. Положительные слова имеют положительную оценку выше, чем отрицательную оценку, и наоборот для отрицательных слов. Есть слова, которые имеют нулевую оценку – это нейтральные слова, не содержащие эмоций, например, «Hotel» и «Staff». «Nice», «Helpful», «Clean» и «Beautiful» – положительные слова, в то время как «Filthy», «Difficult», «Disgusting» и «Accident» - отрицательные слова.

Таблица 2

Оценки слов тонального словаря SentiWordNet

Слово	Pos оценка	Neg оценка
Hotel	0.0	0.0
Staff	0.0	0.0
Nice	0.15	0.0
Helpful	0.25	0.0
Clean	0.0278	0.0
Beautiful	0.3125	0.0
Filthy	0.0417	0.25
Difficult	0.0	0.3125
Disgusting	0.0625	0.3125
Accident	0.0	0.125

Таблица 3

Оценки слов тонального словаря AFINN

Слово	Оценка	Оценка/5	Pos оценка	Neg оценка
Hotel	0.0	0.0	0.0	-
Staff	0.0	0.0	0.0	-
Nice	3.0	0.6	0.6	-

Окончание табл. 3

Слово	Оценка	Оценка/5	Pos оценка	Neg оценка
Helpful	2.0	0.4	0.4	-
Clean	2.0	0.4	0.4	-
Beautiful	3.0	0.6	0.6	-
Filthy	-2.0	-0.4	-	0.4
Difficult	-1.0	-0.2	-	0.2
Disgusting	-3.0	-0.6	-	0.6
Accident	-2.0	-0.4	-	0.4

В табл. 3 представлены результаты вычислений для этих же слов с применением словаря AFINN. Слова «Hotel» и «Staff» нейтральные в обоих словарях. Поскольку оценка «Nice», «Helpful», «Clean» и «Beautiful» больше нуля, полярность положительная. В то время как слова «Filthy», «Difficult», «Disgusting» и «Accident» – отрицательные слова, потому что их показатели меньше нуля. Положительные и отрицательные слова имеют разные оценки в обоих словарях, например, слово «Nice» имеет 0.15 положительного балла и 0 отрицательных баллов в SentiWordNet, в то время как в AFINN оно имеет 3.0 балла. Следовательно, оба словаря можно интерпретировать по-разному для вычисления полярности и оценки слов.

Мы сравнили наши две версии нечеткого подхода с другими двумя подходами на основе словарей. Первое сравнение с методом, разработанным Кавальканти и др. [23], где оценка тональности каждого отзыва рассчитывалась путем суммирования оценок тональности каждого слова и деления итоговой суммы на длину каждого обзора l как показано в уравнении (11).

$$score(Xi) = \frac{\sum_{a \in Xi} [\mu Pos(a) - \mu Neg(a)]}{l}, a \in Xi. \quad (11)$$

Здесь оценка каждого слова – это разница между положительной и отрицательной оценкой каждого слова, рассчитанная с использованием словаря тональности SentiWordNet, как указано в уравнениях (3) и (4).

В подходе Кавальканти и др., баллы больше или равные нулю обозначают положительное оценку (P) и отрицательные баллы обозначают негативное оценку (N).

Второе сравнение с методом Гилберта и др. [24], где применялся словарь VADER. Этот метод вычисляет различные оценки для данного входного текстового предложения. Диапазон составного балла проверяется на разные классы полярности: положительный и отрицательный.

Интерпретация результатов. В данной статье был представлен подход к анализу тональности текстовых обзоров на основе тональных словарей с применением нечеткой логики. Реализовано две версии модели с нечеткой кардинальностью: на основе оценок, полученных с помощью тональных словарей SentiWordNet и AFINN. Эти версии сравниваются с двумя подходами, описанными в статьях Кавальканти и др. и Гилберт и др. Все эксперименты проводились на трех наборах данных, состоящих из онлайн-обзоров. Сравнение наших версии версии нечеткого множества с другими методами с точки зрения точности представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение двух версий представленного подхода с другими методами

Набор данных	Accuracy			
	Метод Кавальканти и др. на основе словаря SentiWordNet	Метод Гилберта и др. на основе словаря VADER	Нечеткий метод на основе словаря SentiWordNet	Нечеткий метод на основе словаря AFINN
Pang-Lee	54,8%	63%	63,5%	65,45%
IMDB	52,87%	69,43%	64,13%	70,06%
Hotel Reviews	64,54%	76,1%	72,74%	76,2%

Эксперименты с наборами данных фильмов Pang-Lee показывают, что наша версия на основе словаря AFINN и нечеткой кардинальности достигла наивысшей точности в 65,45%, за ней следует версия на основе SentiWordNet 63,5%; практически такую же точность в 63% показал подход Гилберта и др., а подход Кавальканти и др. имеет наименьшую точность – 54,8%. Для набора данных фильмов IMDB наша версия модели нечеткой кардинальности на основе AFINN достигла наивысшей точности в 70,06%, а подход Гилберта и др. достиг второй по величине точности в 69,43%. Версия на основе AFINN продемонстрировала также максимальную точность 76,2% в наборе данных отзывов об отелях, что сопоставимо с подходом Гилберта и др. Наша версия SentiWordNet с нечеткой кардинальностью показала более высокую точность по сравнению с подходом Кавальканти и др. во всех наборах данных. Из результатов в табл. 4 мы можем сделать вывод, что наш нечеткий подход, основанный на словаре AFINN, показал самую высокую точность во всех наборах данных, подход Кавальканти и др. показал самую низкую точность во всех наборах данных. Результаты подхода Гилберта и др. сопоставимы с нашими версиями нечеткой кардинальности на основе AFINN.

Заключение. В данной исследовательской работе представлена модель анализа тональности, основанная на нечеткой логике и тональных словарях, примененная к онлайн-обзорам для вычисления их тональности. Для вычисления оценки тональности слов использовались два тональных словаря – SentiWordNet и AFINN. Основные моменты:

- 1) предложен подход к определению тональности текстовых обзоров без учителя на основе тональных словарей с применением нечеткой логики,
- 2) предлагаемая модель использует нечеткую кардинальность в качестве меры для оценки показателей полярности слов,
- 3) модель имеет две версии: на основе словаря SentiWordNet и AFINN,
- 4) сравнение предложенной модели с применением нечеткой кардинальности по сравнению с обычными современными методами.

Предложенная в данной статье модель анализа тональности на основе тональных словарей с применением мощности нечеткого множества превосходит стандартные методы на основе словарей. Наш подход рассчитывает мощность средних положительных и отрицательных оценок каждого слова в каждом обзоре в виде нечетких оценок. Таким образом, кардинальность нечетких множеств дает лучшие результаты, чем простые средние баллы. Применение нечеткой логики с НЛП позволяет нам получить результаты, которые соответствуют человеческой

интерпретации для анализа настроений. Наш подход применим к любому текстовому набору данных, однако, ограничение применения предложенной модели заключается в том, что количество слов зависит от словаря и некоторые слова, которых нет в словаре, не смогут быть обработаны. В данной работе мы применили анализ тональности с использованием нечеткой логики на уровне слов, можно усовершенствовать модель, применив анализ тональности на уровне предложений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bhoir P., Kolte S. Sentiment analysis of movie reviews using lexicon approach, *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICICIR)*, 2015, pp. 1-6.
2. Li X., Xie H., Chen L., Wang J., and Deng X. News impact on stock price return via sentiment analysis, *Knowledge-Base Systems*, 2014, Vol. 69, pp. 14- 23.
3. Bose R., Dey R.K., Roy S., Sarddar D. Analyzing Political Sentiment Using Twitter Data, *Information and Communication Technology for Intelligent Systems*. Springer, Singapore, 2019, pp. 427-436.
4. Dundar B., Ozdemir S., Akay D. Opinion mining and fuzzy quantification in hotel reviews, *2016 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, 2016, pp. 1-4.
5. Park E., Kang J., Choi D., Han J. Understanding customers' hotel revisiting behaviour: a sentiment analysis of online feedback reviews, *Current Issues in Tourism*, 2020, Vol. 23, No. 5, pp. 605-611.
6. Mostafa L. Machine Learning-Based Sentiment Analysis for Analyzing the Travelers Reviews on Egyptian Hotels, *Joint European-US Workshop on Applications of Invariance in Computer Vision*, Springer, Cham, 2020, pp. 405-413.
7. Vashishtha S., Susan S. Fuzzy logic based dynamic plotting of mood swings from tweets, *International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications*. Springer, Cham, 2018, pp. 129-139.
8. Shivaprasad T.K., Shetty J. Sentiment analysis of product reviews: a review, *International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, 2017, pp. 298-301.
9. Liu Y., Bi J.W., Fan Z. P. Ranking products through online reviews: A method based on sentiment analysis technique and intuitionistic fuzzy set theory, *Information Fusion*, 2017, Vol. 36, pp. 149-161.
10. Indhuja K., Reghu RPC. Fuzzy logic based sentiment analysis of product review documents, *2014 First International Conference on Computational Systems and Communications (ICCSC)*, 2014, pp. 18-22.
11. Zadeh L.A. Calculus of Fuzzy Restrictions. Fuzzy Sets and their Applications to cognitive and decision processes, 1975, pp. 1-40.
12. Singh W. Sentiment analysis of online mobile reviews, *2017 International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, 2017, pp. 20-25.
13. Yadav P., Pandya D. SentiReview: Sentiment analysis based on text and emoticons, *International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, 2017, pp. 467-472.
14. Songpan W. The analysis and prediction of customer review rating using opinion mining, *15th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA)*, 2017, pp. 71-77.
15. Dudani A., Srividya V., Sneha B., Tripathy B. K. Sentiment Analysis on Kerala Floods, *International Conference on Innovative Computing and Communications*, Springer, Singapore, 2020, pp. 107-124.
16. Singh P., Sawhney R.S., Kahlon K.S. Sentiment analysis of demonetization of 500 & 1000 rupee banknotes by Indian government. *ICT Express*, 2018, Vol. 4, No. 3, pp. 124-129.
17. Kumar A., Singh J.P. Demonetization in India: Good or Bad in Context of Social Media. – 2019.
18. Jusoh S., Alfaware H. M. Applying fuzzy sets for opinion mining, *International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT)*, 2013, pp. 1-5.

19. Alharbi J.R., Alhalabi W.S. Hybrid Approach for Sentiment Analysis of Twitter Posts Using a Dictionary-based Approach and Fuzzy Logic Methods: Study Case on Cloud Service Providers, *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*, 2020, Vol. 16, No. 1, pp. 116-145.
20. Phan H.T., Nguyen N.T., Cuong T.V., Hwang D. A Method for Detecting and Analyzing the Sentiment of Tweets Containing Fuzzy Sentiment Phrases, *2019 IEEE International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, 2019, pp. 1-6.
21. Phan H.T., Tran V.C., Nguyen N.T., Hwang D. Improving the performance of sentiment analysis of tweets containing fuzzy sentiment using the feature ensemble model, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 14630-14641.
22. Pang B., Lee L. A sentimental education: Sentiment analysis using subjectivity summarization based on minimum cuts, *Proceedings of the 42nd annual meeting on Association for Computational Linguistics*, 2004, pp. 271.
23. Cavalcanti D. C., Ricardo B.C .Prudêncio, Shreyasee S. Pradhan, Jatin Y. Shah, Ricardo S. Pietrobon. Good to be bad? Distinguishing between positive and negative citations in scientific impact, *2011 IEEE 23rd International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 2011, pp. 156-162.
24. Hutto C. J., Gilbert E. Vader: A parsimonious rule-based model for sentiment analysis of social media text, *Eighth international AAAI conference on weblogs and social media*. – 2014.

Статью рекомендовала 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; к.т.н.; доцент.

Стеценко Валентина Витальевна – e-mail: vstecenko@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Gerasimenko Evgeniya Michailovna – Southern Federal University; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone +78634371651; the department of computer aided design; cand. of eng.sc.; associate professor.

Stetsenko Valentina Vitalievna – e-mail: vstecenko@sfedu.ru; the department of computer aided design, postgraduate.

УДК 519.712.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-116-128

А.Э. Саак, Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ЗАЯВОК*

Рассматривается задача диспетчеризации. Рассмотрена парадигма организации распределенных вычислений на основе Grid-компьютинга. Приведена классификация систем диспетчеризации задач. Описаны различные подходы к решению задачи диспетчеризации. Приведена модель задачи обслуживания заявок на основе принципов теории систем массового обслуживания. Сформулирована постановка задачи на основе Grid-диспетчеризации. Предложено понятие ресурсного прямоугольника. Определена среда диспетчеризации ресурсных прямоугольников. Предложена модель позволяющая формализовать заявку пользователя на обслуживание понятием ресурсного (незвклидова) прямоугольника. Вместо принципа оптимизации на основе машинного поиска лучшего распределения массива ресурсных прямоугольников, предложен эвристический принцип, что позволило снизить объем необходимых вычислений. Предложенный эвристический алгоритм диспетчеризации позволяет учитывать свойства массива и выполнять оценку качества решений. Построены модели среды спроса в фор-

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00148.

ме единичных кубических граней. Модель кубических граней обобщена на эксперимент кубических слоев. Приведено описание используемой модели спроса. Построена модель среды предложений ресурсов в форме канонической пирамиды и введено понятие канонического эксперимента спроса-предложения на модельные однородные ресурсные элементы. Введено усечение эксперимента спроса-предложения. Предложена гибридная модель на основе сочетания эволюционных принципов поиска и методов нечеткого управления. Для решения задач диспетчеризации предложено использовать эволюционные алгоритмы. Разработана модифицированная методика кодирования решений и новые модификации генетических операторов для решения задач диспетчеризации. Представлена структурная схема алгоритма решения рассматриваемой задачи с учетом использования нечеткого логического контроллера. Выполнено компьютерное моделирование и приведены результаты вычислительных экспериментов. Выявлены особенности предложенного метода, сформулированы его достоинства и недостатки.

Диспетчирование очередей заявок; системы массового обслуживания; эволюционный поиск; нечеткое управление; Grid-компьютинг.

A.E. Saak, L.A. Gladkov, N.V. Gladkova

INTEGRATED MODEL FOR SOLVING THE PROBLEM OF REQUEST DISPATCHING

The paper considers the problem of scheduling. The paradigm of organization of distributed computing based on Grid-computing is considered. The classification of task scheduling systems is given. Various approaches to solving the scheduling problem are described. A model of the task of servicing applications based on the principles of the theory of queuing systems is presented. The task statement is formulated on the basis of Grid-scheduling. The concept of a resource rectangle is proposed. The environment for scheduling resource rectangles is defined. A model is proposed that allows formalizing the user's request for service by the concept of a resource (non-Euclidean) rectangle. Instead of the principle of optimization based on the machine search for the best distribution of the array of resource rectangles, a heuristic principle was proposed, which made it possible to reduce the amount of necessary calculations. The proposed heuristic scheduling algorithm makes it possible to take into account the properties of the array and evaluate the quality of solutions. Models of the demand environment in the form of single cubic faces are constructed. The model of cubic faces is generalized to the experiment of cubic layers. The description of the demand model used is given. A model of the resource supply environment in the form of a canonical pyramid is constructed and the concept of a canonical demand-supply experiment for model homogeneous resource elements is introduced. A truncation of the supply-demand experiment has been introduced. A hybrid model based on a combination of evolutionary search principles and fuzzy control methods is proposed. To solve scheduling problems, it is proposed to use evolutionary algorithms. A modified solution coding technique and new modifications of genetic operators for solving scheduling problems have been developed. A block diagram of the algorithm for solving the problem under consideration is presented, taking into account the use of a fuzzy logic controller. Computer simulation has been performed and the results of computational experiments have been presented. The features of the proposed method are revealed, its advantages and disadvantages are formulated.

Queue scheduling; queuing systems; evolutionary search; fuzzy control; Grid computing.

Введение. Возрастающие потребности пользователей в вычислительных ресурсах привело сначала к разработке и развитию многопроцессорных систем, кластерных систем, метакомпьютинга, а затем, в конце 90-х годов, к появлению Grid-компьютинга (*Grid computing*) [1]. Grid-компьютинг представляет собой одну из парадигм распределённых вычислений, таких, например, как «облачные вычисления» (*cloud computing*) и «вычислительные джунгли» (*jungle computing*) [2–5]. Эффективность функционирования таких систем во многом определяется правильным распределением вычислительных ресурсов, управлением задачами в условиях множественности. При этом на первый план выходит задача управления (диспет-

чирования) заявками пользователей, для обслуживания которых необходимо задействовать несколько процессоров одновременно. Данная задача может быть частично представлена в терминах теории расписаний, но проблему все же необходимо рассматривать гораздо шире. При выполнении машинного поиска наилучшего распределения оказывается, что трудоёмкость задачи, делает невозможным использование таких методов при управлении ресурсами Grid.

Существующая классификация систем диспетчирования задач (*job scheduling*) [6] и управления ресурсами Grid (*Grid resource management systems*) выделяет три базовые архитектуры: централизованная (*centralized*), иерархическая (*hierarchical*) и распределённая (*decentralized, distributed*), различающиеся способом принятия решения об управлении ресурсами и задачами. При использовании централизованной архитектуры управление осуществляется центральным диспетчером, обладающим всей полнотой информации о вычислительных ресурсах и задачах. В Grid-системах различают два вида диспетчирования по способу объединения вычислительных ресурсов для решения задачи: одно- (*single-site scheduling*) и мультисайтное диспетчирование (*multi-site scheduling*). При односайтном диспетчировании задача выполняется в пределах одного сайта, не выходя за рамки параллельной системы. При мультисайтном диспетчировании задача может выполняться одновременно на нескольких сайтах и, соответственно, вне рамок отдельных параллельных систем.

В настоящее время использование Grid-систем в системах диспетчирования задач и управления ресурсами с централизованной архитектурой, поддерживающей мультисайтное выполнение задач, недостаточно разработано. Поэтому актуальным является разработка моделей на основе эвристических алгоритмов распределения ресурсов, учитывающих свойства массива заявок пользователей, с оценкой качества расписания.

Эвристические алгоритмы диспетчирования планарными ресурсами, активно разрабатывавшиеся в конце прошлого и начале нынешнего века, недостаточно результативны. На сегодняшний момент пока не предложен формальный аппарат среды диспетчирования, который должен позволить выявить закономерности на множестве поступающих заявок, ввести их типизацию и предложить эвристические алгоритмы, адаптированные под соответствующие типы с оценкой качества. Разработка таких алгоритмов является актуальной задачей.

Системы обслуживания играют значительную роль в повседневной жизни. Опыт моделирования разных типов дискретных событийных систем свидетельствует о том, что приблизительно 80% математических моделей используют методы теории массового обслуживания [7–9].

Как показывает практика, подобные задачи могут эффективно решаться с использованием методов эволюционных вычислений. Предлагается использовать гибридный подход, основанный на сочетании различных подходов [10]. Гибридизация позволяет достигать «синергетического эффекта», усиливая достоинства встраиваемых методов [11–13].

Модели систем массового обслуживания. При использовании моделей теории массового обслуживания необходимо задать следующие параметры системы [14, 15]:

1) Параметры входного потока заявок поступающих в систему, например, время поступления и общее число поступивших заявок, количество одновременно приходящих заявок. Кроме того, необходимо определить правила поступления заявок: детерминированное расписание или с определенной вероятностью. Число заявок n в любой интервал времени может быть рассчитано на основе закона Пуассона.

2) Принципы постановки в очередь и выбор заявок. Для организации очереди заявок могут использоваться различные эвристические правила [16]. Например, очередь в порядке поступления заявок или правило «последний поступил – первый обслужился». Возможна также организация очереди по заданным параметрам или случайным образом (RANDOM). Возможно введение ограничений по длине или по времени пребывания в очереди.

3) Правила обслуживания заявок. Правила обслуживания могут различаться по времени обслуживания и числу одновременно обслуживаемых заявок. Они определяют условия прекращения обслуживания, выбор заявки для обслуживания и т.д. При этом мы можем оперировать абсолютными или относительными величинами приоритетов. Возможно также задание величины регулирующей глубину прерывания.

4) Параметры выходного потока требований. Структура выходного потока важна для многофазных систем. Распределение заявок по времени в выходном потоке зависит от плотности входного потока и характеристик работы устройств обслуживания.

5) Определение режимов работы. Выбор возможных вариантов режимов работы и условий для их изменения, например, в результате внешнего воздействия или изменения условий работы оборудования, а также возможность блокировки системы при наступлении заданных условий.

Для любых систем массового обслуживания справедлив, так называемый, закон Литтла: при любом распределении времени обслуживания любых двух заявок, любом числе устройств и любых параметрах обслуживания среднее число заявок N определяется интенсивностью их поступления λ и средним временем пребывания в системе T .

Постановка задачи. Выбор технологии для обработки исходной информации, зависит от особенностей решаемых задач, от числа количественных и качественных параметров, описывающих проблему, от уровня ее проработанности. Поэтому необходимо определить условия применимости каждой из рассматриваемых технологий, а также разработать методы и алгоритмы, позволяющие адаптировать их к решению конкретных задач проблемной области.

В парадигме Grid-диспетчирования можно выделить четыре основных этапа [17]:

- 1) выявление ресурсов (*resource discovery*);
- 2) выбор ресурсов (*resource selection*);
- 3) генерация расписания (*schedule generation*);
- 4) выполнение задачи (*job execution*).

Рассмотрим этап генерации расписания алгоритмом диспетчирования (*scheduling algorithm*). При этом алгоритм диспетчирования определяет способ, которым задачи назначаются на ресурсы, а под расписанием понимается назначение задач на ресурсы в определённые периоды времени.

Задача пользователя может быть представлена прямоугольником, со сторонами равными числу процессоров и времени решения. Составление расписания в таком случае может рассматриваться как задача упаковка прямоугольников в полосу (множество полос) с соблюдением условия параллельности сторон прямоугольников соответствующим сторонам полосы, неналожением их друг на друга, отсутствием пересечений сторон полос и минимизацией занятой части полос.

При представлении заявки пользователя для обслуживания Grid-системой введём понятие «ресурсный прямоугольник». Ресурсным прямоугольником назовём фигуру (рис. 1), у которой горизонтальное и вертикальное измерения принимаются равными числу единиц ресурса времени и процессоров, требуемому для обработки заявки, соответственно.

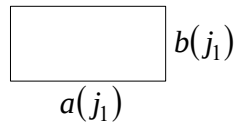


Рис. 1. Ресурсный прямоугольник

Несмотря на визуальное сходство ресурсного прямоугольника с геометрическим, сами они принципиально различаются. Звенья-измерения геометрического прямоугольника имеют размерность единиц длины, одного рода – однородны. В тоже время звенья-измерения ресурсного прямоугольника имеют размерность единиц ресурса одного рода (процессоры) и другого рода (время) – разнородны.

В процессе использования ресурсных прямоугольников могут применяться операции сложения, умножения, дифференцирования и динамического интегрирования, ориентированные на диспетчирование множественного компьютерного обслуживания [18].

Отметим, что наряду со спецификой согласованности, антисогласованности и рассогласованности в поведении измерений ресурсных прямоугольников у трёх квадратичных типизаций есть и важные общие черты. Прежде всего у каждого типа, как будет показано далее, выделяется центральный элемент: максимальный – у кругового; наиболее симметричный – у гиперболического и средний (по высотам, по среднересурсной величине, по протяжённости суммы оснований предшествующих граней и высоты среднего элемента) – у параболического квадратичного типа.

Классический принцип оптимизации состоит в определении решения задач 2SP, 2BP, SP, RP (RPAMP) локальными динамическими переходами из некоторого начального положения массива заявок. Принцип эвристики перераспределения массива заявок в первом ресурсном квадранте состоит в решении задачи локализации на основе программного задания алгоритма диспетчирования протяжённой полиэдрали ресурсных прямоугольников с одновременным контролем качества посредством эвристической меры. Предлагаемые полиномиальные алгоритмы диспетчирования адаптированы под соответствующий квадратичный тип массива заявок.

Таким образом, классической динамической оптимизации распределения планарных ресурсов противопоставляется эвристическая оптимизация на основе программного полиномиального алгоритма локализации первоначального протяжённого массива спроса в ресурсную оболочку с оценкой качества оболочки посредством эвристической меры.

В системе реализуется правило постановки заявок в очередь в порядке их поступления (*FIFO*), а также правило организации очереди с использованием заявок с абсолютным приоритетом. Время обслуживания всех типов заявок любым устройством имеет произвольное распределение. Схема взаимодействия отдельных узлов сети задана полносвязанным графом G . Маршрут прохождения заявок в сети массового обслуживания задается матрицей:

$$P = \|p_{im,i+1}\|,$$

где $p_{im,i+1}$ – Звенья-измерения вероятность того, что заявка класса m , после обслуживания i -м узле, перейдет в узел $i+1$.

Маршрут прохождения заявок каждого типа определяется с учетом необходимости посетить с некоторой вероятностью заданное число устройств, значения вероятностей посещения этих устройств обусловлены типом заявки.

Необходимо решить задачу построения графика работы обслуживающих устройств для заявок различных классов, позволяющего максимально повысить эффективность функционирования сети. При этом необходимо учитывать возможные временные затраты.

Модель спроса. Единичный спрос индивидуального пользователя однородными вычислительными ресурсами рассматривается в форме двоичности $0 \vee 1$ негативного исхода величины заявки $j_1 = 0$ и позитивного, реального, единичного исхода той же величины $j_1 = 1$ с единичными мощностными отсчётами $Y(0) = 1$, $Y(1) = 1$ в каждом значении составности (рис. 2).

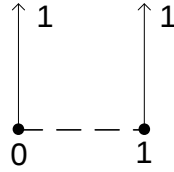


Рис. 2. Единичный спрос однородными вычислительными ресурсами

При комбинировании, умножении данных позитивностей по правилам умножения алгебры случайных событий негативные исходы могут быть опущены. Поэтому, наряду с двоичностью, принимается комбинационная модель единичного ресурсного требования в виде унодного элемента $\delta_{j_1}^{(1)}(j_1')$ и единичного звено-измерения 1-го рода на числовой Z^1 -оси (рис. 3).

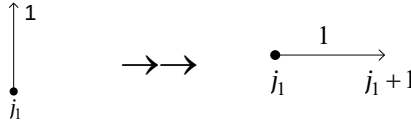


Рис. 3. Унодный элемент и единичное звено-измерение

Используем композицию « k » двоичностей $0 \vee 1$ действием k -кратной круговой первообразной в производящей форме $\sum_{j_1=0}^k C_k^{(j_1)} S_1^{j_1} W_1^0 = (1 + W_1)^k$ на начальный отсчёт W_1^0 гармонического распределения $W_1^{j_1}$. В области распределений переходом $W_1 \rightarrow 1$, получаем символический бином $(1 + 1)^k = \sum_{j_1=0}^k C_k^{(j_1)} \rightarrow \{C_k^{(j_1)}\}_{j_1=0}^k$ и сочетательную функцию, определяющую модельный параллельный спрос « k » пользователей на единичные ресурсы 1-го рода. Данной круговой модели параллельного спроса на единичные ресурсные элементы сопоставляем гиперболическую модель того же спроса в виде действия k -кратной гиперболической первообразной в производящей форме на предыдущее распределение гармонических образцов единичных унодов $\sum_{j_1=0}^k (-1)^{j_1} C_k^{(j_1)} S_1^{j_1} W_1^0 = (1 - W_1)^k$.

Модель предложений ресурсов. Пирамидальное распределение

$$\frac{1^k}{k!}, \frac{2^k}{k!}, \dots, \frac{j_1^k}{k!}, \dots, \frac{k^k}{k!}$$

индуцирует аддитивный базис эксперимента координатных пирамид (рис. 4).

Данная пирамида асимптотически исчерпывается указанным аддитивным базисом координатных пирамид. Множество X образует объемлющая каноническая пирамида в R^k с длиной смежных ребер « k » объема $k^k/k!$, аддитивный базис $\{X_{i'}\}_{i'=1}^k$ даёт распределение координатных пирамид, негативный исход X_0 выражается началом координат. Такова аддитивная форма эксперимента координатных пирамид в R^k .

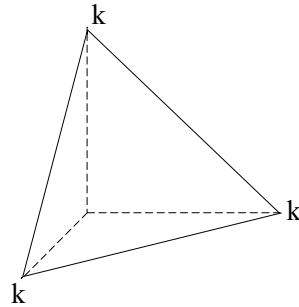


Рис. 4. Координатная пирамида

Модель нечеткого управления. Практика решения различных NP-полных задач оптимизации показывает, что достаточно эффективным инструментом решения подобных задач являются эволюционные алгоритмы. Использование эволюционных алгоритмов традиционно требует решения следующих задач [19, 20]:

- ◆ определение методики кодирования множества возможных решений;
- ◆ подбор управляющих параметров эволюционного алгоритма;
- ◆ выбор и модификация генетических операторов.

Для решения задач обслуживания заявок можно использовать хромосомы фиксированной длины N , состоящие из набора M векторов, каждый i -й вектор представляет собой последовательность обслуживания заявок на данном узле. Гены упорядочены по времени, так что каждый ген жестко привязан к определенному моменту времени. Пример хромосомы показан на рис. 5.

Узел 1	s_{1j}	$t_{1j, j+1}$	s_{1j+1}	...	s_{1N}
Узел 2	s_{2j}	$t_{2j, j+1}$	s_{2j+1}	...	s_{2N}
.....	...	...	...	...	...
Узел i	s_{ij}	$t_{ij, j+1}$	s_{ij+1}	...	s_{iN}
.....	...	...	...	...	...
Узел M	s_{Mj}	$t_{Mj, j+1}$	s_{Mj+1}	...	s_{MN}

Рис. 5. Пример хромосомы

Каждая строка – это последовательность обслуживания заявок различного типа. Например, строка номер 2 задает следующий порядок обслуживания заявок. Сначала обрабатывается заявка j -го класса, затем после переключения устройства, обрабатываются заявки $(j+1)$ -го класса и так далее. Продолжительность переключения между различными классами заявок задается матрицей переключений.

Основными генетическими операторами являются селекция, кроссинговер и мутация. Оператор селекции выполняет в генетическом алгоритме две важные задачи. Во-первых, выбор решений из текущей популяции, к которым будут при-

меняться операторы кроссинговера и мутации. После выполнения всех генетических операторов на текущей итерации алгоритма, образуется новая расширенная популяция. Для дальнейшей работы генетического алгоритма необходимо восстановить исходный размер популяции. Отбор решений из расширенной популяции, которые перейдут в следующее поколение является второй задачей селекции.

Также будем использовать модифицированный одноточечный оператор кроссинговера и модифицированный оператор мутации обмена.

Подбор и управления значениями управляющих параметров алгоритма осуществляется с использованием блока нечеткого управления. Управляющими параметрами в данном случае являются вероятности выполнения генетических операторов [21].

Структурная схема алгоритма решения рассматриваемой задачи с учетом использования нечеткого логического контроллера может быть представлена следующим образом (рис. 6).

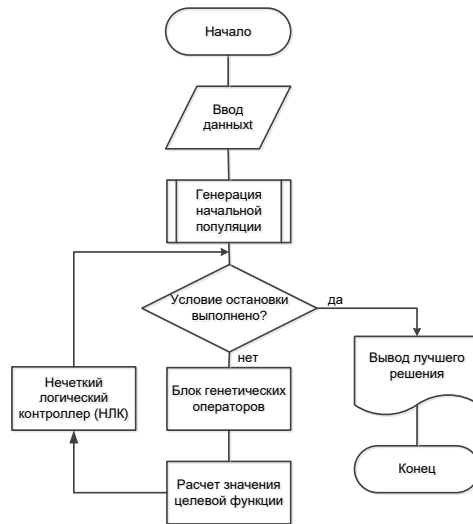


Рис. 6. Структура модели нечеткого управления

Знания, используемые в процессе функционирования модуля нечеткого управления, записываются в виде нечетких правил или нечетких множеств с функцией принадлежности, заданной выражением [22–24]:

$$\mu_{R^{(k)}}(x, y) = \mu_{A^k \rightarrow B^k}(x, y) \cdot$$

Конкретная форма функции принадлежности нечеткого множества зависит от применяемой Т-нормы, определения нечеткой импликации и от способа задания декартова произведения нечетких множеств.

Для оценки качества получаемых решений и процесса эволюции в целом используются параметры характеризующие динамику изменения среднего и лучшего значений ЦФ, а также разнообразие популяции.

На основании оценки динамики контрольных значений изменяются значения вероятностей выполнения операторов кроссинговера и мутации

$$Pc(t) = Pc(t - 1) + \Delta Pc(t), Pm(t) = Pm(t - 1) + \Delta Pm(t).$$

Результаты компьютерного моделирования. При наличии достаточного количества достоинств, данное кодирование имеет и серьезные недостатки, в том числе:

Исследование проводилось по двенадцати точкам, выбранным экспертно. Каждая точка эксперимента, для которых строится производственное расписание, определяется вектором исходных данных, координатами которого являются: общее количество заданий N , общее количество линий M , количество спаренных линий $LD = \sum_{j_1=1}^M \sum_{j_2=(M-j_1-1)}^M ld_{j_1 j_2}$, горизонт планирования D в часах, количество оборудования RQ .

Целью проведения экспериментов было установление характера зависимостей временных затрат на поиск решения от размерности задачи (число работ N , число линий M). Под сходимостью понимается достижение такого значения целевой функции D , при котором за последующие δ циклов работы алгоритма изменение ΔD составит не более $\Delta\%$ от предыдущего значения

$$\frac{|D_{i-\delta} - D_i|}{D_{i-\delta}} * 100\% \leq \Delta,$$

где D_i и $D_{i-\delta}$ – значение целевой функции на i -м и $(i-\delta)$ -м шаге соответственно, а i – число итераций алгоритма.

Ниже представлена таблица исходных данных (таблица 1).

Таблица 1

Данные для оценки сходимости алгоритмов

№	N	M/LD	D	RQ
1	5	3/2	72	1
2	10	3/2	96	1
3	20	6/2	96	2
4	50	12/4	120	3
5	70	16/6	120	3
6	100	24/8	120	4
7	150	26/8	144	5
8	200	30/10	168	6
9	250	34/10	192	6
10	300	40/12	240	7
11	400	50/16	240	8
12	500	54/18	240	8

Также в ходе проведения экспериментов решалась задача получения количественной оценки улучшения качества решения. Улучшение качества оценивалось относительно значения целевой функции начального решения. В целях наглядности демонстрации в эксперимент был включен алгоритм случайного поиска решения. При проведении данного исследования для каждого алгоритма были взяты одни и те же исходные данные: количество заданий $N = 100$, количество линий, из них спаренных $M/LG = 24/8$, горизонт планирования $D = 120$; количество оснастки $RQ = 4$.

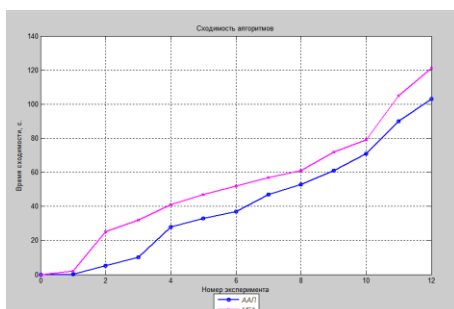


Рис. 7. Оценка сходимости результатов

Для предложенного модифицированного эволюционного алгоритма проводился анализ эффективности работы при 1000 итерациях, а работа алгоритма случайного поиска оценивалась на множестве 100000 случайно найденных решений. При сравнении результатов работы алгоритмов использовались следующие значения параметров (см. табл. 2).

Таблица 2

Параметры модифицированного эволюционного алгоритма

Наименование параметра	Значение
Размер популяции.	100
Вероятность скрещивания	0.9
Вероятность мутации	0.1
Схема миграции	«лучшие» – «худшие»
Период миграции, пок.	5
Доля мигрирующих особей, %	10
Количество точек скрещивания, %	0.0005
Количество точек мутации, %	0.001

Результаты сравнения эффективности работы различных алгоритмов приведены на рис. 8.

Заключение. На основании полученных результатов можно утверждать, что временная сложность растет линейно при увеличении размерности задачи. На рисунке 7 отражена зависимость времени сходимости решения от общего числа производственных линий.

Результаты экспериментов подтвердили общее предположение о целесообразности использования приближенного алгоритма для получения приемлемого (квазиоптимального) решения. Полученные зависимости подтверждают предположение о полиномиальной временной сложности предложенных алгоритмов.

Анализируя полученные зависимости, можно отметить тот факт, что увеличение числа циклов работы алгоритма случайного поиска не приводит значимому улучшению качества получаемых результатов. Что касается времени работы, то наиболее быстрым является модифицированный эволюционный алгоритм. Это происходит при наличии качественных правил или предметных эвристик, позволяющих разрешать нарушения ограничений. Модифицированный эволюционный алгоритм позволяет получать набор решений приемлемого качества за полиномиальное время.

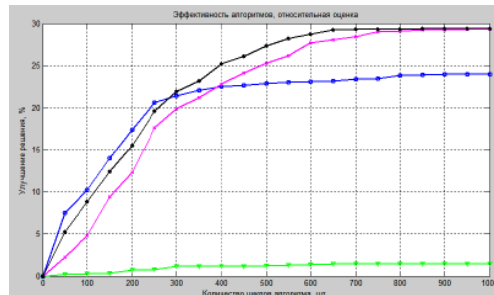


Рис. 8. Сравнение эффективности алгоритмов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Foster I., Kesselman C. The grid: blueprint for a new computing infrastructure. – Morgan Kaufmann Publishers Inc., USA, 1998.
2. Cafaro M., Aloisio G. (eds.). Grids, clouds and virtualization, Computer Communications and Networks. – Springer London, 2011.
3. Yaqin Liu, Chubo Liu, Jing Liu, Yikun Hu, Kenli Li, Keqin Li Mobility-Aware and Code-Oriented Partitioning Computation Offloading in Multi-Access Edge Computing // Journal of Grid Computing. – 2022. – Vol. 20, Article number 11. – <https://doi.org/10.1007/s10723-022-09599-x>.
4. Jacob B., Brown M., Fukui K., Trivedi N. Introduction to Grid Computing. – ibm.com/redbooks 2005.
5. Kahanwal B., Singh T. The distributed computing paradigms: p2p, grid, cluster, cloud, and jungle // International Journal of Latest Research in Science and Technology. – 2012. – Vol. 1, Issue 2. – P. 183-187.
6. Magoulès F., Nguyen T., Yu L. Grid resource management: toward virtual and services compliant grid computing, Numerical analysis and scientific computing. – CRC Press, UK, 2009.
7. Жожикашвили В.В., Вишневецкий В.М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1998.
8. Pinedo M. Scheduling: Theory, Algorithms and Systems. – 3rd ed. – Springer Verlag, New York, 2008.
9. Conway R.M., Maxwell W.L., Miller L.W. Theory of Scheduling. – 2nd ed. – Dover Publications, Mineola NY, 2004.
10. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004.
11. Батыршин И.З., Недосекин А.О. и др. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика. – М.: Физматлит, 2007.
12. Kar A.K. Bio Inspired Computing – A Review of Algorithms and Scope of Applications // Expert Systems with Applications. – 2016. – Vol. 59. – P. 20-32.
13. Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence: Algorithms, Theory and Applications. – Academic Press, 2020. – ISBN 978-0-12-819714-1. – <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00628-0>.
14. Gross D., Shortle J.F., Thompson J.M., Harris C.M. Solutions Manual to Accompany Fundamentals of Queueing Theory. 4th Edition. – John Wiley & Sons Inc., 2008.
15. Bhat Narayan U. An Introduction to Queueing Theory: Modeling and Analysis in Applications (Statistics for Industry and Technology). – Birkhäuser, 2008.
16. Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Громов С.А. Гибридная модель решения задач оперативно-го производственного планирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 4 (165). – С. 102-114.
17. Li M., Baker M. The grid: core technologies. – John Wiley & Sons Ltd, England, 2005.
18. Саак А.Э. Полиномиальные алгоритмы распределения ресурсов в Grid-системах на основе квадратичной типизации массивов заявок // Информационные технологии. – 2013. – № 7.
19. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010.
20. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003.

21. Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Громов С.А. Гибридный алгоритм решения задач оперативного планирования производственного процесса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 112-123.
22. Herrera F., Lozano M. Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions // J. Soft Computing. – 2003. – P. 545-562.
23. Michael A., Takagi H. Dynamic control of genetic algorithms using fuzzy logic techniques // Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms. – Morgan Kaufmann, 1993. – P. 76-83
24. Lee M.A., Takagi H. Integrating design stages of fuzzy systems using genetic algorithms // Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy System. – 1993. – P. 612-617.

REFERENCES

1. Foster I., Kesselman C. The grid: blueprint for a new computing infrastructure. Morgan Kaufmann Publishers Inc., USA, 1998.
2. Cafaro M., Aloisio G. (eds.). Grids, clouds and virtualization, Computer Communications and Networks. Springer London, 2011.
3. Yaqin Liu, Chubo Liu, Jing Liu, Yikun Hu, Kenli Li, Keqin Li Mobility-Aware and Code-Oriented Partitioning Computation Offloading in Multi-Access Edge Computing, *Journal of Grid Computing*, 2022, Vol. 20, Article number 11. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10723-022-09599-x>.
4. Jacob B., Brown M., Fukui K., Trivedi N. Introduction to Grid Computing. ibm.com/redbooks 2005.
5. Kahanwal B., Singh T. The distributed computing paradigms: p2p, grid, cluster, cloud, and jungle, *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2012, Vol. 1, Issue 2, pp. 183-187.
6. Magoulès F., Nguyen T., Yu L. Grid resource management: toward virtual and services compliant grid computing, Numerical analysis and scientific computing. CRC Press, UK, 2009.
7. Zhzhikashvili V.V., Vishnevskiy V.M. Seti massovogo obsluzhivaniya. Teoriya i primeneniye k setyam EVM [Queuing networks. Theory and application to computer networks]. Moscow: Radio i svyaz', 1998.
8. Pinedo M. Scheduling: Theory, Algorithms and Systems. 3rd ed. Springer Verlag, New York, 2008.
9. Conway R.M., Maxwell W.L., Miller L.W. Theory of Scheduling. 2nd ed. Dover Publications, Mineola NY, 2004.
10. Yarushkina N.G. Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems]. Moscow: Finansy i statistika, 2004.
11. Batyrshin I.Z., Nedosekin A.O. i dr. Nечеткие гибридные системы. Teoriya i praktika [Fuzzy hybrid systems. Theory and practice]. Moscow: Fizmatlit, 2007.
12. Kar A.K. Bio Inspired Computing – A Review of Algorithms and Scope of Applications, *Expert Systems with Applications*, 2016, Vol. 59, pp. 20-32.
13. Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence: Algorithms, Theory and Applications. Academic Press, 2020. ISBN 978-0-12-819714-1. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00628-0>.
14. Gross D., Shortle J.F., Thompson J.M., Harris C.M. Solutions Manual to Accompany Fundamentals of Queueing Theory. 4th Edition. John Wiley & Sons Inc., 2008.
15. Bhat Narayan U. An Introduction to Queueing Theory: Modeling and Analysis in Applications (Statistics for Industry and Technology). Birkhäuser, 2008.
16. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gromov S.A. Gibrinaya model' resheniya zadach operativnogo proizvodstvennogo planirovaniya [Hybrid model for solving operational production planning tasks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 4 (165), pp. 102-114.
17. Li M., Baker M. The grid: core technologies. John Wiley & Sons Ltd, England, 2005.
18. Saak A.E. Polinomial'nye algoritmy raspredeleniya resursov v Grid-sistemakh na osnove kvadrachnoy tipizatsii massivov zayavok [Polynomial algorithms of resource allocation in Grid systems based on quadratic typing of arrays of applications], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2013, No. 7.

19. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Kureychik V.M. Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010.
20. Emel'yanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow: Fizmatlit, 2003.
21. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gromov S.A. Gibrinnyy algoritm resheniya zadach operativnogo planirovaniya proizvodstvennogo protsessa [Hybrid algorithm for solving problems of operational planning of the production process], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 9 (194), pp. 112-123.
22. Herrera F., Lozano M. Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions, *J. Soft Computing*, 2003, pp. 545-562.
23. Michael A., Takagi H. Dynamic control of genetic algorithms using fuzzy logic techniques, *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann, 1993, pp. 76-83.
24. Lee M.A., Takagi H. Integrating design stages of fuzzy systems using genetic algorithms, *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy System*, 1993, pp. 612-617.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Саак Андрей Эрнестович – Южный федеральный университет; e-mail: aesaak@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра государственного и муниципального управления; зав. кафедрой.

Гладков Леонид Анатольевич – e-mail: lagladkov@sfedu.ru; тел.: 88634371625; кафедра САПР; к.т.н.; доцент.

Гладкова Надежда Викторовна – e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; тел.: 88634393260; кафедра САПР; старший преподаватель.

Saak Andrey Ernestovich – Southern Federal University; e-mail: aesaak@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of state and municipal administration; head of department.

Gladkov Leonid Anatol'evich – e-mail: lagladkov@sfedu.ru; phone: +78634371625; the department of CAD; cand. of eng. sc.; associate professor.

Gladkova Nadezda Viktorovna – e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; phone: +788634393260; the department of CAD; senior teacher.

УДК 004

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-128-141

А.Н. Беликов, С.А. Кучеров, В.С. Лапшин, Ю.Ю. Липко, А.С. Свиридов

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ КОММУНИКАЦИИ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Проводится анализ существующих моделей коммуникации и их применимости к задачам организации эффективной коммуникации в процессе разработки информационных систем. Рассматривается использование моделей коммуникации в сочетании с различными, наиболее часто применяющимися моделями жизненного цикла информационных систем – водопадной, спиральной, SCRUM. Анализируются достоинства и недостатки таких сочетаний и их причины на примере модели Т. Ньюкомба. Основным элементом коммуникации является обеспечение понимания между двумя участниками относительно объекта, который возникает в проекте на очередном шаге его выполнения. Представлена систематизация знаний и информации с учетом субъектов и форм ее представления. Проведенный анализ показывает, что модели, реализуя заложенные в них идеи, в различной степени соответствуют разным моделям жизненного цикла, однако ни одна из моделей коммуникации в полной мере не позволяет решить проблемы коммуникации при разработке информационных систем. Выполненные исследования показывают, что ни одно из сочетаний моделей не позволяет эффективно организовать коммуникацию между участниками в процессе разработки. Необходимо кардинально пересматривать модели и механизмы таким обра-

зом, чтобы субъекты могли осуществлять коммуникацию на этапе подготовки действий по созданию артефактов разработки программного обеспечения, а не по результатам их осуществления. На устранение таких проблем ориентируются подходы, предполагающие разработку и использование инструментов коммуникации – LOW/No code платформ, или иного CASE-инструментария, позволяющего пользователю и разработчику коммуницировать с сохранением контекста передаваемых знаний. Изучение особенностей и структуры таких инструментов будет являться предметом дальнейшего исследования.

Модели коммуникации; разработка информационных систем; жизненный цикл; участники коммуникации; CASE-инструменты; модель коммуникации Ньюкомба; Scram.

A.N. Belikov, S.A. Kuchеров, V.S. Lapshin, Yu.Yu. Lipko, A.S. Sviridov

ANALYSIS OF THE COMMUNICATION MODELS USAGE IN THE LIFE CYCLE OF INFORMATION SYSTEMS DEVELOPMENT

The article analyzes the existing communication models and their applicability to the tasks of organizing effective communication in the process of developing information systems. The use of communication models in combination with various, most commonly used models of the life cycle of information systems – waterfall, spiral, SCRUM - is considered. The advantages and disadvantages of such combinations and their causes are analyzed on the example of T. Newcomb's model. The main element of communication is to ensure understanding between the two participants regarding the object that arises in the project at the next step of its implementation. The systematization of knowledge and information is presented, taking into account the subjects and forms of its presentation. The analysis shows that the models, realizing the ideas embedded in them, correspond to different life cycle models to varying degrees, but none of the communication models fully solves communication problems in the development of information systems. The performed studies show that none of the combinations of models allows to effectively organize communication between participants in the development process. It is necessary to radically revise models and mechanisms in such a way that subjects can communicate at the stage of preparing actions to create software development artifacts, and not based on the results of their implementation. Approaches involving the development and use of communication tools – LOW/No code platforms, or other CASE-tools that allow the user and the developer to communicate while preserving the context of the transmitted knowledge are focused on eliminating such problems. The study of the features and structure of such tools will be the subject of further research.

Communication models; information systems development; life cycle; communication participants; CASE-tools; Newcomb communication model; Scram.

Введение. Разработка информационных систем является сложным комплексом процессов и задач, которые выполняются различными группами участников проекта. Одним из ключевых факторов, влияющих на успешность выполнения проекта, является эффективный обмен информацией между его участниками. При этом такая потребность возникает при любой модели жизненного цикла. Статистика выполнения проектов [1] показывает, что такую коммуникацию организовать удастся не всегда, что приводит к нарушению параметров проекта или его срыву.

В данной статье проводится анализ возможности применения существующих моделей коммуникации для решения проблем взаимодействия участников проекта в основных моделях жизненного цикла – каскадной, спиральной, SCRUM и т.д. Целью проведения анализа является выявление основных идей, заложенных в существующие модели коммуникации и их недостатков для применения в процессе разработки информационных систем.

Понятие коммуникации. Особую актуальность коммуникация приобретает в связи с развитием междисциплинарных исследований, так как такого рода исследования требуют организации эффективного взаимодействия между группами участников (субъектов) из различных областей знаний.

Сущность коммуникации изучается еще с первой половины XX века, и за это время накоплено достаточно большое количество определений, отражающих те или иные взгляды на данное явление [2–5]:

- ♦ коммуникация есть информационная связь субъекта с тем или иным объектом - человеком, животным, машиной (М. Каган);
- ♦ коммуникация – обмен информацией между сложными динамическими системами и их частями, которые в состоянии принимать информацию, накапливать ее, преобразовывать (А. Урсул);
- ♦ коммуникация – специфический обмен информацией, процесс передачи эмоционального и интеллектуального содержания (А.Б. Зверинцев, А.П. Панфилова);
- ♦ коммуникация – это «процессы перекодировки вербальной в невербальную и невербальной в вербальную сферы (Почепцов Г.Г.);
- ♦ коммуникация – это тип активного взаимодействия между объектами любой природы, предполагающий информационный обмен (С.А. Азаренко, Г.И. Рузавин, А.Я. Флиер, В.Л. Бернштейн, П.С. Александров);
- ♦ коммуникация – это процесс информационного обмена (М.А. Василик).

Эти и другие определения можно проанализировать с точки зрения основной идеи, заложенной в него, а также соответствующую этому определению модель.

Из существующих определений термина «коммуникация», можно судить о том, что этот процесс основывается на взаимодействии знаний субъектов, то есть на том, что коммуникация – это взаимодействие субъектов, при котором происходит обмен знаний или их передача. Подобное тождество суть процесса коммуникации [4]. Обеспечение должного качества взаимодействия наиболее критично при разработке программных продуктов (ПО), поскольку от него зависит степень соответствия ПО пользовательским требованиям и успех IT-проекта в целом. Однако, как показывает статистика агентства The Standish Group International, доля успешных IT-проектов в среднем составляет 30%, а доля неуспешных и проблемных – 70% [6], что свидетельствует о наличии проблем при взаимодействии субъектов процесса разработки ПО.

Проблемы взаимодействия характеризуются прежде всего «семантическими разрывами», возникающими в процессе обмена знаниями по средствам общения друг с другом. В суждениях и рассуждениях о предметной области субъектами используются термины, которые не имеют однозначного определения для каждого субъекта из группы взаимодействия. В процессе диалога одни субъекты пытаются определить контекст терминов, употребляемых другими субъектами и преобразовать его в аксиоматически определенные понятия [7]. Однако, как показывает практика разработки ПО, эффективность такого преобразования составляет порядка 20–30% правильно интерпретируемых понятий от общего числа используемых субъектами терминов.

Проблемы коммуникации, возникающие при разработке ПО усугубляются наличием разнородных групп участников (субъектов) этого процесса, использующих базовые наборы терминологии, методов и подходов к реализации своих задач в общем процессе разработки.

Основываясь на этом, актуальной становится задача определения такого вида коммуникации, которая будет адекватна процессу разработки ПО, и позволит устранить указанные ошибки взаимодействия субъектов.

Коммуникация как объект исследования предполагает построение ее модели [5]. Из текущего состояния исследований, ориентированных на построение и анализ моделей коммуникаций, представленных в работах [2–5], можно выделить следующие идеи, заложенные в модели коммуникации:

- ♦ организовать безошибочную передачу данных (модели коммуникации – (Шенона-Вивера, Шрама, Берло, ДеФлера) [8–11];
- ♦ достичь понимания у всех субъектов коммуникации о структурных и поведенческих характеристиках разрабатываемой системы (модели коммуникации – Ньюкомба, Гербнера, Якобсона, Лотмана) [12–15];
- ♦ повлиять на некоторых субъектов коммуникации (модели коммуникации Уэстли-Маклейн, Малецке, Луман) ориентируя их на подготовку к выполнению целевых действий [16–18].

С точки зрения процесса разработки информационных систем, коммуникацию можно определить как единство процессов формирования группы субъектов и организации их взаимодействия для достижения понимания о структурных и поведенческих характеристиках разрабатываемой системы. Исходя из данного определения, далее рассмотрим реализацию одной из существующих моделей коммуникации разработанных на основе идеи о достижении понимания у субъектов – модели коммуникации Ньюкомба [12]. Выбор такой модели обусловлен наличием в ее структуре образа предмета коммуникации, относительно которого достигается понимание. В рамках процесса проектирования систем образа предмета коммуникации является образом разрабатываемой системы. Модель коммуникации будет применена в рамках наиболее популярных процессов организации жизненного цикла разработки систем: водопад, спираль, Scram [19].

Применение модели коммуникации Ньюкомба в жизненном цикле SCRUM. Рассмотрим проблему коммуникации и её негативное влияние на результаты процесса разработки программного обеспечения на примере модели Ньюкомба [12] и метода организации процесса разработки программного обеспечения SCRUM [20].

Основной идеей коммуникации по Ньюкомбу является достижение симметрии в треугольнике Субъект-Объект-Субъект. Симметрия должна выражаться в едином восприятии объекта двумя субъектами и едином восприятии субъектами друг друга. Применительно к процессу разработки программного обеспечения это означает, что субъект, испытывающий потребность в некоторой системе, субъект, имеющий возможность реализовать данную систему и сам образ системы находятся в согласованном виде.

SCRUM, как один из методов организации разработки программного обеспечения преследует отчасти аналогичные цели – заказчик (субъект, испытывающий потребность в системе) и разработчик (субъект, имеющий возможность реализовать систему) должны в конечном итоге прийти к согласованной точке зрения относительно системы (её образа, представленного моделями, прототипами и пр.), что также должно означать что заказчик с разработчиком понимают друг друга. Ключевыми особенностями здесь являются цикличность процесса, поскольку SCRUM – итеративный метод, и наличие обратной связи, так как каждая итерация подразумевает оценку степени соответствия результатов ожиданиям. Изложенное выше показывает, что модель коммуникации Ньюкомба не противоречит принципам, лежащим в основе SCRUM.

В целях выявления проблем коммуникации приведем исходную А-В-Х модель к терминологии SCRUM. Согласно Т. Ньюкомбу, простейший коммуникативный акт состоит в том, что субъект (А) передает информацию о каком-либо объекте или явлении (Х) субъекту (В). В качестве субъекта А в SCRUM участвует владелец SCRUM продукта (Владелец, SCRUM Product Owner), в качестве субъекта В – команда разработчиков (Разработчики, SCRUM Development Team), в качестве объекта Х рассматривается Продукт.

Таким образом, модель единичного коммуникативного акта по Т. Ньюкомбу в терминологиях SCRUM будет выглядеть следующим образом (рис. 1).

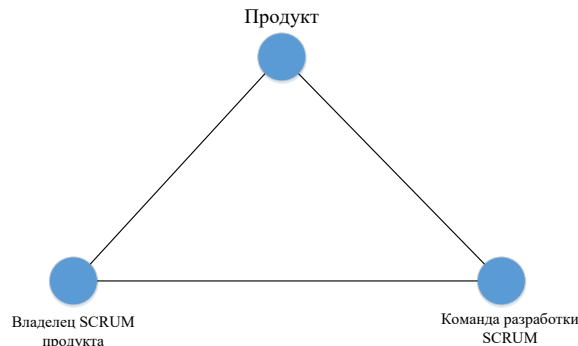


Рис. 1. Модель единичного коммуникативного по Т. Ньюкомбу на примере SCRUM

Метод SCRUM носит итеративный характер и направлен на создание Разработчиками продукта, соответствующего ожиданиям Владельца, а по Ньюкомбу коммуникативные акты осуществляются для достижения симметрии, выражающейся, по сути, в одинаковом понимании объекта. Следовательно, в итеративном процессе происходит некоторое «уточнение» представления, причём понятие представления применимо не только к объекту, но и к обоим субъектам.

Так, владелец SCRUM продукта имеет собственное представление о системе, которое уточняется, расширяется и корректируется в процессе коммуникации с командой разработки. Это обуславливается техническими и технологическими ограничениями (не все желаемые функции могут быть реализованы программно), компетенциями команды (не все желаемые функции и возможности могут быть реализованы разработчиками), ресурсами и т.д. Аналогичным образом команда разработчиков SCRUM имеет своё представление о системе, что с учетом специфики данного метода означает наличие знаний и опыта по реализации типовой системы и одновременное отсутствие знаний по специфике её применения владельцем SCRUM продукта. Данное представление уточняется, расширяется и корректируется в процессе коммуникации с Владельцем. Поскольку основная цель SCRUM – создание продукта, а содержание SCRUM – работы по доведению его прототипов и вариантов реализации до уровня, удовлетворяющего целям Владельца, то и продукт (система) также имеет свой образ, который базируется на образе типового решения (например, интернет-магазин или CRM-система) и уточняется в процессе коммуникации Владельца с Командой.

Сказанное выше отражает первый недостаток модели коммуникации по Т. Ньюкомбу – она не содержит элементов, позволяющих описать и формализовать процесс схождения представлений в точку симметрии.

Следующий аспект заключается в том, чем обмениваются субъекты в процессе коммуникации. Очевидно, что каждый из них обладает своим багажом знаний, а знания, в свою очередь, могут быть классифицированы на следующие виды:

- ♦ Знания, необходимые для осуществления коммуникации. Сюда входят знания терминологии предметной области, технических терминов, знания о моделях и нотациях моделирования, используемых для представления образа продукта и пр.

- ♦ Знания, необходимые для осуществления схождения представления в точку симметрии. Сюда входят знания о процессе создания объекта, о процессе его использования, о степени соответствия результатов ожиданиям и пр.

В табл. 1 представлена систематизация знаний и информации с учетом субъектов и форм представления.

Таблица 1

Знания, используемые в SCRUM-коммуникации

Субъект	Категория знания	Знание	Информация	Способ представления
Владелец SCRUM продукта	Знания для осуществления коммуникации	Терминология	—	—
		Модели и нотации	—	—
		Процесс создания объекта		
	Знания для осуществления схождения представления в точку симметрии	Формы воплощения объекта	Информация о форме воплощения объекта	Естественный язык, с использованием терминологии
		Представление о будущем процессе эксплуатации объекта	Информация о будущем процессе эксплуатации объекта	Естественный язык, с использованием терминологии и привязкой к процессу создания объекта
		Степень понимания задачи командой разработчиков SCRUM	—	—
Команда разработчиков SCRUM	Знания для осуществления коммуникации	Терминология	—	—
		Модели и нотации	—	—
		Процесс создания объекта	—	—
	Знания для осуществления схождения представления в точку симметрии	Формы воплощения объекта	Информация о форме воплощения объекта	Конкретное понятие из онтологии объектов
		О будущем объекте (Функции, структура)	Информация об особенностях эксплуатации объекта заданного типа	Модели, диаграммы, текстовые описания с использованием терминологии
		Степень соответствия продукта ожиданиям заказчика	—	—

Из таблицы видно, что не все знания могут быть представлены информацией. Часть из них, например, терминология, выполняют роль средства при формировании другой информации. Другая часть знаний, например, степень соответствия продукта ожиданиям заказчика, используется в качестве триггера или критерия при принятии решения о готовности продукта. Стоит также учитывать, что каждый субъект, помимо знаний, характеризуется навыками передачи информации, которые также вносят вклад в конечный результат коммуникации.

В процессе передачи знания для осуществления схождения представления в точку симметрии превращаются с помощью знаний, необходимых для осуществления коммуникации, в информацию, релевантную объекту и передаваемую меж-

ду субъектами. Каждая информация, помимо направленности и содержащихся в ней знаний имеет свою форму представления. По аналогии с отсутствием элементов, позволяющих описать и формализовать процесс схождения представлений в точку симметрии, модель Т. Ньюкомба также не содержит аспектов, характеризующих знания, информацию и способы её передачи. Недостатки модели коммуникации по Т. Ньюкомбу применительно к методу организации процесса разработки программного обеспечения SCRUM показаны на рис. 2.

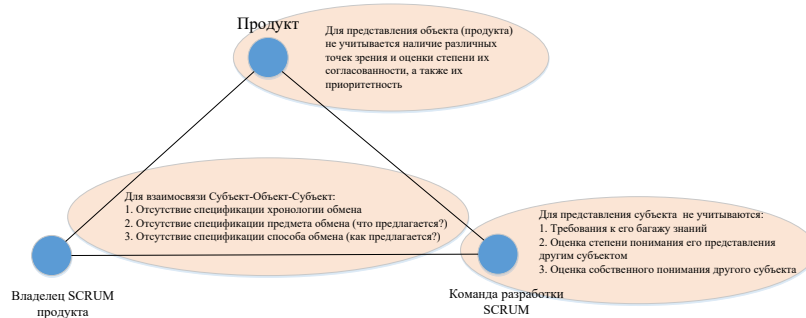


Рис. 2. Недостатки модели коммуникации по Т. Ньюкомбу в SCRUM

Рассмотренный в примере анализ коммуникации может быть спроецирован на иные известные подходы к организации процесса разработки, как классические водопад и спираль.

Применение модели коммуникации Ньюкомба в жизненном цикле «Водопад» (каскад). Водопадная модель (или модель Waterfall) жизненного цикла подразумевает под собой строгую последовательность этапов [21]. На каждом этапе жизненного цикла порождается определенный набор технических решений и документов, при этом для каждого этапа исходными являются документы и решения, принятые на предыдущем этапе.

Весь процесс разработки ИС можно разделить на несколько этапов [22]:

Деление может производиться по различным принципам. Проведем условное разделение по содержанию работ, выполняемых на каждом из этапов:

1. Обследование предметной области (сбор исходных данных, выявление потоков документов, функций и т.д.);
2. Бизнес-моделирование (разработка моделей и требований к системе);
3. Проектирование (проектирование архитектуры системы, проектирование БД и т.д.);
4. Реализация системы (программирование, тестирование);
5. Ввод системы в эксплуатацию.

Однако такой последовательности этапов присущи недостатки. В частности, если какая-либо недоработка закралась на начальном этапе разработки и осталась незамеченной, устранять ее зачастую приходится уже после внедрения. Подобных недоработок всегда бывает предостаточно, и потери от их устранения и преобразования всей системы выражаются значительными суммами.

Рассматривая необходимость коммуникаций между участниками проекта по модели Ньюкомба можно выделить ключевые точки и объекты над которыми производится коммуникация (рис. 3).



Рис. 3. Схема проецирования модели Ньюкомба на водопадную модель ЖЦ

Как видно из схемы, образуется несколько объектов (бизнес, проект системы, система) вокруг которых достигается понимание между различными субъектами (заказчик, системный аналитик, проектировщик системы, команда разработки).

При этом у каждого участника коммуникации в рамках водопадной модели свой набор знаний, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Знания, используемые в водопадной-коммуникации

Знания заказчика	Знания системного аналитика	Знания проектировщика	Знания команды разработки
- Знания о предметной области (профессиональной деятельности)	- Знания о предметной области - Знания о возможности ИТ Знания терминологии ИТ	- Знания о возможности ИТ - Знания терминологии ИТ - Знания о типах объектов ИТ - Знания о форме воплощения объектов	- Знания о форме воплощения объектов ИТ - Знание о процессе создания объектов ИТ

Рассмотрим более подробно проецирование модели Ньюкомба для одного объекта в рамках водопадной модели ЖЦ (в качестве примера рассмотрим коммуникацию между заказчиком и системным аналитиком).

Итак, в рамках коммуникации между заказчиком и системным аналитиком происходит передача информации (знаний) между субъектами о объекте-бизнесе. При такой передаче заказчик оперирует знаниями о предметной области, а системный аналитик должен при этом обладать как знаниями о предметной области, так и знаниями о возможности ИТ. Передача знаний от заказчика к разработчику происходит в форме естественного языка, а в обратном направлении в форме моделей. Результатом такой коммуникации должны служить артефакты (модели, техническое задание и т.д.), которые будут исходными данными для коммуникации между системным аналитиком и проектировщиком системы вокруг объекта-проекта системы.

Анализируя применение модели, можно сделать вывод, о том, что при существующей коммуникации в рамках водопадной модели возникает проблема, заключающаяся в передаче полной информации от этапа к этапу (субъекта к субъекту) и невозможности отследить её отследить вовремя. Другой проблемой в рамках водопадной модели является разобщенность между знаниями субъектов и согласования знаний в рамках различных объектов (представлений объекта).

Применение модели коммуникации Ньюкомба в спиральной модели жизненного цикла. Спиральная модель жизненного цикла [23], как и каскадная модель разделяет разработку на несколько фаз, а формирование результата проекта происходит несколькими итерациями. Каждый виток спирали соответствует созданию части продукта, уточняются параметры проекта, определяется его качество и планируются работы следующей итерации.

Спиральная модель хорошо подходит для проектов с высоким уровнем неопределенности требований к конечному продукту и позволяет уточнять требования при выполнении дальнейших итераций. Как и в каскадной при использовании спиральной модели существует несколько фаз [23], на которых задействованы разные участники.

Рассматривая необходимость коммуникаций между участниками проекта по модели Ньюкомба, можно выделить ключевые точки, в которых проходит коммуникация – на фазе определения целей между заказчиком и аналитиком, на фазе проектирования – между аналитиком и проектировщиком, на фазе разработки – между проектировщиком и командой разработки, на фазе планирования – между тестирующим и заказчиком.

При это можно заметить, что на разных фазах один и тот же участник проекта является участником коммуникации в разной роли – как потребитель и как источник информации, необходимой для выполнения проекта.

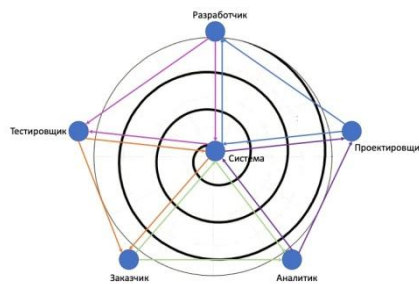


Рис. 4. Коммуникация по модели Ньюкомба для спиральной модели жизненного цикла

При выполнении проекта необходимо обеспечить передачу знаний при осуществлении коммуникации участников. Содержание таких знаний аналогично рассмотренным в табл. 1. и оформляется в виде требований и моделей, чаще всего построенных на языке UML.

Анализ структуры коммуникации и передаваемых знаний показывает, что знания о терминологии выполняют роль средства при формировании другой информации. Другая часть знаний, например, степень соответствия продукта ожиданиям заказчика, используется в качестве триггера или критерия при принятии решения о готовности продукта. Стоит также учитывать, что каждый субъект, помимо знаний, характеризуется навыками передачи информации, которые также вносят вклад в конечный результат коммуникации.

Анализ полученных результатов. Также были проанализированы модели коммуникации Д. Берло, ДеФлера, Гербнера, Уэтли Маклейна [5] применительно к моделям жизненного цикла разработки программного обеспечения – спиральной, водопадной, Scrum. При рассмотрении проводился анализ, насколько заложенные в модель коммуникации идея и средства (элементы модели) могут решить проблемы, возникающие при взаимодействии участников проекта.

Проведенный анализ показывает, что модели, реализуя заложенные в них идеи, в различной степени соответствуют разным моделям жизненного цикла, однако ни одна из моделей коммуникации в полной мере не позволяет решить проблемы коммуникации при разработке информационных систем.

Заложенная в модели коммуникации Шенона-Вивера, Шрама, Берло, ДеФлера [8–11] идея об обеспечении безошибочной передачи данных может применяться при подходе к разработке с ориентацией на фиксацию проектной информации в виде спецификаций и требований, однако общей проблемой моделей данного типа является недостаток взаимопонимания. Этот недостаток пытаются преодолеть за счет унификации кодирования информации – представления их в виде, фиксируемом методологиями, моделями. Однако содержательное их понимание при этом не обеспечивается.

Модели коммуникации Ньюкомба, Гербнера, Якобсона, Лотмана [12–15], ставят перед собой задачу обеспечения понимания между субъектами и в большей степени подходят для жизненного цикла, ориентированного на обеспечение единообразного представления всех участников проекта относительно его результатов. Однако при этом сохраняются недостатки, связанные с возможностью различных интерпретаций этого представления и его преобразования в действия по созданию целевого объекта.

Попытки совмещения моделей ориентированных на влияние на субъектов коммуникации (модели коммуникации Уэстли-Маклейн, Малецке, Луман [16–18]) с целью их на подготовки к выполнению действий также имеют проблемы, которые заключаются в их ориентации на канал передачи данных, представляемый техническими средствами массовых коммуникаций. Интерпретация такой формы канала на процессы разработки системы не представляется возможной вследствие упрощения параметров канала С, отвечающего за описание обратной связи. Параметры канала СМК, позволяют формировать внешнее действие на основе передачи «ощущения» других субъектов, однако моделирование таких свойств канала С в рамках разработки информационных систем не представляется возможным.

Попытка адаптировать известные модели коммуникации к потребностям процессов разработки программного обеспечения приводит лишь к частичному устранению недостатков. Обратимся для примера к возможной модификации модели коммуникации по Т. Ньюкомбу, чтобы она удовлетворяла потребностям метода организации процесса разработки программного обеспечения SCRUM. Для этого попытаемся устранить недостатки, изложенные при рассмотрении этой модели (рис. 5).

В представленной на рисунке выше модели коммуникации отражены характеристики информации и знаний. Сочетание видов и форм представления знаний, используемых в методах разработки программного обеспечения, а также способов обмена ими, заложенными в моделях коммуникаций так или иначе приводят к одному – коммуницирующие субъекты вынуждены обмениваться информацией по факту уже совершенных действий. Коммуницирующие субъекты способны влиять только на оценку некоторого созданного объекта или свершившегося события, вызывая тем самым к повторному исполнению процессов их создания. Необходимо кардинально пересматривать модели и механизмы таким образом, чтобы субъекты могли осуществлять коммуникацию на этапе подготовки действий по созданию артефактов разработки программного обеспечения, а не по результатам их осуществления.

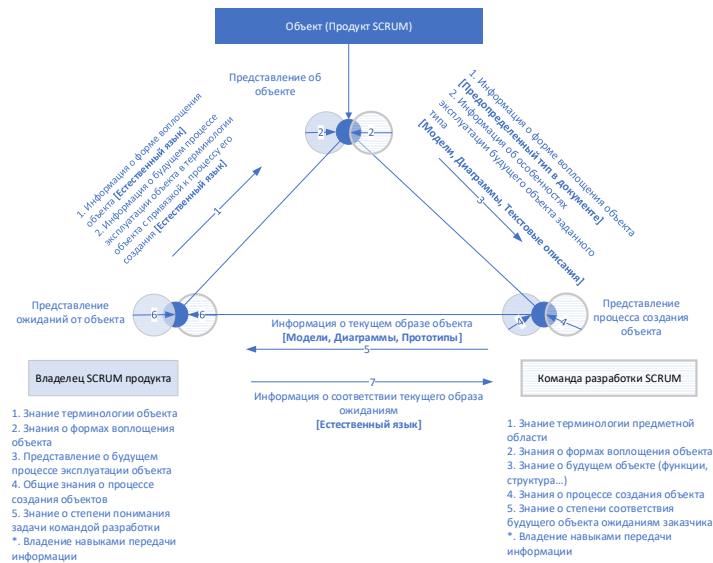


Рис. 5. Модифицированная модель коммуникации Т. Ньюкомба для обеспечения потребностей метода Scrum

Заключение. Таким образом, проецирование существующих моделей коммуникации на жизненный цикл процесса разработки характеризуется рядом проблем, связанных со спецификой той или иной модели коммуникации. Также были получены выводы, свидетельствующие о том, что модели коммуникации, ориентированные на достижения понимания у коммуницирующих субъектов, в наибольшей мере соответствуют специфике процесса разработки ПО и методологии проектной деятельности. Однако их применение также характеризуется рядом проблем, связанных с использованием разных видов и форм представления знаний, а также отсутствием способов формального представления контекста передаваемых знаний. На устранение таких проблем ориентируются подходы, предполагающие разработку и использование инструментов коммуникации – LOW/No code платформ, или иного CASE-инструментария, позволяющего пользователю и разработчику коммуницировать с сохранением контекста передаваемых знаний. Изучение особенностей и структуры таких инструментов будет являться предметом дальнейшего исследования.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00723, <https://rscf.ru/project/22-19-00723/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Davis. Why software development projects fail. – <https://www.3pillarglobal.com>. – URL: <https://www.3pillarglobal.com/insights/why-software-development-projects-fail/> (дата обращения: 06.11.2022).
2. Василик М.А. Основы теории коммуникации / под ред. М.А. Василика. Гардерика. – М., 2005.
3. Почепцов Г.Г. Теория коммуникации. – 2001.
4. Шарков Ф. Коммуникология: основы теории коммуникации. – Litres, 2020.
5. Тухватулина Л.Р. Принципы классификации моделей коммуникации // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2006. – №. 7.
6. Standish Group 2022 Chaos Report – Beyond Infinity Overview. – Режим доступа: <https://www.standishgroup.com/news/49> (дата доступа: 06.11.2022).

7. Финн В.К. Философские проблемы логики интеллектуальных систем // Новости искусственного интеллекта. – 1999. – № 1. – С. 36-51.
8. Дорофеева И.В. Модель Шеннона-Уивера и ее значение для развития теории коммуникации // Языковой дискурс в социальной практике. – 2013. – С. 49-53.
9. Schramm W. How communication works // The process and effects of mass communication. – 1954. – Vol. 3. – P. 26.
10. Berlo D.K. Communication as process: Review and commentary // Annals of the International Communication Association. – 1977. – Vol. 1, No. 1. – P. 11-27.
11. De Fleur M.L. A mass communication model of stimulus response relationships: An experiment in leaflet message diffusion // Sociometry. – 1956. – Vol. 19, No. 1. – P. 12-25.
12. Newcomb H.M. On the dialogic aspects of mass communication // Critical Studies in Media Communication. – 1984. – Vol. 1, No. 1. – P. 34-50.
13. Gerbner G. Toward a general model of communication // Audio visual communication review. – 1956. – P. 171-199.
14. Якобсон Р. Лингвистика и поэтика. – 1975.
15. Лотман Ю.М. Автокоммуникация: «Я» и «Другой» как адресаты // Внутри мыслящих миров. Человек–текст–семиосфера–история. – 1996. – С. 36.
16. Westley B.H., MacLean Jr M.S. A conceptual model for communications research // Journalism Quarterly. – 1957. – Vol. 34, No. 1. – P. 31-38.
17. Maletzke G. Psychologie der Massenkommunikation: theorie und Systematik. – 1963.
18. Луман Н., Озирченко Д. Что такое коммуникация? // Социологический журнал. – 1995. – № 3. – С. 114-124.
19. Ruparelia N.B. Software development lifecycle models // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. – 2010. – Vol. 35, No. 3. – P. 8-13.
20. Джефф Сазерленд. SCRUM. Революционный метод управления проектами = SCRUM. The art of doing twice the work in half the time. – Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 288 с. – ISBN 978-5-00057-722-6.
21. Royce Winston. Managing the Development of Large Software Systems // Technical Papers of Western Electronic Show and Convention. – August 1970. – P. 1-9.
22. Шлапак Вера Сергеевна, Теодорович Наталья Николаевна. Совершенствование жизненного цикла информационных систем малого и среднего бизнеса // Сервис +. – 2015. – № 3. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-zhiznennogo-tsikla-informatsionnyh-sistem-malogo-i-srednego-biznesa>.
23. Boehm B.W. A Spiral Model of Software Development and Enhancement // Computer. – 1988. – Vol. 21 (5). – P. 61-72.

REFERENCES

1. Davis. Why software development projects fail. Available at: <https://www.3pillarglobal.com/insights/why-software-development-projects-fail/> (accessed 06 November 2022).
2. Vasilik M.A. Osnovy teorii kommunikatsii [Fundamentals of the theory of communication], ed. by M.A. Vasilika. Garderika. Moscow, 2005.
3. Pocheptsov G.G. Teoriya kommunikatsii [Theory of communication], 2001.
4. Sharkov F. Kommunikologiya: osnovy teorii kommunikatsii [Communicology: fundamentals of the theory of communication]. Litres, 2020.
5. Tukhvatulina L.R. Printsipy klassifikatsii modeley kommunikatsii [Principles of classification of communication models], Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta [Bulletin of Tomsk State Pedagogical University], 2006, No. 7.
6. Standish Group 2022 Chaos Report – Beyond Infinity Overview. Available at: <https://www.standishgroup.com/news/49> (accessed 06 November 2022).
7. Finn V.K. Filosofskie problemy logiki intellektual'nykh sistem [Philosophical problems of logic of intelligent systems], Novosti iskusstvennogo intellekta [Artificial intelligence News], 1999, No. 1, pp. 36-51.
8. Dorofeeva I.V. Model' SHennona-Uivera i ee znachenie dlya razvitiya teorii kommunikatsii [The Shannon-Weaver model and its significance for the development of communication theory], Yazykovoy diskurs v sotsial'noy praktike [Language discourse in social practice], 2013, pp. 49-53.

9. Schramm W. How communication works, *The process and effects of mass communication*, 1954, Vol. 3, pp. 26.
10. Berlo D.K. Communication as process: Review and commentary, *Annals of the International Communication Association*, 1977, Vol. 1, No. 1, pp. 11-27.
11. De Fleur M.L. A mass communication model of stimulus response relationships: An experiment in leaflet message diffusion, *Sociometry*, 1956, Vol. 19, No. 1, pp. 12-25.
12. Newcomb H.M. On the dialogic aspects of mass communication, *Critical Studies in Media Communication*, 1984, Vol. 1, No. 1, pp. 34-50.
13. Gerbner G. Toward a general model of communication, *Audio visual communication review*, 1956, pp. 171-199.
14. Jakobson R. Lingvistika i poetika [Linguistics and poetics], 1975.
15. Lotman Yu.M. Avtokommunikatsiya: «Ya» i «Drugoy» kak adresaty [Autocommunication: "I" and "The Other" as addressees], *Vnutri myslyashchikh mirov. Chelovek–tekst–semiosfera–istoriya* [Inside thinking worlds. Man–text–semiosphere–history], 1996, pp. 36.
16. Westley B.H., MacLean Jr M.S. A conceptual model for communications research, *Journalism Quarterly*, 1957, Vol. 34, No. 1, pp. 31-38.
17. Maletzke G. Psychologie der Massenkommunikation: theorie und Systematik. 1963.
18. Luman N., Ozirchenko D. Chto takoe kommunikatsiya? [What is communication?], *Sotsiologicheskii zhurnal* [Sociological Journal.], 1995, No. 3, pp. 114-124.
19. Ruparelia N.B. Software development lifecycle models, *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2010, Vol. 35, No. 3, pp. 8-13.
20. Dzheff Sazerlend. SCRUM. Revolyutsionnyy metod upravleniya proektami = SCRUM [SCRUM. A revolutionary method of project management = SCRUM]. The art of doing twice the work in half the time. Mann, Ivanov i Ferber, 2016, 288 p. ISBN 978-5-00057-722-6.
21. Royce Winston. Managing the Development of Large Software Systems, *Technical Papers of Western Electronic Show and Convention*, August 1970, pp. 1-9.
22. Shlapak Vera Sergeevna, Teodorovich Nataliya Nikolaevna. Sovershenstvovanie zhiznennogo tsikla informatsionnykh sistem malogo i srednego biznesa [Improving the life cycle of small and medium-sized business information systems.], *Servis + [Service +]*, 2015, No. 3. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-zhiznennogo-tsikla-informatsionnyh-sistem-malogo-i-srednego-biznesa>.
23. Boehm B.W. A Spiral Model of Software Development and Enhancement, *Computer*, 1988, Vol. 21 (5), pp. 61-72.

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

Беликов Александр Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: anbelikov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185945508; кафедра системного анализа и телекоммуникаций; старший преподаватель.

Кучеров Сергей Александрович – e-mail: skucherov@sfedu.ru; тел.: +79612966919; кафедра системного анализа и телекоммуникаций; к.т.н.; доцент.

Лапшин Вячеслав Сергеевич – e-mail: lapshin@sfedu.ru; тел.: +79525690073; . кафедра системного анализа и телекоммуникаций; к.т.н.; старший преподаватель.

Липко Юлия Юрьевна – e-mail: ylipko@sfedu.ru; тел.: +79185566893; кафедра системного анализа и телекоммуникаций; к.т.н.; доцент.

Свиридов Александр Славьевич – e-mail: asviridov@sfedu.ru; тел.: +79185567529; кафедра системного анализа и телекоммуникаций; к.т.н.; доцент.

Belikov Alexsandr Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: anbelikov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185945508; the department of system analysis and telecommunications; senior lecturer.

Kuchеров Sergey Alexandrovich – e-mail: skucherov@sfedu.ru; phone: +79612966919; the department of system analysis and telecommunications; cand. of eng. sc.; associate professor.

Lapshin Vyacheslav Sergeevich – e-mail: lapshin@sfedu.ru; phone: +79525690073; the department of system analysis and telecommunications; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

Lipko Yuliya Yur'evna – e-mail: ylipko@sfedu.ru; phone: +79185566893; the department of system analysis and telecommunications; cand. of eng. sc.; associate professor.

Sviridov Alexandr Slav'evich – e-mail: asviridov@sfedu.ru; phone: +79185567529; the department of system analysis and telecommunications; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-141-151

С.М. Гушанский, В.С. Потапов

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВОГО ЯДРА НА ПЛИС

Метод квантового ядра является одним из важнейших методов в квантовом машинном обучении. Однако количество признаков, используемых для квантовых ядер, ограничено несколькими десятками признаков. Используется структура состояния блочного продукта в качестве карты квантовых признаков и демонстрируется реализация программируемых вентиляльных матриц. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации квантовой вычислительной системы в рамках разработки реализации квантового ядра на ПЛИС для решения классов задач классического характера. Научная новизна данного направления исследований заключается в разработке гибридного симулятора квантового ядра центрального процессорного устройства (ЦПУ) и программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) на несколько порядков быстрее, чем обычный симулятор квантовых вычислений. Эта совместная разработка реализованного квантового ядра и его эффективная реализация ПЛИС позволили выполнить численное моделирование квантового ядра на основе вентилей с точки зрения входных признаков, вплоть до 780-мерных признаков с использованием 4000 выборок. Применили квантовое ядро к задачам классификации изображений с использованием набора данных Fashion-MNIST и показали, что квантовое ядро сравнимо с ядрами Гаусса с оптимизированной пропускной способностью. Проведенный анализ работ данной области показал, что в настоящее время достигнут новый качественный уровень, открывающий перспективные возможности по реализации многокубитовых квантовых вычислений. Перспективы реализации и развития связаны не только с технологическими возможностями, но и с решением вопросов построения эффективных квантовых систем решения актуальных математических задач, задач криптографии и задач управления (оптимизации).

Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор.

S.M. Gushanskiy, V.S. Potapov

STUDY OF A QUANTUM COMPUTING SYSTEM AND IMPLEMENTATION OF A QUANTUM CORE ON FPGA

The quantum core method is one of the most important methods in quantum machine learning. However, the number of features used for quantum nuclei is limited to a few dozen features. The block product state structure is used as a quantum feature map and the implementation of programmable gate matrices is demonstrated. The relevance of these studies lies in the mathematical and software modeling and implementation of a quantum computing system as part of the development of the implementation of a quantum core on FPGA for solving classes of problems of a classical nature. The scientific novelty of this research area is the development of a hybrid simulator of the quantum cores of a central processing unit (CPU) and a programmable logic integrated circuit (FPGA) several orders of magnitude faster than a conventional quantum computing simulator. This joint development of the implemented quantum core and its efficient FPGA imple-

mentation allowed numerical simulation of the quantum core based on gates in terms of input features, up to 780-dimensional features using 4000 samples. We applied the quantum kernel to image classification problems using the Fashion-MNIST dataset and showed that the quantum kernel is comparable to Gaussian kernels with optimized throughput. The analysis of the work in this field has shown that a new qualitative level has now been reached, opening up promising opportunities for the implementation of multi-qubit quantum computing. The prospects for implementation and development are connected not only with technological capabilities, but also with solving the issues of building effective quantum systems for solving actual mathematical problems, cryptography problems and control (optimization) problems.

Modeling; quantum algorithm; qubit; model of a quantum computer; entanglement; superposition; quantum operator.

Введение. Квантовые вычисления [1] – перспективная технология, способная трансформировать многие области промышленности и научных исследований, включая финансы, химию и машинное обучение [2] (МО). В то время как ранние отказоустойчивые квантовые вычисления были продемонстрированы недавно [3], поиски практического использования существующих шумных квантовых процессоров (ШКП) были активной областью исследований [4]. В настоящее время процессоры ШКП доступны через различные облачные платформы квантовых вычислений [5] с ~ 10 –100 физических кубитов [6]. Устройства ШКП по своей природе подвержены ошибкам, и ряд алгоритмов ШКП был предложен в рамках гибридного квантово-классического подхода [7, 8]. Метод квантового ядра является одним из наиболее важных алгоритмов КМО и подходит для устройств ШКП с неглубокими квантовыми схемами [9]. Недостатком вычисления квантового ядра является необходимость проведения ряда измерений для получения элементов квантового ядра [10] с помощью $O(N^4 / \varepsilon^2)$ операций, где N обозначает количество выборок данных, а ε максимальную ошибку. Такая вычислительная сложность становится недопустимой при разработке и проверке квантовых ядер по мере роста N . Кроме того, количество запутывающих кубитов с различной связностью в ранее предложенных квантовых ядрах увеличивается с увеличением количества кубитов, что требует дополнительных вычислительных ресурсов. Чтобы преодолеть вышеуказанные проблемы, введем неглубокую квантовую схему с фиксированной глубиной, которую можно применить к квантовому ядру для большего количества входных функций.

1. Схематическое представление квантового симулятора с использованием гибридного подхода. В настоящее время большинство исследователей используют симуляторы квантовых вычислений на классических платформах; по этой причине были предприняты значительные усилия по разработке симуляторов квантовых вычислений [11]. Среди аппаратных реализаций программируемые вентильные матрицы являются одной из желательных платформ, поскольку ПЛИС обладает свойствами эффективного параллелизма, малой задержки и модификации блоков. Такие свойства особенно подходят для нашего квантового ядра, состоящего из неглубокой квантовой цепи. Здесь совместно разрабатываем нашу архитектуру ПЛИС [12] и квантовое ядро с неглубокой квантовой схемой, что позволяет проводить эффективные численные эксперименты с квантовым ядром. ПЛИС успешно применяется к отказоустойчивым квантовым алгоритмам [13], таким как алгоритм Гровера [14], квантовое преобразование Фурье [15] и алгоритм Дойча [16]. Однако реализация ПЛИС, разработанная для конкретного алгоритма ШКП, в значительной степени не исследована, и настоящее исследование является первой демонстрацией симулятора квантового ядра на основе вентилей с использованием платформы ПЛИС, что позволяет проверить применимость модели КМО с помощью сотни входных функций. Оставшаяся часть теста организована следующим образом. Предоставляем краткое введение в машину опорных векторов и описываем нашу кар-

ту квантовых признаков, основанную на неглубокой квантовой схеме с фиксированной глубиной. В дополнение к такой структуре разрабатываем квантовый симулятор, используя гибридный подход ЦПУ – ПЛИС. Затем реализация квантового ядра ПЛИС проверяется с точки зрения численной точности и ускорения. Применяем симулятор квантового ядра для бинарной и многоклассовой классификации [17] для ряда входных функций с использованием набора данных Fashion-MNIST.

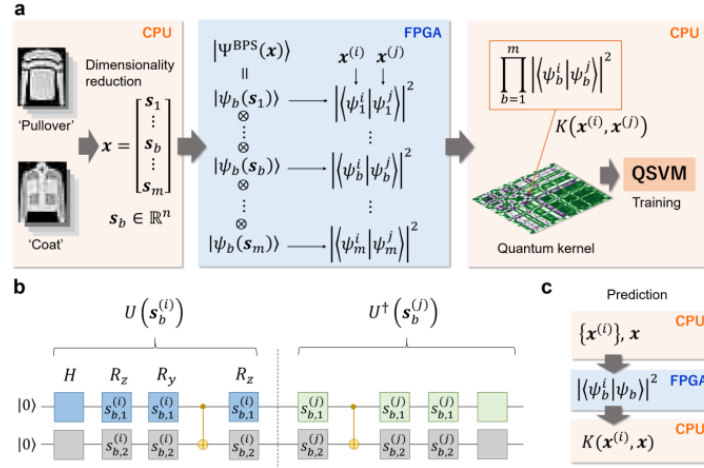


Рис. 1. Схематическое представление квантового симулятора с использованием гибридного подхода

На рис. 1 отображено схематическое представление квантового симулятора. ПК используется для уменьшения размерности исходных данных из Fashion-MNIST, ряд признаков от $d = 4$ до $d = 780$ можно использовать для машинного обучения. Затем функции, уменьшенные с помощью ПК, отправляются из ЦП в ПЛИС. Вычисляем квадрат нормы скалярных произведений для каждой блочной волновой функции $|\psi b\rangle$ карты квантовых признаков. Этот процесс повторяется для всех пар точек данных (т.е. $N^2 / 2$ раза). Затем данные отправляются обратно в ЦП. Значение матрицы ядра можно получить путем умножения блоков m . После того, как все элементы квантового ядра вычислены, алгоритм выполняется на процессоре. Для запутывающего вентиля используется вентиль CNOT.

2. Квантовое ядро, использующее структуру состояния блочного произведения. Метод квантового ядра является одним из наиболее важных алгоритмов в методах квантового машинного обучения [18]. В классическом методе ядра скалярное значение карты признаков представлен функциями ядра, которые неявно используют гильбертово пространство; с другой стороны, квантовое ядро явно определяет карту квантовых признаков с помощью квантового состояния $|\phi(x)\rangle$ для d -мерных входных векторов $x \in R^d$. Матрица квантового ядра $K(x, x')$ может быть оценена путем вычисления скалярного произведения карты квантовых признаков:

$$K(x, x') = |\langle \phi(x) | \phi(x') \rangle|^2. \quad (1)$$

Для бинарной классификации можно получить классификатор опорных векторов, который оценивает метку для новых данных x :

$$y = \text{sgn}(\sum y_i \alpha_i^* K(x^{(i)}, x) + b^*), \quad (2)$$

где $y_i \in \{+1, -1\}$, а параметры $\{\alpha_i^*\}$ и b^* – оптимальные параметры, полученные на этапе обучения. В гибридном квантово-классическом алгоритме фаза обучения [19] может выполняться на классических компьютерах, тогда как элементы квантового ядра могут быть вычислены компьютерами или симуляторами квантовых вычислений. Вычисление квантового ядра требует ряда квантовых измерений [20], чтобы получить запись квантового ядра со статистически достоверной точностью. Такая вычислительная сложность не позволяет разрабатывать и проверять квантовые ядра по мере роста количества выборок данных. Чтобы решить эти проблемы, введем неглубокую квантовую схему с фиксированной глубиной, которую можно применить к квантовому ядру для большего количества входных функций. В ранее предложенных квантовых ядрах [21], основанных на мгновенном квантовом полиноме, количество размерных признаков обычно устанавливается равным количеству квантовой запутанности. Это приводит к ухудшению производительности обобщения по мере увеличения количества кубитов. Цель подхода – упростить карту квантовых признаков, ограничить степень запутанности кубитов и контролировать емкость модели, увеличивая при этом количество входных признаков. Эта структура может обрабатывать несколько сотен входных функций. Для n -мерного входа вектор $x = [s_1, s_2, \dots, s_m]^T \in R^{mn}$, где s_b – m -мерный вектор $s_b = [s_{b,1}, s_{b,2}, \dots, s_{b,n}]^T$. Рассмотрим волновую функцию состояния блочного произведения:

$$|\Psi^{BPS}(x)\rangle = |\psi_1(s_1)\rangle \otimes |\psi_2(s_2)\rangle \otimes \dots \otimes |\psi_m(s_m)\rangle. \quad (3)$$

3. Симулятор квантового ИИ с использованием гибридного подхода ЦПУ-ПЛИС. Совместно разработав архитектуру ПЛИС и квантовое ядро, заданное неглубокой квантовой схемой, реализовали быстрый и эффективный симулятор, используя подход гетерогенных вычислений [22] (рис. 1,а). Для начала с помощью метода главных компонент провели уменьшение размерности данных изображения 28×28 из набора данных Fashion-MNIST, количество входных признаков можно варьировать от $d = 4$ до $d = 780$. После получения редуцированных входных векторов $x^{(i)} \in R^d$ входные данные отправляются из процессора во внутреннюю память аппаратной части ПЛИС. Затем для каждой блочной волновой функции $|\psi_b(s_b)\rangle$ ($b = 1, \dots, m$) карты квантовых признаков вычисляем квадрат

нормы скалярных произведений $|\langle \psi_b^i | \psi_b^j \rangle|^2$ (что изображено на рис. 1,б) на архитектуре ПЛИС в следующей процедуре: во-первых, синус и косинус входных углов для квантовых вентилях вычисляются с использованием алгоритма COordinate Rotational DIgital Computer (CORDIC) [23]. Во-вторых, квадрат нормы скалярного произведения можно вычислить, используя унитарные матрицы в уравнении (4) вместе с эффективной реализацией n -кубитной запутанности. Этот процесс можно повторить для всех пар выборок данных, а именно для $N^2/2$ циклов. Обработанные, действительные данные отправляются обратно в ЦП. Таким образом, матричный элемент ядра будет вычисляться путем умножения m блоков. После того, как все записи ядра будут получены, этап обучения может быть выполнен на платформе ЦП.

4. Разработка квантового ядра на ПЛИС. Начнем со сравнения значений квантового ядра, полученных платформой ПЛИС, и значений, полученных платформой ЦПУ (рис. 2,а–с). В силу ортонормированности волновых функций нормы скалярных произведений $|\langle \psi_b^i | \psi_b^j \rangle|^2$ имеют значения от 0 до 1. Такое свойство

наряду с малой глубиной схемы поддается использованию 16-битной арифметики с фиксированной запятой в архитектуре ПЛИС, что, в свою очередь, ускоряет вычисления при эффективном использовании аппаратного обеспечения. Чтобы проверить реализацию ПЛИС, также использовали 64-битную арифметику с плавающей запятой на платформе ЦП. График четности указывает на успех нашей реализации квантового ядра ПЛИС (рис. 2с). Численное отклонение между двумя аппаратными платформами составляло $\pm 0,095\%$, что указывает на незначительную потерю числовой точности.

Далее сравниваем время выполнения, вычисленное платформой ПЛИС, с временем, полученным реализацией ЦП, а также со временем, полученным Qiskit Aer [24], симулятором квантовых вычислений (рис. 2,д). В реализации после отправки данных в архитектуру ПЛИС используем только внутреннюю память оборудования ПЛИС без использования внешней памяти, что позволяет избежать связанных с этим коммуникационных издержек. В архитектуре ПЛИС все записи ядра вычислялись за 4,1 мс при $N = 1000$; а время выполнения, включая накладные расходы на связь между ЦП и ПЛИС, составило 15,4 мс при $N = 1000$. Другими словами, реализация ПЛИС достигла улучшения в 1784 раза по сравнению с аналогом на ЦП.

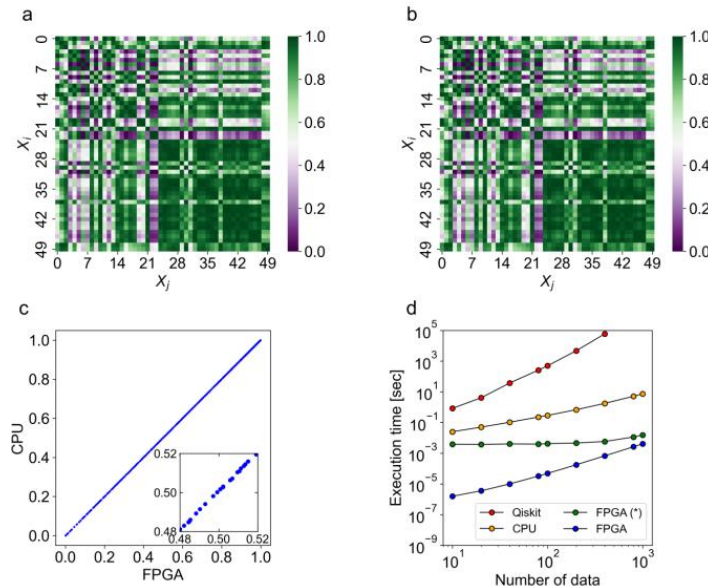


Рис. 2. ПЛИС реализация квантового ядра и время его выполнения.
Численное моделирование было выполнено на квантовой схеме с 6 кубитами,
которая оценивает элемент квантового ядра

А также время выполнения, включая коммуникационные накладные расходы, было в 472 раза быстрее (рис. 2,г); к тому же по сравнению с выполнением на симуляторе Qiskit Aer (где стоимость вычислений растет как $O(N^4 / \epsilon^2)$ операций) ускорение в 10 млн. раз было достигнуто при $N = 400$ (рис. 2,г). Результаты показывают, что реализация ПЛИС очень эффективна с точки зрения количества выборок данных, при этом в карте квантовых признаков используется небольшое количество запутывающих кубитов (до 6 кубитов). Симулятор на основе ПЛИС ускоряет численное моделирование с использованием квантового ядра и позволяет проверить его применимость к гораздо более крупным функциям методов квантового ядра.

а) Матрица квантового ядра, полученная платформой ПЛИС (16-битная арифметика с фиксированной точкой); б) Матрица квантового ядра, полученная процессором; в) График четности для значений квантового ядра, полученных ЦП и платформы ПЛИС. На вставке показаны небольшие различия между ними: ошибка между двумя аппаратными платформами составила $\pm 0,095\%$; д) Время выполнения по количеству данных N для разных платформ: ПЛИС, синий; ПЛИС (включая накладные расходы на связь между ЦП и ПЛИС; обозначено звездочкой), зеленый; процессор, оранжевый; Qiskit Aer (квантовый симулятор), красный. Опишем подход для эффективного моделирования квантового ядра, специально разработанного для архитектуры ПЛИС. Квантовое ядро задается внутренним произведением карты квантовых признаков, что в принципе требует $O(2^{3n})$ операций из-за умножения матриц $2^n \times 2^n$ для создания карты квантовых признаков. Такая вычислительная сложность становится непосильной для эффективной реализации квантовых ядер ПЛИС, поскольку архитектура ПЛИС привязана к памяти, а количество сложных множителей ограничено. По этой причине эффективное использование ресурсов ПЛИС имело решающее значение для расчета нашего квантового ядра. В работе использовали неглубокую квантовую схему, чтобы иметь возможность вычислить квантовое ядро с помощью $O(2^n)$ операций, как увидим ниже. Это позволило эффективно распараллелить и использовать внутреннюю память в ПЛИС. Рассмотрим следующее квантовое состояние:

$$|\psi\rangle = (V_1 \otimes V_2 \otimes \dots \otimes V_n) U_{2^n}^{ent} (U_1 \otimes U_2 \otimes \dots \otimes U_n) |0^{\otimes n}\rangle, \quad (4)$$

где $U_1, U_2, \dots, U_n$ и $V_1, V_2, \dots, V_n$ – однокубитные вентили, а $U_{2^n}^{ent} = \prod_{q=1}^{n-1} CNOT_{q,q+1}$

представляет n-операция запутывания кубитов. Для нашего обсуждения удобно переписать $|\psi\rangle$ как $f = V U_{2^n}^{ent} U f_0$, где f_0 – вектор $[1, 0, \dots, 0]^T$, где $U = U_1 \otimes \dots \otimes U_n$ и $V = V_1 \otimes \dots \otimes V_n$. Во-первых, отметим, что при вычислении $U f_0$ нужен только первый столбец U ; следовательно, $U f_0$ можно получить без необходимости полностью проводить тензорные операции. Обозначим первый вектор-столбец каждого 2×2 унитарная матрица U_q как $[\chi_1^{(q)}, \chi_2^{(q)}]^T$ имеют первый вектор-столбец U как $u = [u_1, u_2, \dots, u_{2^n}]^T \in C^{2^n}$.

$$U f_0 = u = \begin{bmatrix} \chi_1^{(1)} \cdot \dots \cdot \chi_1^{(n-2)} \cdot \chi_1^{(n-1)} \cdot \chi_1^{(n)} \\ \chi_1^{(1)} \cdot \dots \cdot \chi_1^{(n-2)} \cdot \chi_1^{(n-1)} \cdot \chi_2^{(n)} \\ \chi_1^{(1)} \cdot \dots \cdot \chi_1^{(n-2)} \cdot \chi_1^{(n-1)} \cdot \chi_1^{(n)} \\ \chi_1^{(1)} \cdot \dots \cdot \chi_1^{(n-2)} \cdot \chi_1^{(n-1)} \cdot \chi_2^{(n)} \\ \chi_2^{(1)} \cdot \dots \cdot \chi_2^{(n-2)} \cdot \chi_1^{(n-1)} \cdot \chi_1^{(n)} \\ \chi_2^{(1)} \cdot \dots \cdot \chi_2^{(n-2)} \cdot \chi_1^{(n-1)} \cdot \chi_2^{(n)} \\ \chi_2^{(1)} \cdot \dots \cdot \chi_2^{(n-2)} \cdot \chi_2^{(n-1)} \cdot \chi_1^{(n)} \\ \chi_2^{(1)} \cdot \dots \cdot \chi_2^{(n-2)} \cdot \chi_2^{(n-1)} \cdot \chi_2^{(n)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Это вычисление можно выполнить с помощью $4 \cdot (2^{n-1} - 1)$ операций с использованием комплексных множителей в ПЛИС. Таким образом, карту признаков можно переписать как $f = V U_{2^n}^{ent} u$. Далее отметим, что V – диагональная матрица в квантовой схеме, а U^{ent} – разреженная матрица, в которой каждый вектор-строка содержит только один ненулевой элемент. Обозначая диагональные элементы $\{V_{kk}\}$ как $v = [v_1, v_2, \dots, v_{2^n}]^T \in C^{2^n}$, можем вычислить f как $f_k = v_k u_{\xi_k}$. Здесь ξ_k – индекс ненулевого элемента в k -й строке U^{ent} (например, при $n = 2$ $\xi_1 = 1, \xi_2 = 2, \xi_3 = 4, \xi_4 = 3$). Индексы $\{\xi_k\}$ в уравнении (5) можно определить после получения U^{ent} . Наконец, внутренний продукт $\langle \psi^i | \psi^j \rangle$ можно рассчитать как $\sum_k f_k^*(s^{(i)}) f_k(s^{(j)})$. Квантовый симулятор на основе гибридной системы реализован на облачной платформе Amazon Web Services (AWS) [25], в которой доступны экземпляры Amazon EC2 F1 оборудования Xilinx FPGA [26].

5. Сравнение вычислительной сложности пяти классических и квантовых методов для решения транспортной задачи коммивояжера. Сравним сложность пяти классических методов и пяти квантовых методов для решения алгоритма оптимизации. Все изученные алгоритмы были основаны на стандартном подходе дискретизации уравнений с помощью метода конечных разностей, приводящего к системе линейных уравнений. В частности, мы использовали простой метод “прямое время, центральное пространство” (FTCS) с равномерной прямоугольной сеткой. Мы оценили следующие классические алгоритмы:

- ◆ Решение системы линейных уравнений с использованием метода сопряженных градиентов.
 - ◆ Итерация вперед во времени от начального условия.
 - ◆ Использование быстрого преобразования Фурье для решения линейной системы.
 - ◆ Метод случайного блуждания, основанный на связи между уравнением теплопроводности и случайным блужданием по сетке.
- Ускоренная версия метода случайного блуждания, использующая эффективную выборку из биномиального распределения.
- Мы также оценили следующие квантовые алгоритмы:
- ◆ Решение линейной системы с использованием самых быстрых квантовых алгоритмов для решения линейных уравнений.
 - ◆ Диагонализация линейной системы с использованием квантового преобразования Фурье и последующего выбора.
 - ◆ Когерентное ускорение случайного блуждания по сетке.
 - ◆ Применение оценки амплитуды к классическому случайному блужданию по сетке.
 - ◆ Применение оценки амплитуды к быстрому классическому алгоритму случайного блуждания.

Эти методы различаются по своей гибкости. Например, методы квантовых и классических линейных уравнений могут быть применены к гораздо более общим граничным условиям и пространственным областям, тогда как методы быстрого преобразования Фурье и когерентной диагонализации непосредственно применимы только к решению уравнения теплопроводности в простой области. Результаты обобщены в табл. 1, где показываем время выполнения в терминах ϵ , хотя вычислена сложность различных алгоритмов с точки зрения других параметров, подробно описанных ниже.

Таблица 1

Время выполнения алгоритмов для решения транспортной задачи коммивояжера с точностью ϵ в пространственном измерении d , только в терминах ϵ и d . O обозначение скрывает полилогарифмические множители

	Метод	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d \geq 4$
Квантовые аналоги	Линейные уравнения	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2.5})$	$O(e^{-3})$	$O(e^{-d/2-1.5})$
	Пошаговое управление временем	$O(e^{-1.5})$	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2.5})$	$O(e^{-d/2-1})$
	Быстрое преобразование Фурье	$O(e^{-0.5})$	$O(e^{-1})$	$O(e^{-1.5})$	$O(e^{-d/2})$
	Случайное блуждание	$O(e^{-3})$	$O(e^{-3})$	$O(e^{-3})$	$O(e^{-3})$
	Быстрое случайное блуждание	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2})$
Разработанное квантовое ядро	Линейные уравнения	$O(e^{-2.5})$	$O(e^{-2.5})$	$O(e^{-2.75})$	$O(e^{-d/4-2})$
	Ускорение когерентного случайного блуждания	$O(e^{-1.75})$	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2.25})$	$O(e^{-d/4-1.5})$
	Когерентная диагонализация	$O(e^{-1.25})$	$O(e^{-1.5})$	$O(e^{-1.75})$	$O(e^{-d/4-1})$
	Оценка амплитуды случайного блуждания	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2})$	$O(e^{-2})$
	Быстрая оценка амплитуды	$O(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$O(e^{-1})$

При $d = 1$ все квантовые методы на разработанном квантовом ядре превосходят квантовый метод быстрого преобразования Фурье. Для $d \geq 2$ самым быстрым методом является квантовый алгоритм, основанный на применении амплитудного усиления на разработанном квантовом ядре к “быстрому” квантовому случайному блужданию. Для произвольного d наибольшее квантовое ускорение при использовании этого метода составляет от $O(e^{-2})$ до $O(e^{-1})$.

Алгоритмы быстрого преобразования Фурье и быстрой оценки амплитуды случайного блуждания специфичны для прямоугольной области. Учитывая алгоритмы, которые также могут быть применены к более общим областям, самым быстрым квантовым методом для $d \leq 3$ является повторение начального условия вперед по времени на разработанном квантовом ядре. Это превосходит все квантовые методы при $d = 1$, выполняет примерно так же хорошо, как (стандартная) оценка амплитуды случайного блуждания при $d = 2$, и превосходит оценку амплитуды случайного блуждания при $d \geq 3$.

Заключение. В настоящее время активно развивается теория квантовых вычислений. Результаты, полученные в работе, имеют значение для разработки квантовых алгоритмов и проектирования квантовых ядер. Хотя квантовые вычисления еще не готовы к переходу от теории к практике, тем не менее, можно обоснованно догадываться какую форму, возможно, квантовая вычислительная система примет, или, что более важно для дизайна языка программирования, по какому интерфейсу можно будет взаимодействовать с таким квантовым компьютером. Естественно применить уроки, извлеченные из программирования классических вычислений к квантовым вычислениям.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00916.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Квантовая криптография // Википедия. Дата обновления: 05.11.2022. – URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (дата обращения: 05.11.2022).
2. Трубицын А.А. Расчет траектории движения материальной точки в двумерном (осесимметричном) консервативном поле // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1990. – Т. 30, № 7. – П. 1113-1115; U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys. – 1990. – 30:4. – P. 107-109.
3. Arthur Trew (ed.), Greg Wilson (ed.). Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computer Systems. – Springer, 1991. – 392 p. – ISBN 9783540196648.
4. Quantum phase estimation algorithm (2022, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved: 05:15, Nov 3, 2022, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789.
5. Richard G. Milner. A Short History of Spin // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. – arXiv:1311.5016.
6. Гушанский С.М., Потапов В.С. Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.
7. Гушанский С.М. Поленов М.Ю., Потапов В.С. Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двухмерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3 (188). – С. 223-233.
8. Hales S. Hallgren. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12-14, 2000. – P. 515.
9. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes // 2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. – P. 437-441.
10. Lukin M.D. Attractive photons in a quantum nonlinear medium // Ofer Firstenberg, Nature. – October 2013. – Vol. 502.
11. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация = Quantum Computation and Quantum Information. – М.: Мир, 2006.
12. Quantum mechanics. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2022. – URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105.
13. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes // In Proceedings of Eurocrypt. – 2013. – P. 592-608.
14. Chris Ferrie. Quantum Physics for Babies // Sourcebooks Jabberwocky. – Brdbk edition, 2017-05-02. – P. 23-24.
15. Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1296 с. – ISBN 0-07-013151-1.
16. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem // IEEE Transactions on Information Theory. – 2002. – Vol. 48. – P. 2637-2655.
17. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.
18. Потапов В.С., Гушанский С.М. Квантовые типы ошибок и методы их устранения, зависимость ошибки от меры и чистоты запутанности // Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИТСАНУ-2016. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 3. – С. 123-129.
19. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. – Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
20. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito, N. Massively parallel quantum computer simulator // Computer Physics Communications. – Vol. 176. – P. 121-136.
21. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing // Texts in Computer Science. Chapter 2. Quantum Gates. – P. 51-122. – Springer, 2011.

22. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation // *Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Vol. 763. – P. 198-207. – Springer, 2019.
23. Потапов В.С., Гушанский С.М. Разработка и исследование методики построения вычислительной квантовой системы с использованием аппаратных средств оптимизации // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2022. – № 1. – С. 26-32.
24. Milner R.G. A Short History of Spin. In: *Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9–13, 2013. – arXiv:1311.5016. – 2013.
25. Hallgren H.S. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Redondo Beach, CA*. – P. 515. – IEEE, 2000.
26. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes // *Proceedings of Eurocrypt*. – 2013. – P. 592-608.

REFERENCES

1. Kvantovaya kriptografiya [Quantum Cryptography], *Vikipediya* [Wikipedia]. Update date: 05.11.2022. Available at: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (accessed 05 November 2022).
2. Trubitsyn A.A. Raschet traektorii dvizheniya material'noy točki v dvumernom (osesimmetrichnom) konservativnom pole [Calculation of the trajectory of a material point in a two-dimensional (axisymmetric) conservative field], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1990, Vol. 30, No. 7, pp. 1113-1115; U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys., 1990, 30:4, pp. 107-109.
3. Arthur Trew (ed.), Greg Wilson (ed.). Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computer Systems. Springer, 1991, 392 p. ISBN 9783540196648.
4. Quantum phase estimation algorithm (2022, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved: 05:15, Nov 3, 2022, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789.
5. Richard G. Milner. A Short History of Spin, *Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. arXiv:1311.5016.
6. Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Methodology of development and construction of quantum algorithms], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 3, pp. 101-104.
7. Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S. Realizatsiya komp'yuternogo modelirovaniya sistemy s chastitsey v odnomernom i dvukhmernom prostranstve na kvantovom urovne [Implementation of computer simulation of a system with a particle in one-dimensional and two-dimensional space at the quantum level], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3 (188), pp. 223-233.
8. Hales S. Hallgren. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. November 12–14, 2000, pp. 515.
9. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes, *2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, pp. 437-441.
10. Lukin M.D. Attractive photons in a quantum nonlinear medium, *Ofer Firstenberg, Nature*. October 2013, Vol. 502.
11. Nil'sen M., Chang I. Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informatsiya = Quantum Computation and Quantum Information [Quantum computing and quantum information = Quantum Computation and Quantum Information]. Moscow: Mir, 2006.
12. Quantum mechanics. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2022. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105.
13. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, *Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.

14. Chris Ferrie. Quantum Physics for Babies, *Sourcebooks Jabberwocky*. Brdbk edition, 2017-05-02, pp. 23-24.
15. Tomas Kh. Kormen, Charl'z I. Leyzerson, Ronal'd L. Rivest, Klifford SHtayn. Algoritmy: postroenie i analiz = Introduction to Algorithms [Algorithms: Construction and analysis = Introduction to Algorithms]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2006, 1296 p. ISBN 0-07-013151-1.
16. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, pp. 2637-2655.
17. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.
18. Potapov V.S., Gushanskiy S.M. Kvantovye tipy oshibok i metody ikh ustraneniya, zavisimost' oshibki ot mery i chistoty zaputannosti [Quantum types of errors and methods of their elimination, the dependence of error on the measure and purity of entanglement], *Sb. trudov XIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov ITSAiU-2016* [Proceedings of the XIV All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, graduate Students and students of ITSAiU-2016]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, Vol. 3, pp. 123-129.
19. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
20. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito, N. Massively parallel quantum computer simulator, *Computer Physics Communications*, Vol. 176, pp. 121-136.
21. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing, *Texts in Computer Science. Chapter 2. Quantum Gates*, pp. 51-122. Springer, 2011.
22. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation, *Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 763, pp. 198-207. Springer, 2019.
23. Potapov V.S., Gushanskiy S.M. Razrabotka i issledovanie metodiki postroeniya vychislitel'noy kvantovoy sistemy s ispol'zovaniem apparatnykh sredstv optimizatsii [Development and research of a methodology for constructing a computational quantum system using optimization hardware], *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computing systems], 2022, No. 1, pp. 26-32.
24. Milner R.G. A Short History of Spin. In: Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. Charlottesville, Virginia, USA, September 9–13, 2013. arXiv:1311.5016, 2013.
25. Hallgren H.S. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Redondo Beach, CA*, pp. 515. IEEE, 2000.
26. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, *Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Г.В. Куповых.

Гушанский Сергей Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Потапов Виктор Сергеевич – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Gushanskiy Sergey Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Potapov Viktor Sergeevich – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; phone: +78634371656; the department of computer engineering; assistant.

В.Н. Лутай, Н.Ш. Хусайнов**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ**

Рассматривается метод повышения устойчивости линейного регрессионного уравнения, коэффициенты которого являются решением системы нормальных уравнений. Неустойчивость уравнения определяется наличием линейной зависимости между экспериментальными данными, в результате чего в уравнении появляются слишком большие коэффициенты разных знаков. Количественные характеристики зависимости определяются из корреляционной матрицы, которая также может служить матрицей системы уравнений. Для уменьшения коэффициентов корреляции традиционно используется Ridge (гребневая) регрессия, которая предполагает увеличение диагональных членов матрицы на одно и то же положительное число. В результате число обусловленности матрицы уменьшается и уравнение регрессии становится более устойчивым: небольшое изменение входных данных приводит к небольшому изменению решения. Число, на которое увеличиваются диагональные члены матрицы, называется штрафом, накладываемым в гребневой регрессии на все коэффициенты регрессии. В предлагаемом методе штрафы, причем разные, налагаются только на те коэффициенты, которые соответствуют данным с высокой корреляцией. Это приводит к повышению устойчивости уравнения вследствие уменьшения значений коэффициентов, соответствующих коррелированным данным. Выбор элементов, подлежащих увеличению, основывается на анализе корреляционной матрицы исходного набора данных с помощью разложения ее на диагональные матрицы методом квадратных корней. Кроме повышения устойчивости с помощью предлагаемого метода может быть достигнуто снижение размерности регрессионной модели – уменьшение количества членов соответствующего уравнения, для чего обычно используются алгоритмы LASSO и LARS. Эффективность метода проверяется на известном наборе данных, причем выполняется сравнение не только с Ridge-регрессией, но и с результатами известных алгоритмов уменьшения размерности.

Линейная регрессия; нормальные уравнения; корреляционная матрица; штрафы на отдельные коэффициенты уравнения.

V.N. Lutay, N.S. Khusainov**INCREASING THE STABILITY OF LINEAR REGRESSION**

The paper considers a method for increasing the stability of a linear regression equation, the coefficients of which are the solution of a system of normal equations. The instability of the equation is determined by the presence of a linear relationship between the experimental data; the quantitative characteristics of the dependence are determined from the correlation matrix, which can also serve as a matrix of the system of equations. To reduce the correlation coefficients, Ridge (ridge) regression is traditionally used, which involves an increase in the diagonal members of the matrix by the same positive number. As a result, the matrix condition number decreases and the regression equation becomes more stable: a small change in the input results in a small change in the solution. The number by which the diagonal terms of the matrix increase is called the penalty imposed in ridge regression on all regression coefficients. In the proposed method, penalties, and different ones, are imposed only on those coefficients that correspond to data with high correlation. This leads to an increase in the stability of the equation due to a decrease in the values of the coefficients corresponding to correlated data. The choice of elements to be increased is based on the analysis of the correlation matrix of the original data set by decomposing it into diagonal matrices using the square root method. In addition to increasing the stability using the proposed method, a reduction in the dimension of the regression model can be achieved – a decrease in the number of terms of the corresponding equation, for which the LASSO and LARS algorithms are usually used. The effectiveness of the method is tested on a known data set, and a comparison is made not only with Ridge regression, but also with the results of known dimensionality reduction algorithms.

Linear regression; normal equations; correlation matrix; penalties on individual equation coefficients.

Введение. Регрессионные модели широко применяются для анализа и предсказания данных. В работах [1–6] излагаются основы теории, в [8–13] ее применение. Алгоритмы анализа и построения регрессионных моделей являются частью алгоритмов машинного обучения.

Линейная регрессионная модель отражает связь между значениями независимых переменных (предикторами) и объясняющими переменными (откликами):

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad n \geq m,$$

где x_{ij} – наблюдаемое значение предиктора x_j , y_i – значение отклика, β_j – коэффициент регрессионного уравнения. После центрирования наблюдаемых значений [4] линейную регрессионную модель удобно записать в матрично-векторной форме (без β_0)

$$W\bar{b} = \bar{v},$$

где $W = [w_{ij}]_{n \times m}$ – прямоугольная матрица значений предикторов, $\bar{b} = [b_j]_m$ и $\bar{v} = [v_i]_n$ – векторы коэффициентов модели и значений откликов соответственно. Традиционно для получения значений b_j используется метод наименьших квадратов, который сводится к решению системы, называемой нормальными уравнениями, с положительно определенной симметричной матрицей.

$$(W^t W)\hat{b} = W^t \bar{v},$$

где t – символ транспонирования. После определения элементов $\hat{b}$ и обратного перехода к наблюдаемым значениям получим линейную МНК-модель:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^m \hat{\beta}_j x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad n \geq m.$$

Эффективность модели измеряется по сумме квадратов отклонений полученного решения от значений отклика:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2.$$

Если после центрирования выполнить нормирование наблюдаемых переменных, то $W^t W$ становится матрицей парных корреляций предикторов. Диагональные элементы матрицы равны 1, все значения заключены между -1 и 1. По значениям недиагональных членов матрицы можно сделать заключение о взаимной корреляции (коллинеарности) предикторов. Чем больше корреляция между i -м и j -м предикторами, тем ближе значение недиагонального элемента с индексом ij к 1 и тем больше число обусловленности матрицы и дисперсия значений откликов. Если такой элемент матрицы равен 1, то соответствующие предикторы линейно зависимы и матрица сингулярна. Корреляционная матрица зачастую используется в качестве матрицы нормальных уравнений.

Традиционно для анализа и построения регрессионной модели используются алгоритмы Ridge, LASSO, LARS. В Ridge-модели, используемой в случае мультиколлинеарных наборов данных, к матрице $W^t W$ добавляется диагональная матрица λI

$$(W^t W + \lambda I)\bar{b}_\lambda = W^t \bar{v}, \quad (1)$$

где $\bar{b}_\lambda = [b(\lambda)_j]_m$, λ – положительное число, называемое параметром.

Добавление параметра ко всем диагональным членам положительно определенной симметричной матрицы приводит к уменьшению ее числа обусловленности. Значения λ называют штрафом, налагаемым на коэффициенты модели:

$$P(\lambda) = \lambda \sum_{j=1}^m b_j^2.$$

Ridge- модель в этом случае приобретает следующую форму:

$$y(\lambda)_i = \beta(\lambda)_0 + \sum_{j=1}^m \beta(\lambda)_j x_{ij}. \quad (2)$$

При увеличении λ дисперсия уменьшается, но возрастает смещение коэффициентов регрессии $\beta(\lambda)$ от значений МНК, так как при $\lambda \rightarrow \infty$ значения $b_\lambda \rightarrow 0$. Ridge-коэффициенты можно рассматривать как линейные комбинации МНК-оценок.

LASSO [14, 15] заключается во введении ограничения на норму вектора коэффициентов модели, что приводит к обращению в 0 некоторых из них. Алгоритм LARS (метод наименьших углов) [16] может уменьшать размерность модели, анализируя вклад предикторов в отклик аналогично методу пошаговой регрессии. Последний в [17] рассматривается как наилучший способ построения линейной модели.

Далее рассматривается метод понижения числа обусловленности матрицы, отличный от Ridge-модели тем, что увеличиваются не все диагональные члены матрицы, а только те, которые являются причиной большой коллинеарности модели. При этом добавляемые параметры для разных членов могут быть различными. Такой способ регуляризации будем называть выборочным (SR).

Выбор диагональных элементов. Обозначим A матрицу $W^t W$ и запишем результат треугольной декомпозиции ее методом Холецкого, который является одним из популярных методов решения систем ЛАУ с симметричной матрицей:

$$A = LL^t,$$

где L – верхняя треугольная матрица.

Число обусловленности матрицы A можно уменьшить, если уменьшить число обусловленности ее множителей, так как:

$$\text{cond}(A) \leq \text{cond}(L)^2.$$

В [18] показано, что нижняя граница числа обусловленности треугольной невырожденной матрицы имеет следующий вид:

$$\text{cond}(L) \geq \frac{\max_{ij} |l_{ij}|}{\min_{ij} |l_{ij}|}.$$

Таким образом, для уменьшения числа обусловленности матрицы A следует увеличивать минимальный диагональный элемент L и не увеличивать максимальный. Ниже приведены формулы для вычисления диагональных элементов треугольной матрицы L [19].

$$l_{ii} = \sqrt{a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}^2}, i = 2, n. \quad (3)$$

Для получения коэффициентов системы уравнений решаются две системы с треугольными матрицами

$$L\bar{z} = W^t \bar{v}, L^t \hat{b} = \bar{z}. \quad (4)$$

В [20] показано, что увеличение i -го диагонального элемента треугольной матрицы в процессе треугольного разложения равносильно тому, что разложению подвергается матрица A с увеличенным a_{ii} без изменения остальных диагональных элементов. Из этого следует, что если в процессе факторизации произошло увеличение нескольких диагональных элементов треугольной матрицы, то такое разложение является точным разложением следующей полной матрицы

$$LL^t = A + S,$$

где S – матрица, ненулевые элементы которой расположены на главной диагонали и их индексы совпадают с индексами тех диагональных элементов треугольной матрицы, которые увеличиваются в процессе разложения. Верно и обратное: из (3) следует, что при увеличении a_{ii} на δa_{ii} значение l_{ii} увеличивается на δl_{ii} согласно следующему соотношению (все величины неотрицательные):

$$\delta l_{ii}^2 + 2\delta l_{ii} = \delta a_{ii}$$

Из вышесказанного вытекает, что увеличением a_{ii} может уменьшить число обусловленности A .

Рассмотрим вопрос о выборе подходящего a_{ii} . С этой целью обратимся к результату разложения матрицы по Холецкому. В качестве примера ниже приведены соответствующие матрицы для $n=3$, а в (5) – выражения для диагональных элементов треугольной матрицы.

$$\begin{bmatrix} l_{11} & 0 & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} & l_{31} \\ 0 & l_{22} & l_{32} \\ 0 & 0 & l_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} l_{11} &= 1, \\ l_{22}^2 &= a_{22} - a_{12}^2, \\ l_{33}^2 &= a_{33} - a_{13}^2 - (a_{23} - a_{12}a_{13})^2 / l_{22}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Из приведенных выражений следует, что если диагональные элементы A равны 1 (как в корреляционной матрице), то величина l_{ii} зависит от элементов матрицы A в i -ом столбце (a_{12} и a_{13} соответственно): если в i -ом столбце корреляционной матрицы находится большое число, то l_{ii} мало. Увеличение этого члена приводит согласно (4) к уменьшению соответствующего коэффициента регрессионного уравнения и, следовательно, к уменьшению влияния соответствующего предиктора на отклик.

После увеличения одного или нескольких диагональных элементов корреляционной матрицы, выбранных по соответствующей треугольной матрице, по аналогии с (1) можно записать

$$(W^t W + S) \bar{b}_s = W^t \bar{v}.$$

Регрессионная модель в этом случае выглядит так

$$\begin{aligned} y_i(s) &= \sum_{j=0}^m \beta_j(s) x_{ij}, \\ i &= \overline{1, n} \end{aligned} \quad (6)$$

Положим, что количество ненулевых диагональных членов в S равно k . Тогда штраф налагается не на все параметры модели, а только на k из них:

$$P(s) = \sum_{j=1}^k s_{jj} b_j^2.$$

Вычислительные эксперименты. Для анализа эффективности предлагаемого метода были использованы данные Хальда, подробно проанализированные в [8]. В этом наборе данных число наблюдений 13, количество предикторов 4. Корреляционная матрица имеет следующий вид (все вычисления и построение графиков выполнены на языке Python):

$$\begin{bmatrix} 0.999 & 0.228 & -0.824 & -0.245 \\ 0.228 & 1.0 & -0.139 & -0.972 \\ -0.824 & -0.139 & 0.999 & 0.029 \\ -0.245 & -0.972 & 0.029 & 1.0 \end{bmatrix}.$$

Из вида матрицы следует, что взаимная корреляция велика между 1-м и 3-м предикторами и между 2-м и 4-м. Значения диагональных элементов треугольной матрицы соответствуют этому:

$$l_{11} = 0.999; l_{22} = 0.973; l_{33} = 0.564; l_{44} = 0.0594.$$

Таким образом, для снижения числа обусловленности матрицы следует увеличивать ее 3-й и 4-й диагональные элементы.

При выполнении численных расчетов следует иметь в виду, что при увеличении значения $l_{ii}, i > 1$ посредством увеличения a_{ii} недиагональные члены l_{ji} уменьшаются, а диагональные $l_{jj}, j > i$ увеличиваются. При этом элемент треугольной матрицы l_{11} остается равным 1. Поэтому желательно, чтобы диагональные элементы треугольной матрицы с возрастанием i уменьшались так, чтобы минимальный член был последним. Это можно сделать посредством перестановки столбцов предикторов. В нашем случае это условие выполнено.

В табл. 1 приведены характеристики алгоритма SR при увеличении параметра λ и соответствующих диагональных элементов матрицы в сравнении с Ridge-регрессией.

Таблица 1

Сравнительные характеристики выборочной регуляризации и Ridge

№	$cond(W^t W)$	λ	δa_{33}	δa_{44}	Смещение оценки	
					R	SR
1	1400	0	0	0	0	0
2	400	0.004	0.005	0.007	0.26	0.15
3	140	0.015	0.01	0.03	0.33	0.21
4	60	0.038	0.05	0.07	0.35	0.21
5	18	0.12	0.1	0.3	0.38	0.23
6	8	0.35	0.5	0.8	0.42	0.23
7	7	0.45	0.7	1	0.44	0.23
8	7	0.55	0.8	1.1	0.45	0.23

Второй столбец таблицы – числа обусловленности матрицы, третий – значения параметра λ , соответствующего этим числам. Далее идут столбцы значений, добавляемых к 3-му и 4-му диагональным элементам исходной корреляционной матрицы, а в столбцах R и SR приведены значения смещения математического ожидания для Ridge-регрессии и предлагаемого метода.

На рис. 1 приведены графики изменения $\beta_i(s)$ из (6) (сплошные линии) и $\beta_i(\lambda)$ из (2) (пунктирные) в зависимости от уменьшения числа обусловленности (цифры на оси x соответствуют первому столбцу табл. 1). Рисунок показывает, что $\beta_3(s)$ и $\beta_4(s)$ имеют меньшие абсолютные значения, чем $\beta_3(\lambda)$ и $\beta_4(\lambda)$. Значения β_0 , не приведенные на рис. 1, снижаются с уменьшением числа обусловленности с 55 до 51 для SR и повышаются с 75 до 89 для Ridge-регрессии.

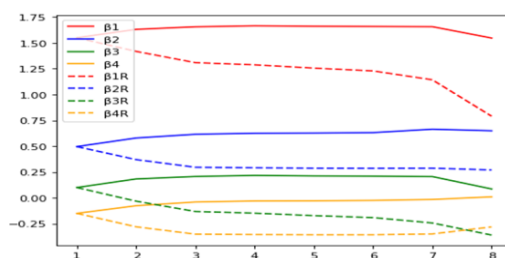


Рис. 1. Коэффициенты регрессии для Ridge и SR.

Оптимальное значение λ , выбранного в [17] для данных Хальда, равно 0.013. В табл. 1 этому значению соответствует точка 3; значения коэффициентов регрессии для Ridge и SR сведены в табл. 2. Из последнего столбца следует, что SR уменьшает β_4 в соответствии с тем обстоятельством, что четвертый предиктор наиболее коррелирован.

Таблица 2

Коэффициенты регрессии для $\lambda = 0.013$.

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
SR	50.746	1.674	0.629	0.227	-0.0268
Ridge	83.437	1.308	0.297	-0.133	-0.351

На рис. 2 показаны зависимости значений SSE при уменьшении числа обусловленности матрицы. Значения SSE для Ridge-регрессии резко возрастают при увеличении параметра регуляризации.

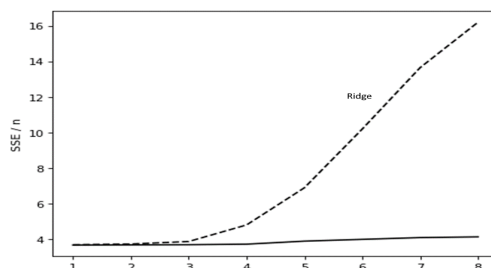


Рис. 2. Значения SSE для Ridge регрессии (пунктирная линия) и для SR (сплошная)

На рис. 3 приведены графики, отражающие результаты сравнения SR со значениями, полученными при использовании функции `linear_model.LassoLars()`, которая реализует совместно алгоритмы Lasso и LARS. Далее такое объединение сокращенно называется Lars. Единицами оси x на этом и на следующем рисунке выбраны приведенные в таблице 3 номера, каждому из которых соответствует значения параметра α в алгоритме Lars и значения $\delta_{a_{33}}$ и $\delta_{a_{44}}$ (так как их начальным значением в табл. 3 является последнее значение табл. 1, то ось x на рис. 3 и 4 можно рассматривать как продолжение той же оси на рис. 1 и 2.)

Таблица 3

Соответствие параметра Lars и значений изменяемых диагональных элементов членов матрицы

№	8	9	10	11	12	13	14	15
α (LARS)	0.01	0.015	0.018	0.02	0.025	0.03	0.035	0.05
$\delta a_{33}(\delta a_{44})$	1.1	1.2	1.5	1.8	2.2	3.0	3.3	4.0

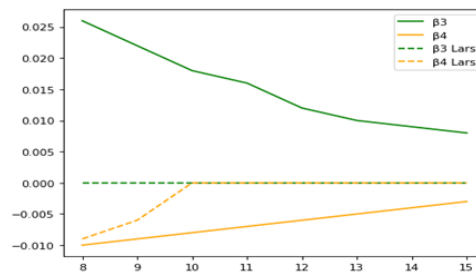


Рис. 3. Коэффициенты регрессии для Lars и SR

Значения β_3 и β_4 для LARS, начиная с точки 10, равны 0. В SR эти коэффициенты малы, но 0 не равны. С возрастанием δa_{33} и δa_{44} их абсолютные значения уменьшаются; в точке 14 по сравнению со значениями β_1 и β_2 становятся незначительными и могут не учитываться в регрессионном уравнении.

На рис. 4 показаны изменения SSE для Lars и SR. Из него следует, что SSE в точке 14, в которой для SR β_3 и β_4 были приняты равными 0, меньше, чем у Lars в точке 10.

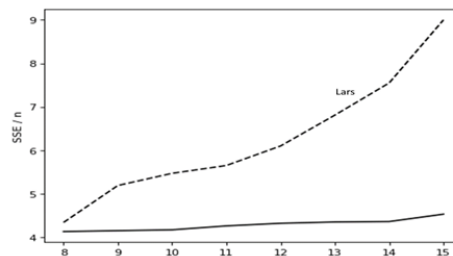


Рис. 4. Изменения SSE для LARS и SR

Заключение. В работе получены следующие результаты:

- ♦ показано, что увеличение нескольких диагональных членов корреляционной матрицы или матрицы нормальных уравнений приводит к увеличению устойчивости регрессионного уравнения так же, как и в Ridge-регрессии при увеличении всех диагональных элементов;
- ♦ в отличие от Ridge увеличение диагональных элементов приводит к уменьшению значений коэффициентов регрессии, соответствующих коллинеарным предикторам;
- ♦ эффективность метода в плане уменьшения размерности модели сравнима с известными алгоритмами Lasso и LARS; при этом метод существенно проще и показывает на приведенных экспериментальных данных лучший результат по среднеквадратическому отклонению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ohlsson H., Ljung L. Identification of switched linear regression models using sum-of-norms regularization // *Automatica*. – 2013. – Vol. 149 (4). – P. 1045-50.
2. Hahn P.R., Carvalho C.M., Puelz D., He J. Regularization and confounding in linear regression for treatment effect estimation // *Bayesian Analysis*. – 2018. – Vol. 13 (1). – P. 163-82.
3. Cui Q., Xu Y., Zhang Z., Chan V. Max-linear regression models with regularization // *Journal of Econometrics*. – 2021. – Vol. 222 (1). – P. 579-600.
4. Yan X. *Linear Regression Analysis: Theory and Computing*. – World Scientific Publishing Company, 2009.
5. Альберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание: пер. с англ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. – 224 с.
6. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ: пер. с англ. / под ред. М.Б. Мalyutova. – М.: Мир.
7. Носко В.П. Эконометрика: учебник. – М.: ИД Дело РАНХиГС, 2011. – 672 с.
8. Успенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. – М.: Изд-во МГУ, 1975.
9. Горидько Н.П., Нижегородцев Р.М. Современный экономический рост: теория и регрессионный анализ: монография. – М.: Инфра-М, 2017. – 444 с.
10. Есаулов И.Г. Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad: учеб. пособие. – СПб.: Лань П, 2016. – 224 с.
11. Карлберг К. Регрессионный анализ в Microsoft Excel. – М.: Диалектика, 2019. – 400 с.
12. Соколов Г.А. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике: учеб. пособие. – М.: Инфра-М, 2016. – 352 с.
13. Факторный анализ преступности: корреляционный и регрессионный методы: монография / под ред. С.М. Иншакова. – М.: Юнити, 2014. – 127 с.
14. Trevor H., Tibshirani, R., Wainwright, M. *Statistical Learning with Sparsity: The Lasso and Generalizations*. – Chapman&Hall, 2015.
15. Мелкумова Л.Э., Шатских С.Я. Сравнение методов Ридж-регрессии и LASSO в задачах обработки данных // Сб. трудов III международной конференции и молодежной школы. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. – 2017. – С. 1755-62.
16. Efron B., Hastie T., Johnstone J., Tibshirani R. Least Angle Regression // *The Annals of Statistics*. – 2004. – Vol. 32. – P. 407-99.
17. Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – 2-е изд.: пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986.
18. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов: пер. с англ. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
19. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
20. Лутай В.Н. Повышение устойчивости треугольного разложения плохо обусловленных матриц // *СибЖВМ*. – 2019. – № 4. – Т. 22. – С 465-73.

REFERENCES

1. Ohlsson H., Ljung L. Identification of switched linear regression models using sum-of-norms regularization, *Automatica*, 2013, Vol. 149 (4), pp. 1045-50.
2. Hahn P.R., Carvalho C.M., Puelz D., He J. Regularization and confounding in linear regression for treatment effect estimation, *Bayesian Analysis*, 2018, Vol. 13 (1), pp. 163-82.
3. Cui Q., Xu Y., Zhang Z., Chan V. Max-linear regression models with regularization, *Journal of Econometrics*, 2021, Vol. 222 (1), pp. 579-600.
4. Yan X. *Linear Regression Analysis: Theory and Computing*. World Scientific Publishing Company, 2009.
5. Al'bert A. Regressiya, psevdoinversiya i rekurrentnoe otsenivanie [Regression, pseudo-inversion and recurrent estimation]: trans. from engl. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1977, 224 p.
6. Seber Dzh. Lineynyy regressionnyy analiz [Linear regression analysis]: trans. from engl., ed. by M.B. Malyutova. Moscow: Mir.

7. Nosko V.P. *Ekonometrika: uchebnik* [Econometrics: textbook]. Moscow: ID Delo RANKHiGS, 2011, 672 p.
8. Uspenskiy A.B., Fedorov V.V. *Vychislitel'nye aspekty metoda naimen'shikh kvadratov pri analize i planirovanii regressionnykh eksperimentov* [Computational aspects of the least squares method in the analysis and planning of regression experiments]. Moscow: Izd-vo MGU, 1975.
9. Gorid'ko N.P., Nizhegorodtsev R.M. *Sovremennyy ekonomicheskiy rost: teoriya i regressionnyy analiz: monografiya* [Modern economic growth: theory and regression analysis: monograph]. Moscow: Infra-M, 2017, 444 p.
10. Esaulov I.G. *Regressionnyy analiz dannykh v pakete Mathcad: ucheb. posobie* [Regression analysis of data in the Mathcad package: tutorial]. Saint Petersburg: Lan' P, 2016, 224 p.
11. Karlberg K. *Regressionnyy analiz v Microsoft Excel* [Regression analysis in Microsoft Excel]. Moscow: Dialektika, 2019, 400 p.
12. Sokolov G.A. *Vvedenie v regressionnyy analiz i planirovanie regressionnykh eksperimentov v ekonomike: ucheb. posobie* [Introduction to regression analysis and planning of regression experiments in economics: textbook]. Moscow: Infra-M, 2016, 352 p.
13. *Faktornyy analiz prestupnosti: korrelyatsionnyy i regressionnyy metody: monografiya* [Factor analysis of crime: correlation and regression methods: monograph], ed. by S.M. Inshakova. Moscow: Yuniti, 2014, 127 p.
14. Trevor H., Tibshirani, R., Wainwright, M. *Statistical Learning with Sparsity: The Lasso and Generalizations*. Chapman&Hall, 2015.
15. Melkumova L.E., Shatskikh S.Ya. *Sravnenie metodov Ridzh-regressii i LASSO v zadachakh obrabotki dannykh* [Comparison of Ridge regression and LASSO methods in data processing problems], Cb. trudov III mezhdunarodnoy konferentsii i molodezhnoy shkoly [Proceedings of the III International Conference and Youth School]. Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, 2017, pp. 1755-62.
16. Efron B., Hastie T., Johnstone J., Tibshirani R. *Least Angle Regression, The Annals of Statistics*, 2004, Vol. 32, pp. 407-99.
17. Dreyper N., Smit G. *Prikladnoy regressionnyy analiz* [Applied Regression analysis]. 2nd ed.: trans. from engl. Moscow: Finansy i statistika, 1986.
18. Louson Ch., Khenson R. *Chislennoe reshenie zadach metoda naimen'shikh kvadratov* [Numerical solution of problems of the least squares method]: trans. from engl. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986.
19. Voevodin V.V., Kuznetsov Yu.A. *Matritsy i vychisleniya* [Matrices and calculations]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1984.
20. Lutay V.N. *Povyshenie ustoychivosti treugol'nogo razlozheniya plokho obuslovlennykh matrity* [Increasing the stability of the triangular decomposition of poorly conditioned matrices], *SibZhVM* [Siberian Journal of Computational Mathematics], 2019, No. 4, Vol. 22, pp. 465-73.

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

Лутай Владимир Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: vnlutay@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282276002; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Хусайнов Наиль Шявкатович – e-mail: khusainov@sfedu.ru; тел.: 89034613347; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; зав.кафедрой; к.т.н.; доцент.

Lutay Vladimir Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: vnlutay@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79282276002; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associated professor.

Khusainov Nail' Shyavkatovich – e-mail: khusainov@sfedu.ru; phone: +79034613347; the department of computer aided design; head of department; cand. of eng. sc.; associated professor.

И.А. Попов**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АВТОПИЛОТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ САМОЛЕТА-АМФИБИИ БЕ-200 ВО ВРЕМЯ ЗАБОРА ВОДЫ**

Статья посвящена решению проблемы управления самолетом-амфибией Бе-200 при заборе воды в режиме глиссирования. Указанный режим полета самолета-амфибии (СА) относится к одному из самых напряженных для пилотирования. Управление самолетом в режиме глиссирования требует от летчика высочайшей концентрации, поскольку гидродинамические характеристики уменьшаются, но растут аэродинамические, из-за чего появляются ситуации, при которых СА становится неуправляемым. Для обеспечения безопасной эксплуатации СА во время забора воды, а также обеспечения установившегося взлета, летчик вынужден постоянно выдерживать определенное значение скорости, угла дифферента, а также тяги двигателя путем перебора ручки управления двигателем (РУД). В этой связи, представляется весьма целесообразным использование технических средств автопилота, обеспечивающего контроль скорости, тяги двигателя и угла дифферента для обеспечения устойчивости движения СА во время забора воды. В работе рассматривается проблема синтеза автопилота для управления движением самолета-амфибии во время забора воды, и при этом решаются следующие задачи: синтез автопилота для управления продольным движением самолета-амфибии, а также управлением посадкой на воду с последующим забором воды и взлетом с воды. Приведено обоснование выбора математической модели движения самолета на воде. Представлена процедура синергетического синтеза регулятора автопилота самолета-амфибии в режиме забора воды. Новизна проводимого исследования заключается не только в рассмотрении устойчивого движения самолета-амфибии во время его эксплуатации на водной поверхности, а также и в моделировании самого процесса забора воды на глиссировании, что является более комплексной задачей с точки зрения синтеза. В результате были получены законы управления для автопилота, обеспечивающие устойчивое движение самолета-амфибии при снижении по глиссаде, посадке на воду, заборе воды и последующем взлете с демпфированием продольных колебаний по углу дифферента на всем цикле водозабора.

Самолет-амфибия; Бе-200; режим глиссирования; скольжение по воде; забор воды; синергетический синтез; автопилот; демпфирование колебаний.

I.A. Popov**SYNERGETIC SYNTHESIS OF AN AUTOPILOT TO CONTROL THE BE-200 AMPHIBIAN AIRCRAFT DURING WATER INTAKE**

The article is devoted to solving the problem of controlling the Be-200 amphibious aircraft when taking water in the gliding mode. The specified mode of flight of an amphibious aircraft (AA) is one of the most intense for piloting. Controlling an aircraft in gliding mode requires the highest concentration from the pilot, since the hydrodynamic characteristics decrease, but the aerodynamic ones increase, which causes situations in which the SA becomes uncontrollable. To ensure the safe operation of the AA during water intake, as well as to ensure a steady takeoff, the pilot is forced to constantly maintain a certain value of speed, trim angle, and engine thrust by moving the engine control stick (ECS). In this regard, it seems very appropriate to use the technical means of the autopilot, which provides control of the speed, engine thrust and trim angle to ensure the stability of the movement of the SA during the intake of water. The article deals with the problem of synthesizing an autopilot to control the movement of an amphibian aircraft during water intake, and at the same time the following tasks are solved: the synthesis of an autopilot to control the longitudinal movement of an amphibian aircraft, as well as control landing on water, followed by water intake and takeoff from the water. The substantiation of the choice of a mathematical model of the movement of an aircraft on water is given. A procedure for the synergistic synthesis of the autopilot controller of an amphibious aircraft in the water intake mode presented. The novelty of the ongoing research lies not only in considering the stable movement of an amphibious aircraft during its operation on the water surface, but also in modeling the process of water

intake in planning mode, which is a more complex task from the point of view of synthesis. As a result, the control laws for the autopilot obtained, which ensure the stable movement of the amphibious aircraft when descending along the glide path, landing on water, taking in water and subsequent takeoff with damping of longitudinal oscillations along the trim angle throughout the entire water intake cycle.

Amphibious aircraft; Be-200; gliding mode; water gliding; water intake; synergetic synthesis; autopilot; oscillations damping.

Введение. Одним из характерных режимов полета любого самолета-амфибии (СА) является режим глиссирования – режим движения, при котором самолет удерживается на воде за счет его скоростного напора (скольжения). Данный режим движения возникает благодаря специальной форме корпуса, а также из-за большой скорости движения лодки. При коэффициенте числа Фруда $F_r > 3$ гидродинамическая сила становится основной силой поддержания объекта на воде, происходит всплывание судна на определенный угол дифферента φ . В результате общая масса лодки практически полностью уравнивается гидродинамической подъемной силой.

При скольжении самолета по воде и смачиваемая поверхность корпуса гидросамолёта, и возмущение воды, вызванное движением гидросамолёта, существенно меньше, чем при «нормальном» плавании с той же скоростью. Соответственно, уменьшаются и затраты энергии на преодоление сопротивления воды движению летательного аппарата. Подъемная сила гидросамолёта, позволяющая реализовать режим глиссирования, является суммой аэродинамической подъемной силы крыла и динамической реакции воды. Для этого днище гидросамолёта выполняется с реданом и скулами. Такая форма днища способствует срыву струй на режиме глиссирования, вследствие чего уменьшаются смачиваемая поверхность корпуса и сила трения о воду [1].

В настоящей статье представлено решение задачи синергетического синтеза автопилота для управления СА в режиме забора воды и учитывающая специфику движения на границе сред.

Особенности режима глиссирования. Ключевая особенность режима глиссирования СА – существование граничных значений углов дифферента, выход за которые влечет за собой возникновение продольных колебаний даже на спокойной воде, что создает существенные проблемы управления самолетом-амфибией, особенно на высоких скоростях глиссирования [2]. В проектировании гидросамолетов устанавливаются границы устойчивости движения СА по воде, выход за которые означает потерю устойчивости (рис. 1).

Наиболее эффективное глиссирование лодки достигается при наличии редана – ступеньки на днище, которая служит для отрыва потока от днища и уменьшения смачиваемой поверхности лодки, что, в свою очередь, ведет к уменьшению гидродинамического сопротивления.

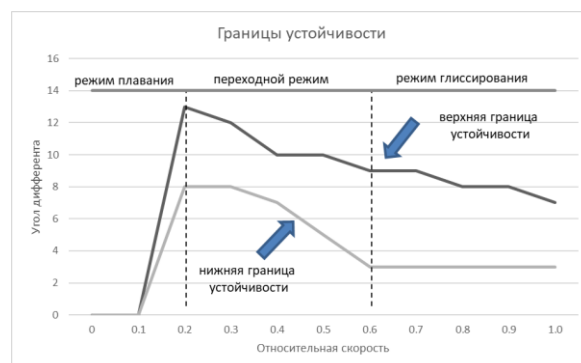


Рис. 1. Границы устойчивости самолета-амфибии

При изучении особенностей режима глиссирования также важно знать, что возникающие колебания по углу дифферента (продольные угловые колебания в вертикальной плоскости) также способствуют появлению наибольших вертикальных перемещений (колебаний) центра тяжести гидросамолета, что является главной причиной потери путевой устойчивости.

Процесс разбега СА не всегда может окончиться успешным взлетом, т.к. в целом ряде случаев сопротивление воды оказывается столь значительным, что максимальная тяга СА, вполне достаточная для его полета в воздухе, не может поспособствовать самолета в достижении скорости отрыва с водной поверхности [3].

Гидродинамика глиссирующего судна. При движении гидросамолёта на воде вся смоченная поверхность его лодки и поплавков подвергается силовому воздействию со стороны воды. Находясь в движении и противодействуя возникающим силам, гидросамолёт расходует свою энергию, которая передается воде. Эта энергия остаётся в ней в виде энергии движения, превращающейся в тепло и со временем затухающей. Со стороны воды на корпус лодки действуют сила гидродинамического подталкивания и сила сопротивления движению глиссирования на воде.

Взаимодействие вязких свойств воды и воздуха приводит к возникновению аэро- и гидродинамических сил и моментов, постоянно действующих на гидросамолет. Отличие движения тела в воздухе от движения в воде с точки зрения физики является только количественным, эти физические процессы подобны. Как правило, различаются только коэффициенты жидкости и газа (плотность, вязкость и т.д.) [4].

В соответствии с законами аэро- и гидродинамики, действующими в процессе разбега, несущие поверхности по мере увеличения скорости движения гидросамолета начинают нести все больший вес, помогая этим самым гидростатическим силам, действующим на днище лодки, выталкивать самолет из воды. И в тот момент, когда гидросамолет приобретает скорость, при которой подъемная сила крыльев становится равна весу, происходит отрыв самолета с воды [5].

Описание физических явлений, возникающих при глиссировании, является достаточно сложной задачей, поскольку картина изменения и распределения скоростей и давлений обтекающего лодку потока значительно затрудняет разработку законов, наиболее адекватно и достоверно описывающие явление глиссирования на высоких скоростях.

При переходе в режим глиссирования происходит резкое снижение волнообразования вокруг корпуса, за счет чего уменьшается общее сопротивление. При движении в режиме глиссирования из-за увеличения скорости движения судна общее сопротивление судна возрастает прямо пропорционально увеличению сопротивления трения [6]. Скачки сопротивления особенно заметны на реданных судах.

Одной из важных особенностей режима глиссирования является появление существенных нагрузок на корпус лодки самолета-амфибии, что является результатом ударного (динамического) взаимодействия с водой, что особенно сильно проявляется при волновых возмущениях.

Образование брызговых струй, волн и сильных перепадов давления сильно влияют на определение движения массы возмущенной воды вокруг глиссирующего судна, что, в свою очередь, влияет на возникновение наибольших продольных колебаний гидросамолета по углу дифферента (продольные угловые колебания в вертикальной плоскости).

Основными проблемами при исследовании явления глиссирования твёрдых тел по поверхности жидкости заключается в определении гидродинамических сил, действующих на тело, а также в решении проблемы удара об воду твердого тела.

Ключевые особенности забора воды СА. Самым оптимальным режимом для забора воды является режим глиссирования. Это обусловлено несколькими факторами [7]:

- ♦ высокий диапазон скоростей, из-за чего самолет после набора воды сразу может взлететь;
- ♦ интенсивный рост аэродинамических характеристик (по сравнению с режимом плавания и переходным режимом), что позволит легко компенсировать вес набранной воды увеличивающейся подъемной силой крыла;
- ♦ незначительное влияние гидростатических характеристик (практически нет осадки, нагрузки на воду от веса самолета, брызгообразования и заливания надводных частей);
- ♦ суммарное (аэродинамическое+гидродинамическое) сопротивление самолета на высоких скоростях меньше, чем на низких из-за физического процесса изменения сил, действующих на самолет.

Однако, из-за динамики движения самолета по воде на больших скоростях, возникают свои проблемы, требующие внимания, а именно:

- ♦ большой разброс значений скорости самолета из-за худших (по сравнению с сухой взлетно-посадочной полосой (ВПП)) возможностью визуального контроля высоты (проблема посадки на воду, удар об воду твердого тела);
- ♦ при заборе воды, чтобы избежать преждевременного взлета, пилот постоянно регулирует скорость, перебирая РУДы «по состоянию», что требует повышенной концентрации только из-за контроля скорости. Из-за инерционности самолета это регулирование скорости не может быть точным, поэтому сильно повышается вероятность «провалов» скорости, что, в результате, может повлиять как на величину дистанции забора воды, так и на возможность выполнения правильного взлета с воды в соответствии с разработанной методикой.

Скорость при заборе воды должна выдерживаться автоматически, при этом разрабатываемая автоматика должна управлять как положением водозаборного устройства (ВЗУ), так и тягой двигателя.

Набор воды на глиссировании должен выполняться таким образом, чтобы не превысить максимально допустимый вес самолета. В системе набора воды на самолете Бе-200 предусмотрены 3 варианта количества забираемой воды: 6т, 9т и 12т. Пилот, при заходе на посадку, зная остаток топлива и посадочный вес самолета, устанавливает возможное количество воды из условия не превышения максимального взлетного веса самолета G_{max} :

$$G_{max_vzl} = G_{pos} + G_{vod} \leq G_{max}, \quad (1)$$

где G_{pos} – вес самолета при посадке,

G_{vod} – количество забираемой воды,

G_{max} – максимальный взлетный вес (у Бе-200 максимальный взлетный вес $G_{max} = 43т$) [8].

Математическая модель СА во время забора воды. Наиболее сложной задачей при разработке математической модели движения самолета-амфибии в режиме глиссирования является нахождение коэффициентов гидродинамических сил и моментов, действующих на объект.

В данной работе рассматривалось только продольное движение СА. При построении математической модели считается, что углы крена и рыскания СА пренебрежимо малы, а соответствующие им угловые скорости и ускорения равны нулю [9]. Тогда полученная в итоге система уравнений динамики СА имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\vartheta - \theta) + \frac{qS}{m} (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta)) - c_W, \\
 \dot{\theta} &= -\frac{g}{V} \cos \theta + \frac{P}{mV} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \frac{qS}{mV} (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta)) + c_B, \\
 \dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z} (m_z - m_{z_h}) \\
 \dot{x} &= V \cos \theta, \\
 \dot{H} &= V \sin \theta, \\
 \dot{\vartheta} &= \omega_z,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где V – скорость движения самолета;

$\dot{\theta}$ – угол наклона траектории;

ω_z – угловая скорость;

x – перемещение;

H – высота;

$\dot{\vartheta}$ – угол тангажа.

Гидродинамические характеристики самолета определены по данным буксировочных испытаний моделей самолета Бе-200 в гидроканале ЦАГИ [10]. При помощи теории подобия был сделан пересчет полученных характеристик с модельных значений на натурные, после чего получены безразмерные коэффициенты гидродинамических сил и гидродинамического продольного момента [11, 12].

Выражения для вычисления гидродинамических сил c_W и c_B , а также гидродинамического продольного момента m_{z_h} можно записать следующим образом [13]:

$$c_W = \frac{W}{\rho V^2 B^2}, \tag{3}$$

где c_W – коэффициент полного гидродинамического сопротивления,

W – полное гидродинамическое сопротивление (с учетом сопротивления воды и сопротивления ВЗУ),

ρ – плотность воды ($\approx 998 \text{ кг/м}^3$),

B – ширина лодки (смачиваемой поверхности самолета).

$$c_B = \frac{A}{\rho V^2 B^2}, \tag{4}$$

где c_B – коэффициент гидродинамической нагрузки на воду,

A – гидродинамическая подъемная сила,

$$m_{z_h} = \frac{M_z}{\Delta B}, \tag{5}$$

где m_{z_h} – коэффициент гидродинамического продольного момента,

M_z – продольный гидродинамический момент,

Δ – нагрузка на воду,

Синтез автопилота для управления продольным движением СА. Одной из наиболее востребованных задач автоматического управления СА является задача синтеза систем управления взлетом и посадкой на водную поверхность. Ключевой особенностью для решения этой задачи является разработка синтезированных законов управления, обеспечивающих балансировку самолета при взлете и посадке [14], а также учитывающих влияние внешней среды, т.е. адекватное изменение аэро- и гидродинамических характеристик [15].

Для разработки законов управления в работе используется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (метод АКАР), основанный на синергетической теории управления [16–18].

При решении задачи управления СА на взлете и посадке рассматривается только продольное движение самолета. Математическая модель движения самолета, дополненная выражениями аэро- и гидродинамических сил, и момента уже была упомянута ранее (2). Управление продольным движением СА достигается путем отклонения органов управления: РУДов и руля высоты [19]. Соответственно, в модели продольного движения СА будет только 2 управляющих воздействия: изменение силы тяги двигателей P , зависящей от отклонения РУДов, и суммарный продольный момент m_z , зависящий от угла стабилизатора высоты, который выставляется путем отклонения руля высоты.

Согласно методу АКАР, введем первую совокупность макропеременных, которые будут обеспечивать установившееся продольное движение в определенном интервале времени с заданной скоростью и высотой:

$$\psi_1 = V - V_0. \quad (6)$$

$$\psi_2 = \sin \theta - \varphi_1. \quad (7)$$

В итоге, на пересечении инвариантных многообразий при $\psi_i = 0, i = 1, 2$ происходит динамическая декомпозиция (сжатие фазового пространства), и динамика рассматриваемой системы будет описываться следующей декомпозированной моделью:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z}(m_z - m_{z_h}) \\ \dot{x} &= V_0 \cos \theta \\ \dot{H} &= V_0 \varphi_1, \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z. \end{aligned} \quad (8)$$

Следующим шагом введем еще одну макропеременную, которая будет обеспечивать стабилизацию движения гидросамолета на заданной высоте H_0 :

$$\psi_3 = H - H_0. \quad (9)$$

В результате, закон управления движением самолета-амфибии ищется из решения системы функциональных уравнений АКАР:

$$T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 = 0, \quad (10)$$

$$T_2 \frac{d\psi_2}{dt} + \psi_2 = 0. \quad (11)$$

$$T_3 \frac{d\psi_3}{dt} + \psi_3 = 0. \quad (12)$$

В итоге путем решения функциональных уравнений и уравнений модели была получена совокупность внешних управлений, обеспечивающих желаемые параметры движения СА.

Особенности процедуры синтеза при посадке на воду и последующего забора воды. Задача синергетического синтеза автопилота для посадки на воду аналогична задаче управления продольным движением на воде за исключением требований, рекомендованных к совершению посадки на воду в соответствии с РЛЭ самолета [8].

Задача управления самолетом в режиме посадки на воду заключается в приведении самолета на воду с необходимой скоростью V и выдержанным углом тангажа ϑ , в результате чего возникающие продольные колебания вследствие удара самолета об воду будут минимальными.

Вводимые макропеременные будут идентичными (6) и (7), а декомпозируемая модель, очевидно, будет такой же (8) за исключением гидродинамической составляющей от продольного момента:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z} m_z \\ \dot{x} &= V_0 \cos \theta \\ \dot{H} &= V_0 \varphi_1, \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z.\end{aligned}\quad (13)$$

Управление продольным движением самолета во время забора воды имеет свои особенности по сравнению с обычным продольным движением СА. При заборе воды в модели необходимо учитывать изменение массы самолета, а значит и изменение гидродинамического сопротивления. Данная зависимость учитывается добавлением расчетных формул изменения гидродинамического сопротивления, а также возрастанием скорости СА посредством увеличения тяги двигателя при его переходе на взлетный режим.

Также необходимо учитывать изменение гидродинамического сопротивления от выпуска ВЗУ, которое рассчитывается по формуле:

Управление продольным движением самолета во время забора воды имеет свои особенности по сравнению с обычным продольным движением СА. При заборе воды в модели необходимо учитывать изменение массы самолета, а значит и изменение сопротивления. Данная зависимость учитывается добавлением расчетных формул изменения гидродинамического сопротивления, а также возрастанием скорости СА посредством увеличения тяги двигателя при его переходе на взлетный режим.

Также необходимо учитывать изменение гидродинамического сопротивления от выпуска ВЗУ, которое рассчитывается по формуле:

$$W_{zab} = 0.93 * S_{zab} * \rho_{zab} * V^2, \quad (14)$$

где S_{zab} – площадь ВЗУ,

ρ_{zab} – плотность воды при прохождении через водозаборный тракт,

V – скорость СА (с учетом потерь при заборе воды).

В результате измененный коэффициент гидродинамического сопротивления будет выглядеть следующим образом:

$$c_W = \frac{W_{full}}{\rho V^2 B^2}, \quad (15)$$

где $W_{full} = W_{zab} + W_{vod} + W_m$ – полное гидродинамическое сопротивление с учетом сопротивления ВЗУ (W_{zab}), сопротивления воды (W_{vod}) и изменения сопротивления самого СА из-за увеличения его массы (W_m).

Результаты моделирования. Процедура синергетического синтеза модели продольного движения проводилась в Maple. Полученные законы управления в дальнейшем применялись для математического моделирования в пакете Matlab, а также для дальнейшего построения графиков функций. Результаты моделирования замкнутой системы представлены на рис. 2-5. Моделировалась снижение по глис-

саде, посадка на воду, забор воды и последующий взлет самолета. При моделировании процесса забора воды имитировалось линейное по времени возрастание массы СА. Взлет после забора осуществлялся путем изменения уставки автопилота по высоте при достижении массы СА установленного значения.

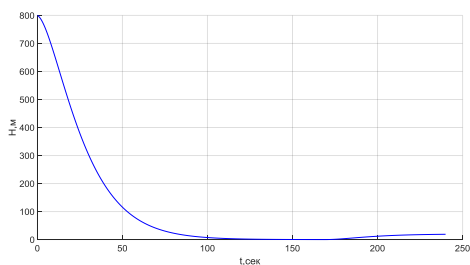


Рис. 2. График изменения высоты H

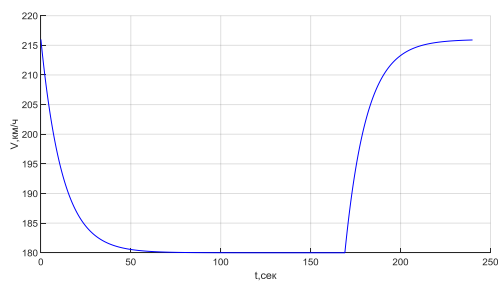


Рис. 3. График изменения скорости V

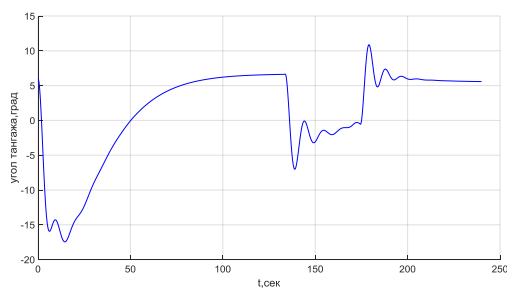


Рис. 4. График изменения угла тангажа (дифферента) ϑ (φ)

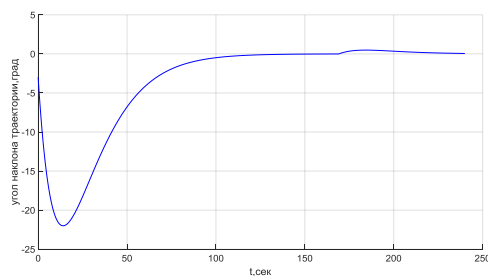


Рис. 5. График изменения угла наклона траектории θ

Заключение. Полученные результаты демонстрируют выполнение автопилотом поставленных задач, синтезированный регулятор обеспечивает асимптотическую устойчивость в рассматриваемом режиме движения СА. Значение угла дифферента стабилизируется на $\varphi = 6^\circ$. Это показывает, что он не выходит за верхнюю или нижнюю границы гидродинамической устойчивости при установившемся глиссировании, что соответствует РЛЭ самолета Бе-200 [8, 0]. График изменения скорости V также соответствует приведенному в РЛЭ диапазону скоростей забора воды на глиссировании и отрыва с водной поверхности ($V = 180 \div 210$ км/ч). Полученные результаты показывают, что автопилот выдерживает необходимые значения скорости V и угла дифферента φ без вмешательства летчика, а также со временем полностью демпфирует продольные колебания, что обеспечивает установившееся устойчивое движение во всем эксплуатационном диапазоне. Это позволяет сделать вывод, что результаты моделирования полностью обеспечивают выполнение поставленных в данной работе задач. Использование математической модели в траекторной системе координат, в отличие от связанной и полусвязанной, которые применялись в работах [3, 12, 15, 21] показало хорошую сходимость с результатами уже существующих исследований.

Однако, несмотря на то, что регулятор полностью выполняет задачу обеспечения устойчивости движения самолета, при его синтезе он не учитывает изменение массы самолета при заборе воды на режиме глиссирования. Предполагается, что при учете в автопилоте изменения массы самолета, колебания по углу дифферента при движении самолета на воде, а, в частности, при посадке на воду, будут существенно демпфированы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авиация: Энциклопедия / гл. ред. Г.П. Свищев. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 736 с.
2. Косоуров К.Ф. Теоретические основы гидроавиации. – М.: Воениздат, 1961.
3. Кобзев В.А., Колесников А.А., Нгуен Ф. Проблемы управления взлетом гидросамолетов в условиях действия возмущений внешней среды // Сб. докладов VIII Научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008». – М.: Изд. ЦАГИ, 2008.
4. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами: учебник. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.
5. Волков Г.В. Основы гидроавиации. – М.: Воениздат, 1940.
6. Лотов А.В. Глиссирование и быстрый вход тел в воду. – М.: Изд-во МФТИ, 1984.
7. Дурицын Ю.Г., Анастасов В.К., Самохин В.В., Сафронов П.В. Основы гидромеханики гидросамолета. – Таганрог: ИП Ашихмина О.С., 2016. – 362 с.
8. Самолёт-амфибия Бе-200ЧС. Руководство по лётной эксплуатации. Кн. 1 «Лётное руководство». А201.0000.000 РЛЭ-1.
9. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 2005.
10. Дурицын Ю.Г., Дурицын Д.Ю. Гидродинамические испытания моделей гидросамолетов. – Таганрог: ИП Ашихмина О.С., 2015. – 283 с.
11. Эпштейн Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. – Л.: Судостроение, 1970.
12. Банников Ю.М., Лукашевский В.А., Лукьянов С.С. Математическая модель движения гидросамолета на волнении // Сб. докладов I Научной конференции по гидроавиации «Геленджик-96». – М.: Изд. ЦАГИ, 1996.
13. Справочник авиаконструктора. Т. II. Гидромеханика гидросамолета. – М.: Изд-во ЦАГИ, 1938.
14. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом. – М.: Наука: Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1987.
15. Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. – М.: Физматлит, 2013. – 193 с.

16. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. ФЦ «Интеграция». Ч. II. – М.: Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
17. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
18. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006.
19. Попов А.Н. Математические модели летательных аппаратов: учеб. пособие. – Таганрог: Изд. ТТИ ЮФУ, 2008.
20. Бондарец А.Я. Система автоматического управления углом хода самолёта-амфибии при движении по воде на режиме глиссирования // Сб. докладов V научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон – 2004». – М.: Изд-во ЦАГИ, 2004.
21. Никитин А.И. Реализация математической модели пространственного движения самолёта-амфибии Бе-200 в среде MATLAB/Simulink // Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности: Статьи и материалы конференции. – М.: ОАО «ОКБ Сухого», 2005. – С. 80-84.

REFERENCES

1. Aviatziya: Entsiklopediya [Aviation: Encyclopedia], chief ed. G.P. Svishchev. Moscow: Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya, 1994, 736 p.
2. Kosourov K.F. Teoreticheskie osnovy gidroaviatsii [Theoretical basics of hydroaviation]. Moscow: Voenizdat, 1961.
3. Kobzev V.A., Kolesnikov A.A., Nguen F. Problemy upravleniya vzletom gidrosamoletov v usloviyakh deistviya vozmushcheniy vneshney sredy [Problems of seaplane takeoff control under the influence of environmental disturbances], *Sb. докладов VIII Nauchoy konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2008»* [Collection of reports of the VIII scientific conference on hydroaviation «Hydroaviasalon-2008»]. Moscow: Izd. CAGI, 2008.
4. Lukomskiy V.A., Chugunov V.S. Sistemy upravleniya morskimi podvizhnimi ob'ektami: uchebnik [Control systems for marine mobile objects: tutorial]. Leningrad: Sudostroenie, 1988, 272 p.
5. Volkov G.V. Osnovy gidroaviatsii [Basics of hydroaviation]. Moscow: Voenizdat, 1940.
6. Lotov A.V. Glissirovanie i bystryy vkhod tel v vodu [Water gliding and rapid entry of bodies into the water]. Moscow: Izd. MFTI, 1984.
7. Dyritsin Y.G., Anastasov V.K., Samokhin V.V., Safronov P.V. Osnovy gidromekhaniki gidrosamoleta [Basics of seaplane hydromechanics]. Taganrog: IP Ashikhmina O.S., 2016, 362 p.
8. Samolet-amfibiya BE-200ChS. Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii [Flight manual]. Book 1 «Letnoe rukovodstvo». A201.0000.000 RLE-1.
9. Ostoslavskiy I.V., Strazheva I.V. Dinamika poleta. Traektorii letatelnykh apparatov [Flight dynamics. Aircraft trajectories]. Moscow: Mashinostroenie, 2005.
10. Dyritsin Y.G., Dyritsin D.Y. Gidrodinamicheskie ispytaniya modeley gidrosamoletov [Hydrodynamic testing of seaplane models]. Taganrog: IP Ashikhmina O.S., 2015, 283 p.
11. Epstein L.A. Metody teorii razmernostey i podobiya v zadachakh gidromekhaniki sudov [Methods of the theory of dimensions and similarity in problems of hydromechanics of ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1970.
12. Bannikov Y.M., Lukashevskiy V.A., Luk'yanov S.S. Matematicheskaya model' dvizheniya gidrosamoleta na volnenii [Mathematical model of seaplane motion in waves], *Sb. докладов I Nauchoi konferentsii po gidroaviatsii «Gelendzhik-96»* [Collection of reports of the I scientific conference on hydroaviation «Gelendzhik-96»]. Moscow: Izd. TsAGI, 1996.
13. Spravochnik aviakonstruktora. T. II. Gidromekhanika gidrosamoleta [Aircraft constructor's handbook. Vol. II. Seaplane hydromechanics]. Moscow: Izd. TsAGI, 1938.
14. Bukov V.N. Adaptivnye prognoziyuyschie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka: Gl. red. Fiz.-mat. lit., 1987.
15. Kolesnikov A.A. Novye nelineynye metody upravleniya poletom [New non-linear flight control methods]. Moscow: Fizmatlit, 2013, 193 p.
16. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya [Modern applied control theory: Synergetic approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. FTs «Integratsiya». Part II. Moscow: Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000.

17. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994.
18. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Synergetic methods for complex systems control: the theory of system synthesis]. Moscow: KomKniga, 2006.
19. Popov A.N. Matematicheskie modeli letatel'nykh apparatov: ucheb. posobie [Mathematical models of aircraft. Tutorial]. Taganrog.: Izd-vo TTI SFEDU, 2008.
20. Bondarets A.J. Sistema avtomaticheskogo upravleniya uglom khoda samoleta-amfibii pri dvizhenii po vode na rezhime glissirovaniya [The system of automatic control of the angle of the amphibious aircraft when moving through the water in the gliding mode], Sb. dokladov V Nauchoi konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2004» [Collection of reports of the I scientific conference on hydroaviation «Hidroaviasalon-2004»]. Moscow: Izd. TsAGI, 2004.
21. Nikitin A.I. Realizatsiya matematicheskoy modeli prostranstvennogo dvizheniya samoleta-amfibii Be-200 v srede MATLAB/Simulink [Implementation of a mathematical model of the spatial motion of the Be-200 amphibious aircraft in MATLAB/Simulink], *Issledovaniya i perspektivnye razrabotki v aviatsionnoy promyshlennosti: Stat'i i materialy konferentsii* [«Research and advanced developments in the aviation industry»: Articles and conference materials]. Moscow: OAO «OKB Suhogo», 2005, pp. 80-84.

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

Попов Иван Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: ivpopov@sfedu.ru; тел.: +79515014168; кафедра синергетики и процессов управления им. профессора А.А. Колесникова; аспирант.

Popov Ivan Andreevich – Southern Federal University; e-mail: ivpopov@sfedu.ru; phone: +79515014168; the department of synergetics and control processes named after professor A.A. Kolesnikov; graduate student.

УДК 551.594

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-171-181

Г.В. Куповых, А.Г. Клово, Д.В. Тимошенко, Т.В. Кудринская, О.В. Белоусова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕДУКЦИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Исследуется проблема интерпретации данных атмосферно-электрических наблюдений, проводимые регулярно на сети наземных станций, являющихся составной частью общего мониторинга состояния атмосферы. Для решения общей задачи мониторинга - получение режимных данных об электрическом поле атмосферы и выявление трендов его изменений требуется проведения сравнительного анализа данных измерений в различных пунктах наблюдений. Напряжённость электрического поля (градиент потенциала) обычно измеряется на некоторой высоте от поверхности земли с использованием различных способов (геометрии) установки датчиков вблизи поверхности земли. Получаемые значения электрического поля могут сильно отличаться от эталонных, под которыми понимаются измерения на плоской поверхности в условиях равнины. В работе исследуется структура атмосферного электрического поля вблизи плоского электрода со сферической неоднородностью. Для совместного анализа данных различных пунктов наблюдений обычно производится их унификация путем введения коэффициента редукции: отношение значений напряжённости электрического поля в геометрически искажённых условиях к его эталонному значению на равнине. Показано, что значения коэффициента редукции сильно зависят не только от геометрии установки датчиков, но и от значений измеряемого электрического поля. Для корректного расчёта коэффициента редукции электрического поля предложено использовать одновременно геометрический коэффициент искажения электрического поля и коэффициент, учитывающий влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли. Выполнены расчёты значений коэффициента редукции в окрестностях сферической неоднородности поверхности электрода для случаев классического и турбулентного элек-

тродного эффекта в приземном слое. Установлено влияние на значения и пространственное распределение коэффициента редукции метеорологических факторов и измеряемого электрического поля. Для правильной интерпретации результатов наземных атмосферно-электрических наблюдений с учетом коэффициента редукции необходимо принимать во внимание не только геометрию установки датчиков, но и воздействие электродного эффекта на получаемые значения электрического поля.

Атмосфера; электрическое поле; электродный эффект; коэффициент редукции; сферическая неоднородность; приземный слой; турбулентность.

G.V. Kupovykh, A.G. Klovo, D.V. Timoshenko, T.V. Kudrinskaya, O.V. Belousova

DETERMINATION OF THE REDUCTION COEFFICIENT OF THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD IN THE SURFACE LAYER

The article examines the problem of interpretation of atmospheric-electrical observations conducted regularly on a network of ground stations that are an integral part of the general monitoring of the state of the atmosphere. To solve the general task of monitoring - obtaining regime data on the electric field of the atmosphere and identifying trends in its changes, a comparative analysis of measurement data at various observation points is required. The electric field strength (potential gradient) is usually measured at a certain height from the earth's surface using various methods (geometry) of installing sensors near the earth's surface. The resulting values of the electric field may differ greatly from the reference values, which are understood as measurements on a flat surface in plain conditions. The structure of the atmospheric electric field near a flat electrode with spherical inhomogeneity investigates in the paper. For the joint analysis of data from various observation points, their unification is usually carried out by introducing a reduction coefficient: the ratio of the values of the electric field strength in geometrically distorted conditions to its reference value on the plain. It is shown that the values of the reduction coefficient strongly depend not only on the geometry of the sensor installation, but also on the values of the measured electric field. To correctly calculate the reduction coefficient of the electric field, it is proposed to use simultaneously the geometric distortion coefficient of the electric field and the coefficient taking into account the influence of the electrode effect near the earth's surface. Calculations of the values of the reduction coefficient in the vicinity of the spherical inhomogeneity of the electrode surface for the cases of classical and turbulent electrode effect in the surface layer are performed. The influence of meteorological factors and the measured electric field on the values and spatial distribution of the reduction coefficient has been established. For the correct interpretation of the results of ground-based atmospheric-electrical observations, taking into account the reduction coefficient, it is necessary to take into account not only the geometry of the sensor installation, but also the effect of the electrode effect on the obtained values of the electric field.

Atmosphere; electric field; electrode effect; reduction coefficient; spherical inhomogeneity; surface layer; turbulence.

Введение. Атмосферно-электрические наблюдения, проводимые регулярно на сети наземных станций, являются составной частью общего мониторинга состояния атмосферы. Общая задача атмосферно-электрического мониторинга - получение режимных (фоновых) данных об электрическом поле атмосферы и выявление трендов его изменений [1, 2]. Таким образом, основным элементом регулярных наблюдений является напряжённость электрического поля (градиент потенциала), обычно измеряемая на некоторой высоте от поверхности земли с использованием различных способов (геометрии) установки датчиков. Получаемые значения электрического поля могут сильно отличаться от эталонных значений, под которыми понимаются измерения на плоской поверхности в условиях равнины [1, 2].

Из физических соображений рекомендуется производить наблюдения в условиях «хорошей погоды» [1, 2] одновременно за тремя основными элементами (напряжённостью электрического поля, проводимостью воздуха и плотностью электрического тока), связанных законом Ома, и создавая, таким образом, систему

замкнутых измерений [1, 2]. Но это сложная физико-техническая задача, поэтому чаще всего регулярно измеряется только напряжённость электрического поля при разных инженерных способах размещения датчиков.

Для сравнительного анализа данных различных пунктов наблюдений обычно производится их унификация путем введения коэффициента редукции: $K_p = E/E_0$, где E_0 – эталонное значение электрического поля на равнине, E – в геометрически искажённых условиях. Редуцированные значения E зависят от прежде всего от геометрии установки датчиков, но значения K_p также сильно меняются в различных физических условиях [3], [4]. Причинами разброса его значений является влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли [3], [4].

В работе [5] на основе экспериментальных измерений установлено, что с усилением электрического поля в условиях турбулентного перемешивания в приземном слое значения коэффициента редукции уменьшаются, а в условиях близких к классическому электродному эффекту он возрастает. Имеется ряд работ, где при определенных допущениях и упрощениях получены аналитические распределения электрического поля для сложной геометрии электрода [6, 7]. В работах [8,9] представлены распределения потенциала и напряженности электрического поля вблизи полусферы на поверхности плоского электрода.

Цель настоящей работы – моделирование и исследование поведения коэффициента редукции электрического поля вблизи земной поверхности, имеющей сферическую неоднородность, с учетом действия электродного эффекта в атмосфере.

1. Расчет структуры электрического поля вблизи электрода со сферической неоднородностью. наче рассмотрим задачу о распределении напряжённости электрического поля вблизи плоского электрода с расположенной на нем полусферой.

В приближении классического электродного эффекта [10–13] имеем следующую математическую задачу:

$$\begin{aligned} \pm b_{1,2} \operatorname{div}(n_{1,2} \vec{E}) &= q - \alpha n_1 n_2, \\ \operatorname{div} \vec{E} &= 4\pi e(n_1 - n_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $n_{1,2}$ – концентрации положительных и отрицательных аэроионов, $b_{1,2}$ – их подвижности, α – коэффициент рекомбинации, $\vec{E}$ – напряжённость электрического поля, q – скорость ионообразования, e – элементарный заряд.

Учитывая потенциальность электрического поля ($\operatorname{rot} \vec{E} = 0$) можно использовать электростатическое приближение, тогда для напряженности электрического поля и потенциала используем соотношение:

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi. \quad (3)$$

Таким образом, систему (1) можно переписать относительно скалярной функции потенциала электрического поля φ , что, в известной степени, упрощает решение задачи.

Рассмотрим вначале третье уравнение системы (1), записанное с учетом (3) через потенциал в обозначениях оператора Лапласа:

$$\Delta \varphi = -4\pi e(n_1 - n_2). \quad (4)$$

Граничные условия для уравнения (4) зададим в следующем виде:

$$\varphi|_{z=0} = 0, \quad \varphi|_{z=z_\infty} = \varphi_\infty. \quad (5)$$

Исходя из теории классического электродного эффекта можно использовать $n_1 \approx \text{const}$ [10], поэтому из первого уравнения системы (1) можно выразить величину n_2 и получить уравнение относительно $\vec{E}$:

$$\text{div} \vec{E} = 4\pi e \left(n_1 - \frac{q - \text{div}(n_1 b_1 \vec{E})}{\alpha n_1} \right), \quad (6)$$

которое преобразуется к уравнению вида:

$$\Delta \varphi = -A, \quad A = \frac{4\pi e \left(n_1 - \frac{q}{\alpha n_1} \right)}{1 + \frac{4\pi e b_1}{\alpha}}, \quad (7)$$

что позволяет решать задачу о распределении скалярной функции потенциала. Уравнение (7) и граничные условия (5) представляет собой задачу Дирихле для уравнения Лапласа во внешности круга [14].

Зададим форму электрода в виде полусферы. Тогда уравнение (7) удобно рассматривать в полярных координатах $\varphi = \varphi(r, \theta)$ (рис. 1):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} = -A. \quad (8)$$

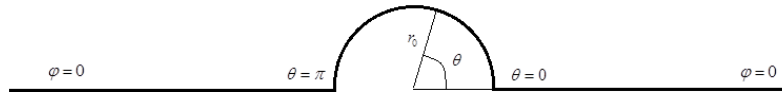


Рис. 1. Схема электрода в полярных координатах

Математическое решение уравнения (8) для потенциала электрического поля подробно приведено в работах [8, 9]. Окончательное выражение в виде ряда Фурье имеет вид:

$$\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^{n+2} r^{-n} - \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r^2 \right] \sin n \theta. \quad (9)$$

Для нахождения распределения напряженности электрического поля, пользуясь соотношением (3), совершим обратный переход от скалярной функции φ к вектор-функции $\vec{E}$. С этой целью воспользуемся формулой для градиента в полярных координатах:

$$\overrightarrow{\text{grad}} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \vec{e}_\theta. \quad (10)$$

Формула (10) справедлива для функций в виде конечных соотношений, мы же получили выражение для потенциала электрического поля в виде ряда Фурье. Это, с одной стороны, позволяет говорить о почленной дифференцируемости правой части выражения (9), но с другой стороны, возникает возможность появления погрешности при вычислении производной, взятой только от конечного приближения ряда и от аналитического выражения функции – поскольку операция дифференцирования приближенного выражения может в данном случае оказаться некорректной – малые изменения функции могут приводить к существенным скачкам производной. Для проверки возможной погрешности и ее оценки проведено сравнение осредненного значения производной и рассчитанного аналитически [14].

После обратного перехода от выражения для потенциала к представлению напряженности электрического поля как функции координат в декартовой системе имеем выражение:

$$E = -grad \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^{n+2} (\sqrt{x^2 + z^2})^{-n} - \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) (x^2 + z^2) \right] \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}}. \quad (11)$$

Здесь x горизонтальная, а z – вертикальная (высота) координаты с началом в центре полусферы. Дальнейшие расчеты проводились в системе MATLAB.

Распределение напряженности электрического поля, как вблизи области сферической неоднородности электрода, так и на значительном удалении от нее приведены на рис. 2 при значении $E_0 = -100 \text{ В/м}$ в плоской части электрода [10, 12, 13].

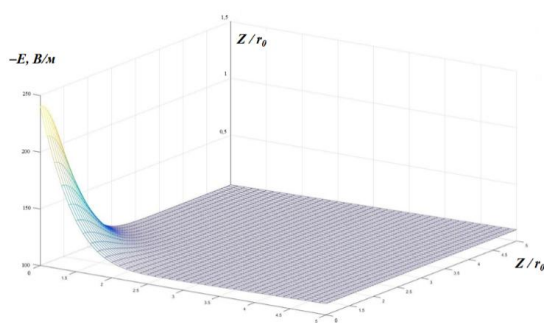


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля вблизи электрода со сферической неоднородностью

2. Расчет коэффициента редукции в электродном слое. Перейдем к рассмотрению коэффициент редукции электрического поля K_p , который в приближении электродного эффекта [3, 8, 10] можно представить в виде:

$$K_p = K_1 \cdot K_2, \quad (12)$$

где $K_1 = E/E_0$ – коэффициент искажения электрического поля, обусловленный геометрией электрода; E – значение напряжённости электрического поля в рассматриваемой точке вблизи сферического электрода, E_0 – значение вдали от него (плоский электрод), K_2 – коэффициент, обусловленный действием электродного эффекта.

Далее, рассмотрим отдельно случаи классического и турбулентного электродного эффекта в приземном слое атмосферы [15–20].

2.1. Классический электродный слой. Для значений напряженности электрического поля на плоском участке электрода ($E_0 = -100 \text{ В/м}$ и -500 В/м) на основе решения (11) получены значения геометрического коэффициента K_1 и коэффициента редукции K_p в зависимости от расстояния между точкой наблюдения по горизонтали от края полусферы ($x=l$) и по вертикали от ее вершины ($z=h$) участком неоднородности (рис. 3).

Представленные рисунки демонстрируют уменьшение влияния геометрических искажений поля и, следовательно, уменьшение значений K_1 и по мере удаления от участка неоднородности по вертикали и по горизонтали. При увеличении электрического поля E_0 значения коэффициента K_1 возрастают.

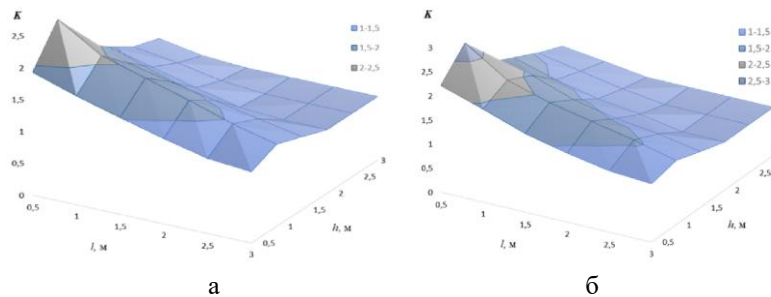


Рис. 3. Значения коэффициента K_1 в классическом электродном слое:
а – $E_0 = -500$ В/м, б – $E_0 = -500$ В/м

Исследуем поведение коэффициента редукции, получаемого по формуле (12) с учётом влияния классического электродного эффекта. Значения коэффициента K_2 , представленные в табл. 1, рассчитаны по численной модели классического электродного эффекта вблизи плоского электрода в соответствии с работами [10, 18, 20].

Таблица 1

Значения коэффициента K_2

h, м	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$E_0 = -100$ В/м	1	0,8	0,7	0,6	0,55	0,48	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
$E_0 = -500$ В/м	1	0,95	0,9	0,87	0,85	0,82	0,8	0,77	0,74	0,72	0,7

Расчетные значения коэффициента редукции K_p по формуле (12) с учетом данных, приведённых табл. 1 при различных значениях напряженности электрического поля E_0 , представлены на рис. 4.

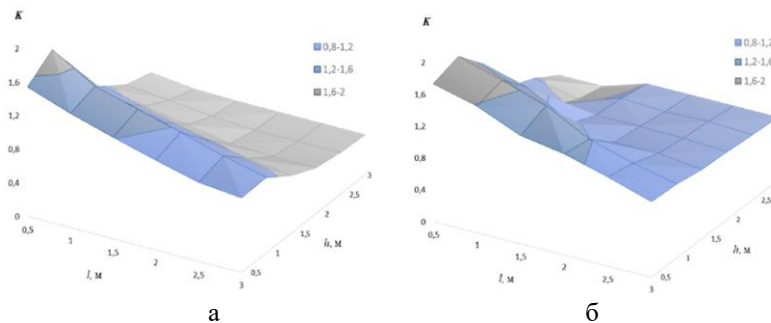


Рис. 4. Значения коэффициента редукции K_p в классическом электродном слое
(а – $E_0 = -100$ В/м, б – $E_0 = -500$ В/м)

Сравнение графиков, представленных на рис. 3 и 4 показывают уменьшение значений K_p , по сравнению с K_1 , а при усилении электрического поля E_0 происходит увеличение значений коэффициента редукции, что является следствием влияния классического электродного эффекта.

2.2. Турбулентный электродный слой. При наличии ветра в приземном слое, вследствие взаимодействия его с земной поверхностью, устанавливается режим турбулентного электродного эффекта [10]. В табл. 2 приведены значения

коэффициента турбулентности (диффузии) D и, соответствующие значения скорости ветра U , на высоте около одного метра от поверхности земли в условиях нейтральной стратификации приземного слоя атмосферы [10, 18].

Таблица 2

Значения коэффициента турбулентности и скорости ветра

U , м/с	1	2	3	4	5	6
D , м/с	0,02	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13

В табл. 3 приведены расчетные значения коэффициента K_2 вблизи поверхности плоского электрода по результатам численного моделирования, приведенных в работах [10], [18] в при различных значениях электрического поля (E_0) и степени турбулентного перемешивания (D) в приземном слое.

Таблица 3

Значения коэффициента K_2 при разных значениях E_0 и D .

h , м	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$E_0 = -100$ В/м $D = 0,02$ м/с	1	0,85	0,8	0,75	0,7	0,67	0,63	0,62	0,60	0,58	0,57
$E_0 = -100$ В/м $D = 0,13$ м/с	1	0,98	0,49	0,9	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,8	0,79
$E_0 = -500$ В/м $D = 0,13$ м/с	1	0,96	0,95	0,92	0,90	0,87	0,85	0,83	0,82	0,79	0,77

На рис. 5 представлены значения коэффициента редукции в турбулентном электродном слое при различных скоростях ветра. Коэффициент редукции K_p рассчитан по формуле (12), а значения коэффициента K_2 взяты из табл. 3.

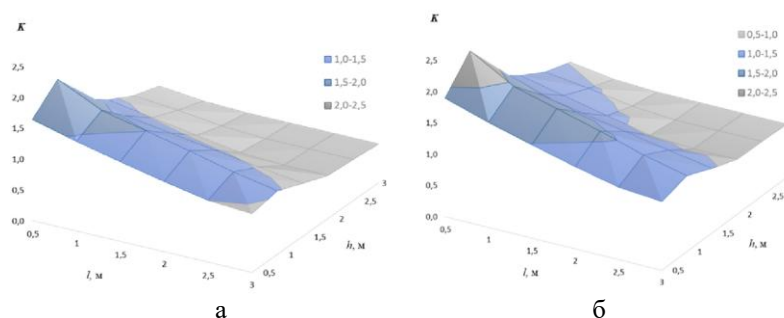


Рис. 5. Значения коэффициента редукции K_p в турбулентном электродном слое: (а – $U = 1$ м/с; б – $U = 6$ м/с)

Сравнение графиков, представленных на рис. 5, показывают увеличение значений коэффициента редукции K_p при увеличении скорости ветра. В среднем его значения при увеличении скорости ветра от $U = 1$ м/с до $U = 6$ м/с возрастают примерно на 20%.

На рис. 6 приведены значения коэффициента редукции K_p при условии сильного электрического поля ($E_0 = -500$ В/м). Значения коэффициента K_2 взяты из таблицы 3. Исходя из сравнения рис. 5,б и рис. 6, можно отметить, что при усилении электрического поля E_0 также наблюдается увеличение значений K_p , как и в клас-

сическом электродном слое. Значения коэффициента редукции K_p для условия сильного электрического поля при турбулентном электродном эффекте больше, чем при классическом: почти на 30% – вблизи и менее 10% – вдали от участка неоднородности.

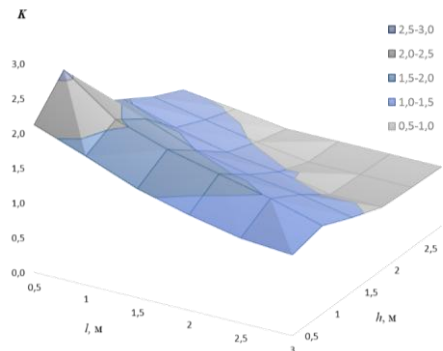


Рис. 6. Значения коэффициента редукции K_p в сильном электрическом поле ($E_0 = -500$ В/м, $u = 5$ м/с)

Заключение. Исследована структура атмосферного электрического поля вблизи плоского электрода со сферической неоднородностью. Для расчета коэффициента редукции предложено использовать одновременно геометрический коэффициент искажения электрического поля и коэффициент, учитывающий влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли.

Выполнены расчеты значений коэффициента редукции в окрестностях сферической неоднородности поверхности электрода для случаев классического и турбулентного электродного эффекта в приземном слое. Установлено влияние на значения и пространственное распределение коэффициента редукции метеорологических факторов и измеряемого электрического поля.

Для правильной интерпретации результатов наземных атмосферно-электрических наблюдений с учетом коэффициента редукции необходимо принимать во внимание не только геометрию установки датчиков, но и воздействие электродного эффекта на получаемые значения электрического поля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афиногенов Л. П., Грушин С. И., Романов Е. В. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 319 с.
2. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Grivtsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 913. – 052041. – 6 p.
3. Куповых Г.В., Шефтель В.М., Ярошенко А.Н. К вопросу определения коэффициента редукции при измерении атмосферного электрического поля в приэлектродном слое // Труды ВГИ. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – Вып. 76. – С. 66-69.
4. Мартынов А.А., Куповых Г.В. О связи значений напряженности электрического поля атмосферы, измеренных на различных высотах у земли // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, Нальчик 1990. – С. 45.
5. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G. Electric field measurements at mountain stations in Baksan gorge and on Cheget peak (Elbrus region) // CATPID-2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698. – 044035. – 6 p.
6. Tuomi T.J. The atmospheric electrode effect over snow // J. Atm. and Terr. Phys. – 1982. – Vol. 44. – P. 737-745.

7. *Калица В.М., Лантухов А.И., Москаленко А.М. и др.* Распределение электрического поля, объемного заряда и концентрации ионов в атмосфере вблизи заряженных тел // В кн.: Физические процессы в ионосфере и магнитосфере. – М.: Изд-во АН СССР, 1984. – С. 110-115.
8. *Kudrinskaya T.V., Klovo A. G., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V.* Reduction coefficient and electric field near plane electrode with geometric heterogeneity // *Journal of Physics: IOP Conf. Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity*. – 2020. – 1604. – 012005. – 8 p.
9. *Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Тимошенко Д.В.* Распределение напряженности атмосферного электрического поля и потенциала вблизи плоского электрода со сферической неоднородностью // Матер. VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2020. – С. 279-283.
10. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере: монография. – Таганрог. Изд-во ТРТУ. 1998. – 123 с.
11. *Hoppel W.A.* Theory of the electrode effect // *Journal Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1967. – Vol. 29, No. 6. – P. 709-721.
12. *Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. – 2003. – № 2. – С. 43-46.
13. *Куповых Г.В., Клово А.Г., Гривцов В.В., Белоусова О.В.* Моделирование электродинамической структуры нетурбулентного приземного слоя // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 3 (227). – С. 234-2434.
14. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 736 с.
15. *Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V.* Electrodynamics processes models in atmospheric surface layer // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 698. – 044034. – 8 p.
16. *Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A.* Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // *Journal of Electrostatics*. – 2013. – Vol. 71. – P. 305-311.
17. *Hoppel W.A.* Electrode effect: comparison of the theory and measurement // In: *Planetary Electrodynamics*, 2, S.C. Coroniti and J. Hughes; editors: Gordon and Breach Science Publishers. – New York, 1969. – P. 167-181.
18. *Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Турбулентный электродный эффект в приземном слое // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. – 2003. Приложение № 3. – С. 55-62.
19. *Свидельский С.С., Литвинова В.С., Куповых Г.В., Клово А.Г.* Формирование структуры атмосферного электродного слоя // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 5. – С. 130-141
20. *Белоусова О.В., Куповых Г.В., Клово А.Г., Гривцов В.В.* Результаты моделирования электродинамической структуры турбулентного приземного слоя // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 4 (228). – С. 245-253.

REFERENCES

1. *Afinogenov L.P., Grushin S.I., Romanov E.V.* Apparatura dlya issledovaniy prizemnogo sloya atmosfery [Equipment for research of the surface layer of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 319 p.
2. *Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Grivtsov V.V.* The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 913, 052041, 6 p.
3. *Kupovykh G.V., Sheftel' V.M., Yaroshenko A.N.* K voprosu opredeleniya koeffitsienta reduktsii pri izmerenii atmosfernogo elektricheskogo polya v prielektroдном слое [On the issue of determining the reduction coefficient when measuring the atmospheric electric field in the near-electrode layer], *Trudy VGI* [Proceedings of the Highland Geophysical Institute]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1989, Issue 76, pp. 66-69.
4. *Martynov A.A., Kupovykh G.V.* O svyazi znacheniy napryazhennosti elektricheskogo polya atmosfery, izmerennykh na razlichnykh vysotakh u zemli [On the relationship of the values of the electric field strength of the atmosphere measured at different altitudes near the earth], *Tezisy dokladov IV Vsesoyuznogo simpoziuma po atmosfernomu elektrichestvu* [Abstracts of the IV All-Union Symposium on Atmospheric Electricity], Nal'chik 1990, pp. 45.

5. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G. Electric field measurements at mountain stations in Baksan gorge and on Cheget peak (Elbrus region), *CATPID-2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698, 044035, 6 p.
6. Tuomi T.J. The atmospheric electrode effect over snow, *J. Atm. and Terr. Phys.*, 1982, Vol. 44, pp. 737-745.
7. Kalita V.M., Laptukhov A.I., Moskalenko A.M. i dr. Raspredelenie elektricheskogo polya, ob"emnogo zaryada i kontsentratsii ionov v atmosfere vblizi zaryazhennykh tel [Distribution of the electric field, volume charge and ion concentration in the atmosphere near charged bodies], *V kn.: Fizicheskie protsessy v ionosfere i magnitosfere* [In: Physical processes in the ionosphere and magnetosphere]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1984, pp. 110-115.
8. Kudrinskaya T.V., Klovo A. G., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Reduction coefficient and electric field near plane electrode with geometric heterogeneity, *Journal of Physics: IOP Conf. Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity*, 2020, 1604, 012005, 8 p.
9. Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Svidel'skiy S.S., Timoshenko D.V. Raspredelenie napryazhennosti atmosfernogo elektricheskogo polya i potentsiala vblizi ploskogo elektroda so sfericheskoy neodnorodnost'yu [Distribution of atmospheric electric field intensity and potential near a flat electrode with spherical inhomogeneity], *Mater. VI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Problemy voenno-prikladnoy geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy»* [Materials of the VI All-Russian Scientific Conference "Problems of military-applied geophysics and control of the state of the natural environment"]. Saint Petesburg: VKA imeni A.F.Mozhayskogo, 2020, pp. 279-283.
10. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Ya.M. Teoriya elektrodnoogo effekta v atmosfere: monografiya [The theory of the electrode effect in the atmosphere: monograph]. Taganrog. Izd-vo TRTU. 1998, 123 p.
11. Hoppel W.A. Theory of the electrode effect, *Journal Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1967, Vol. 29, No. 6, pp. 709-721.
12. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Klassicheskiy (neturbulentnyy) elektrodnyy effekt v prizemnom sloe [Classical (non-turbulent) electrode effect in the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural sciences], 2003, No. 2, pp. 43-46.
13. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V., Belousova O.V. Modelirovanie elektrodinamicheskoy struktury neturbulentnogo prizemnogo sloya [Modeling of the electrodynamic structure of a non-turbulent surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3 (227), pp. 234-2434.
14. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1972, 736 p.
15. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamics processes models in atmospheric surface layer, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698, 044034, 8 p.
16. Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer, *Journal of Electrostatics*, 2013, Vol. 71, pp. 305-311.
17. Hoppel W.A. Electrode effect: comparison of the theory and measurement, *In: Planetary Electrodynamics*, 2, S.C. Coroniti and J. Hughes; editors: Gordon and Breach Science Publishers. New York, 1969, pp. 167-181.
18. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Turbulentnyy elektrodnyy effekt v prizemnom sloe [Turbulent electrode effect in the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural sciences.], 2003. Appendix No. 3, pp. 55-62.
19. Svidel'skiy S.S., Litvinova V.S., Kupovykh G.V., Klovo A.G. Formirovanie struktury atmosfernogo elektrodnoogo sloya [Formation of the structure of the atmospheric electrode layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5, pp. 130-141
20. Belousova O.V., Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V. Rezul'taty modelirovaniya elektrodinamicheskoy struktury turbulentnogo prizemnogo sloya [Results of modeling the electrodynamic structure of a turbulent surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4 (228), pp. 245-253.

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

Куповых Геннадий Владимирович – Южный федеральный университет; email: kupovykh@sfedu.ru, г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики, зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Клово Александр Георгиевич – email: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Тимошенко Дмитрий Владимирович – email: dmitrytim@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Кудринская Татьяна Владимировна – email: tvkudrinskaya@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра Высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Белоусова Ольга Васильевна – email: obelousova@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; ассистент.

Kupovykh Gennady Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371636; the department of higher mathematics; head of department; dr. of phys. and math. sc.; professor.

Klovo Alexander Georgievich – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Timoshenko Dmitry Vladimirovich – e-mail: dmitrytim@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Kudrinskaya Tatiana Vladimirovna – e-mail: tvkudrinskaya@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Belousova Olga Vasilievna – e-mail: obelousova@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; assistant.

УДК 519.68

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-181-189

В.В. Семенистый, И.Э. Гамолина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ЯВНЫМ И НЕЯВНЫМ РАЗНОСТНЫМ СХЕМАМ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ

Задачи вычислительной аэродинамики являются одной из основных областей применения параллельных вычислений. В работе рассматривается параллельное моделирование квазиодномерной системы уравнений газовой динамики, описывающей течение газа по каналу переменного сечения по неявной и явной разностным схемам. Целью данной работы является исследование эффективности способов организации параллельных вычислений по неявным и явным разностным схемам решения внутренних задач аэродинамики. В статье проводится сравнительный анализ предложенных параллельных моделей для системы квазиодномерных уравнений газовой динамики, описывающих течения в канале переменного сечения, для численного решения которой используются различные параллельные алгоритмы. При построении параллельного алгоритма для неявной разностной схемы применяется метод расщепления по физическим процессам. Вычисления проводятся по схеме типа предиктор-корректор с введением сглаживающего оператора на этапе коррекции для подавления осцилляций решения. На дробных шагах схемы для решения трехдиагональных систем применяется алгоритм параллельной скалярной прогонки с выбором параметрических неизвестных. Для сравнения строится параллельный алгоритм для явной схемы Маккормака, широко применяемой в задачах вычислительной аэродинамики. Параллельные вычисления проводятся на вычислительных структурах с распределенной памятью и линейной коммутационной зависимостью между вычислительными устройствами рабочего поля. В работе приведены временные оценки для каждого этапа параллельного вычисления, как

по неявной, так и по явной разностным схемам, на основе которых вычисляется эффективность разработанных параллельных алгоритмов. Оценки показывают, что коэффициент ускорения для явной схемы линейно зависит от числа вычислительных устройств.

Система уравнений газовой динамики; схема предиктор-корректор; организация параллельных вычислений; временные оценки параллельных алгоритмов.

V.V. Semenistyy, I.E. Gamolina

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PARALLEL COMPUTING EFFICIENCY FOR EXPLICIT AND IMPLICIT DIFFERENCE SCHEMES FOR COMPUTATIONAL AERODYNAMICS PROBLEMS

One of the main areas of parallel computing application is solving of computational aerodynamics problems. The paper considers parallel modeling of gas dynamics with quasi-one-dimensional system of equations. The system describes the gas flow through a channel with variable cross section using implicit and explicit difference schemes. The purpose of this work is to study the methods efficiency for organizing parallel computations with implicit and explicit difference schemes for solving internal aerodynamics problems. The article presents a comparative analysis of the proposed parallel models for quasi-one-dimensional equations system of gas dynamics. The system describes flows in a channel of variable cross section. Various parallel algorithms are used to solve systems of such type numerically. The method of splitting by physical processes is used for an implicit difference scheme. To suppress the solution oscillations a smoothing operator at the correction stage is introduced in calculations according to the scheme of the predictor-corrector type. In scheme fractional steps the parallel scalar sweep algorithm is used to solve tridiagonal systems with the parametric unknown choice. Besides to compare scheme mentioned above a parallel algorithm is constructed for McCormack's explicit scheme. Such algorithm is widely used in computational aerodynamics. Parallel computations are held by computing structures with distributed memory and by another one – with linear switching dependence between computing devices of the working field. The paper presents time estimations for each computing stage (both by implicit and explicit difference schemes). It helped to calculate the developed parallel algorithms efficiency. It is concluded that the acceleration factor in explicit scheme depends linearly on the computing devices number.

Keywords: System of gas dynamics equations; predictor – corrector method; parallel computing organization; estimation of parallel algorithm time.

Введение. С ростом производительности современной вычислительной техники, основанной на многопроцессорности (многопотокowości), возрастает роль организации параллельных вычислений. В настоящее время разработано много базовых параллельных алгоритмов [3, 4, 17] для различных вычислительно сложных задач. Задачи вычислительной аэродинамики являются одной из основных областей применения параллельных вычислений [7, 11, 12]. В работе рассматривается параллельное моделирование квазиодномерной системы уравнений газовой динамики [1, 5, 2] описывающей течение газа по каналу переменного сечения по неявной и явной разностным схемам.

Построение параллельной модели неявного решения течения газа основывается на применении алгоритма параллельной скалярной прогонки [8, 10, 14] для решения трехдиагональных матриц, получающихся на дробных шагах схемы. На этапе коррекции восстанавливается консервативность схемы и происходит подавление осцилляций в решении [18–20].

Параллельные вычисления по явной схеме строятся на использовании геометрического параллелизма для схемы Маккормака [13, 15, 16]. Внутренний параллелизм заложенный в задачи позволяет получить линейное ускорение от числа работающих вычислительных устройств [9, 6].

Основная часть. Проведем сравнительный анализ параллельных разностных моделей для решения системы квазиодномерных уравнений газовой динамики, описывающих течения в канале переменного сечения [1, 5], полученных путем осреднения параметров потока в поперечном направлении. Здесь $A(x)$ – площадь поперечного сечения канала.

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(A\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(A\rho u) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(A\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}[A(\rho u^2 + p)] = p \frac{dA}{dx} \\ \frac{\partial}{\partial t}(AE) + \frac{\partial}{\partial x}[A(u(E + p))] = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Система записывается в векторном дивергентном виде уравнением

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} W = F \quad (2)$$

или в недивергентном виде – уравнением

$$\frac{\partial f}{\partial t} + Bf = 0, \quad f = (\rho, u, p)^T.$$

Для численного решения системы уравнений могут использоваться разностные схемы приближенной факторизации и схемы типа предиктор-корректор с различной формой расщепления и различным порядком аппроксимации расщепленных разностных операторов, векторов потоков и вектора правой части.

1. Параллельные вычисления по неявным разностным схемам. Исследования. При вычислении решения искомой системы уравнений на высокопроизводительной вычислительной структуре с линейной коммутационной зависимостью по схеме предиктор-корректор с введением сглаживающего оператора на этапе коррекции ([18],[20]):

$$\begin{cases} \frac{f^{n+\frac{1}{4}} - f^n}{\tau\alpha} + B_{1h}^1 f^{n+\frac{1}{4}} = 0 \\ \frac{f^{n+\frac{1}{2}} - f^{n+\frac{1}{4}}}{\tau\alpha} + B_{2h}^1 f^{n+\frac{1}{2}} = 0 \\ \frac{U^{n+1} - U^n}{\tau} + \Lambda^2 W^{n+\frac{1}{2}} = F^{n+\frac{1}{2}} \end{cases}$$

получаем следующие временные оценки (для одной итерации):

На первом дробном шаге этапа предиктора при вычислении компонент плотности и скорости (давление переносится с предыдущего временного слоя) будет затрачено (здесь $m = [N/p]$):

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = (40m - 50)t_a + 8t_0$$

время на выполнение последовательного расчета:

$$T_{noc} = (16p - 14)t_a + 6(p - 2)t_0$$

время на вычисление коммутационных обменов:

$$T_0 = 10(p - 2)t_0$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = (16N + 2)t_a$$

Здесь параметры t_a и t_0 – осредненное время выполнения одной арифметической операции и время выполнения операции обмена одним словом (соответственно) между соседними вычислительными устройствами. Параметры t_a и t_0 зависят от топологии сети коммутационной системы вычислительной структуры.

На втором дробном шаге этапа предиктора вычисляется давление и пересчитывается значение скорости (плотность переносится с первого дробного шага).

На этом этапе имеем:

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = (30m - 25)t_a + 4t_0$$

время на выполнение последовательного расчета:

$$T_{noc} = (8p - 7)t_a + 3(p - 2)t_0$$

время на вычисление коммутационных обменов:

$$T_0 = (5p - 9)t_0$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = (13N + 1)t_a$$

На этапе коррекции восстанавливается консервативность схемы, но из-за симметричной аппроксимации первых производных вектора потока и правой части в решении появляются осцилляции. Для их подавления в разностную схему вводится следующий сглаживающий оператор второго порядка малости ([2]):

$$\Delta W_j = \frac{W_{j+1} - W_{j-1}}{2h} - \frac{h}{2} \text{sign}(u) \varepsilon \frac{W_{j+1} - 2W_j + W_{j-1}}{h^2},$$

$$\varepsilon = \frac{|W_{j+1} - 2W_j + W_{j-1}|}{|W_{j+1} - W_j| + |W_j - W_{j-1}|} \quad \text{и} \quad \varepsilon = 0, \text{ если } |W_{j+1} - W_j| + |W_j - W_{j-1}| = 0.$$

С учетом преобразования разностной схемы время работы высокопроизводительной системы на этом этапе вычислений:

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = 62mt_a + 8t_0$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = 62Nt_a$$

Полное время параллельной работы на всех этапах численного алгоритма расчета течения газа по неявной разностной схеме составит ([10]):

$$T_{nop} \approx (132m + 24p - 96)t_a + 24pt_0 - 27t_0$$

временных тактов.

Для однопроцессорной вычислительной системы оно составляет

$$T \approx (91N + 3)t_a \text{ временных тактов.}$$

Коэффициент ускорения решения аэродинамической задачи на вычислительной структуре выбранной архитектуры приближенно равен

$$\bar{K}_y \approx \frac{91N}{132m + 24(1 + \alpha)p}.$$

Здесь за $\alpha = \frac{t_0}{t_a}$ обозначается величина, характеризующая быстродействие канала связи.

Замечание. Оценки приведены для одного временного шага. Для получения стационарного решения методом установления необходимо провести сотни итераций.

2. Параллельные вычисления по явным разностным схемам. Для численного решения воспользуемся явной разностной схемой Макормака [13], которая представляет схему типа предиктор-корректор, и может быть записана для системы (2), например, в следующей операторной форме:

$$\begin{cases} U_j^{n+1/2} = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (W_j^n - W_{j-1}^n) + \Delta t F_j^n \\ U_j^{n+1} = \frac{1}{2} (U_j^n + U_j^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (W_{j+1}^{n+1/2} - W_j^{n+1/2}) + \frac{\Delta t}{2} F_j^{n+1/2} \end{cases} \quad (3)$$

Здесь вектор решения $U = \begin{pmatrix} A\rho \\ A\rho u \\ A\rho E \end{pmatrix}$, вектор потока $W = \begin{pmatrix} A\rho u \\ A\rho u^2 + p \\ A\rho u(E + p) \end{pmatrix}$ и вектор правой части $F = \begin{pmatrix} 0 \\ p \frac{dA}{dx} \\ 0 \end{pmatrix}$.

Благодаря использованию сопряженных разностных операторов на шагах предикции и коррекции достигается второй порядок аппроксимации по пространству, но так как схема явная то для получения устойчивого решения должно быть выполнено условие куранта.

Проведем временной анализ параллельного решения системы (1) или (2) по явной схеме Макормака на вычислительной системе с линейной топологией связи. Как и в случае неявной разностной схемы для получения временных оценок вычисления разобьем на промежуточные этапы.

Этап вычисления значений координат вектора потока для предиктора схемы. Используя уравнения состояния совершенного газа для вычисления значений внутренней энергии единицы массы газа и массовой плотности полной энергии, а также для пересчета координат вектора потока, получаем следующие временные оценки (для начальной итерации):

временем выполнения параллельного расчета:

$$T_{np} = 20mt_a + t_0$$

и временем работы однопроцессорной системы:

$$T = 20Nt_a$$

На остальных итерациях временные оценки совпадают с аналогичным этапом для корректора схемы.

Этап реализации предиктора. Для нахождения вектора решения на промежуточном временном слое (первое уравнения системы (3)) вычислительное устройство затратит:

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = 11mt_a + 5t_0$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = 11Nt_a$$

Этап вычисления значений координат вектора потока для корректора схемы. Для проведения расчетов на этапе коррекции разностного решения надо пересчитать компоненты векторов потоков и правой части для промежуточного временного слоя. Значение давления считается отдельно, так как оно не входит в решение системы. С учетом этого

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = 17mt_a$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = 17Nt_a$$

Этап реализации корректора. На последнем этапе численного алгоритма вычисляются значения вектора решения на новом временном слое. Расчет ведется для второго разностного уравнения системы (3). В вычислениях используются значения параметров двух временных слоев, поэтому время решения больше чем на этапе предиктора и равно:

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = 17mt_a + 3t_o$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = 17Nt_a$$

Время параллельной работы вычислительной системы на этапах численного алгоритма расчета течения газа по явной разностной схеме составит $T_{np} \approx 65mt_a + 9t_o$ временных тактов.

Для однопроцессорной вычислительной системы оно составляет $T \approx 65Nt_a$ временных тактов.

Заключение. Проведено исследование эффективности способов организации параллельных вычислений по неявным и явным разностным схемам решения внутренних задач аэродинамики со сравнительным анализом предложенных параллельных моделей. Приведенные оценки для времени вычислений на каждом этапе показывают, что коэффициент ускорения для явной схемы линейно зависит от числа вычислительных устройств. Следует отметить, что в расчетах не учитывались временные затраты, связанные с обращением к памяти системы.

При организации вычислений предпочтительнее использовать явные параллельные разностные модели (хотя они и обладают меньшим запасом устойчивости) так их эффективность растет линейно с ростом вычислительных элементов системы, в то время как неявные параллельные схемы имеют предел масштабируемости и с ростом вычислительных устройств эффективность алгоритма уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковеня В.М. Алгоритмы расщепления при решении многомерных задач аэрогидродинамики. – Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2014. – 280 с.
2. Kovenya V.M. Splitting method in the problems of CFD// Computational Fluid Dynamics Journal. –1999. – Vol. 8, No. 2. – P. 186-194.
3. Voevodin V.V. Mathematical foundations of parallel computing // Series in computer science. – World Scientific Publishing Co, 1992. – Vol. 33. – 343 p.
4. Hoffman J.D. Numerical methods for engineers and scientists. 2nd ed. revised and expanded. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. – P. 651-701.
5. Борисов А.В., Ковеня В.М., Яненко Н.Н. Об одной консервативной разностной схеме для решения стационарных уравнений газовой динамики // Математические модели течений жидкости: Тр. 6-го Всесоюзного семинара по численным методам механики вязкой жидкости, Кунгура осень 1976. – Новосибирск.-ИТиПМ, 1978. – Т. 10, №6. – С. 15-22.
6. Гамolina И.Э., Семенистый В.В. Параллельная организация вычислений при расчете задач аэрогидродинамики прямыми методами. Международное Научное Сотрудничество, Образование и Культура. – Ростов-на-Дону: Изд-во Summa-Rerum, 2014. – № 3(4). – С. 23-28.
7. Nour-Omid B., Raefsky A., Lyzenga G. Solving finite element equations on concurrent computers / A.K. Noor, ed. American Soc. Mech. – 1986. – P. 291-307.

8. Яненко Н.Н., Коновалов А.Н., Бугров А.Н., Шустов Г.В. Об организации параллельных вычислений и распараллеливание прогонки // Численные методы механики сплошных сред. – 1978. – № 7. – С. 136-139.
9. Семенистый В.В., Гамolina И.Э., Дурагина В.В. Конструирование эффективных параллельных алгоритмов для решения полной двумерной системы уравнений Навье-Стокса по явной схеме Мак-Кормака // Сб. материалов II международной научно-практической конференции «Исследования и разработки в перспективных научных областях». – Новосибирск, 2017. – С. 88-95.
10. Семенистый И.И., Гамolina И.Э., Дурагина В.В. Моделирование сверхзвукового течения по каналу переменного сечения с использованием среды ANSYS. ("КомТех"). – Таганрог. – 2019. – С.138-145.
11. Семенистый В.В., Гамolina И.Э. Исследование способов организации параллельного решения внешних задач аэродинамики на основе схем расщепления // Известия ЮФУ, Технические науки. – 2020. – №5. – С. 60-67.
12. Семенистый В.В., Гамolina И.Э. Организация структур данных при параллельных вычислениях задач аэродинамики // Матер. 4-той Международной научной конференции, Майкоп. – 2021. – С.262-265.
13. MacCormack R.W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // J. Spacecraft and Rockets. – 2003. – Vol. 40, No. 5. – P. 757-763.
14. Теренков В.И., Арсений В.Ф., Евсеев Е.Г., Луцкий Я.А., Семенистый В.В. О корректности и устойчивости алгоритма распараллеливания прогонки // Тр. инт-та прикл. математ. им. И.Н. Векуа Тбилис. ун-та, Тбилиси. – 1985. – С. 298-307.
15. Caughey Hafez. Contributions of Robert Mac-Cormack to Computational Fluid Dynamics // Frontiers of Computational Fluid Dynamics. – 2002. – P. 1-26.
16. Bram V. Upwind and High-Resolution Methods for Compressible Flow: From Donor Cell to Residual-Distribution Schemes // Communications in computational physics. – 2006. – Vol. 1, No. 2. – P. 192-206.
17. Баркалов К.А. Методы параллельных вычислений. Тбилисского ун-та. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – 124 с.
18. Ковеня В.М., Слюняев А.Ю. Модификация алгоритмов расщепления для задач газовой динамики и Навье-Стокса // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № 3. – С.71-86.
19. Kovenya V.M., Eremin A.A. Predictor-Corrector Difference Scheme for Numerical Solution of the Euler and Navier-Stokes Equations // Journal of Mathematical Sciences. – 2016. – Vol. 215, No. 4. – P. 484-498.
20. Hoffman J.D. Numerical methods for engineers and scientists. Second edition revised and expanded. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. – P. 651-701.

REFERENCES

1. Kovenya V.M. Algoritmy rasshchepleniya pri reshenii mnogomernykh zadach aerogidrodinamiki [Splitting algorithms for solving multidimensional problems of aerohydrodynamics]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 2014, 280 p.
2. Kovenya V.M. Splitting method in the problems of CFD, *Computational Fluid Dynamics Journal*, 1999, Vol. 8, No. 2, pp.186-194.
3. Voevodin V.V. Mathematical foundations of parallel computing, *Series in computer science*. World Scientific Publishing Co, 1992, Vol. 33, 343 p.
4. Hoffman J.D. Numerical methods for engineers and scientists. 2nd ed. revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc. 2001, pp. 651-701.
5. Borisov A.V., Kovenya V.M., Yanenko N.N. Ob odnoy konservativnoy raznostnoy skheme dlya resheniya statsionarnykh uravneniy gazovoy dinamiki [On one conservative difference scheme for solving stationary equations of gas dynamics], *Matematicheskiye modeli techeniy zhidkosti: Tr.6-go Vsesoyuznogo seminar po chislennym metodam mekhaniki вязкой zhidkosti* [Mathematical Models of Fluid Flows: Proceedings of the 6th All-Union Seminar on Numerical Methods of Viscous Fluid Mechanics, Kungura autumn 1976]. Novosibirsk: ITiPM, 1978, Vol. 10, No 6, pp. 15-22.

6. Gamolina I.E., Semenisty V.V. Parallel'naya organizatsiya vychisleniy pri raschete zadach aerogidrodinamiki pryamymi metodami. Mezhdunarodnoe nauchnoe sotrudnichestvo, obrazovanie i kultura [Parallel organization of calculations in the calculation of problems of aerohydrodynamics by direct methods. International scientific cooperation, education and culture]. Rostov-on-Don: Summa-Rerum. 2014, No. 3 (4), pp. 23-28.
7. Nour-Omid B., Raefsky A., Lyzenga G. Solving finite element equations on concurrent computers. A.K. Noor, ed.. American Soc. Mech. 1986, pp. 291-307.
8. Yanenko N.N., Konovalov A.N., Bugrov A.N., Shustov G.V. Ob organizatsii parallel'nykh vychisleniy i rasparrallelivaniye progonki [On the organization of parallel calculations and parallelization of the run], Chislennyye metody mekhaniki sploshnykh sred [Numerical methods of continuum mechanics], 1978, No. 7, pp. 136-139.
9. Semenisty V.V., Gamolina I.E., Duryagina V.V. Konstruirovaniye effektivnykh parallel'nykh algoritmov dlya resheniya polnoy dvumernoy sistemy uravneniy Nav'e-Stoksa po yavnoy skheme Mak-Kormaka [Designing effective parallel algorithms for solving a complete twodimensional system of Navier-Stokes equations according to the explicit McCormack scheme], Sb. materialov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Issledovaniya i razrabotki v perspektivnykh nauchnykh oblastiakh» [Collection of materials of the II International Scientific and Practical Conference "Research and Development in promising scientific fields"]. Novosibirsk. 2017, pp. 88-95.
10. Semenisty I.I., Gamolina I.E., Duryagina V.V. Modelirovaniye sverkhzvukovogo techeniya po kanalu peremennogo secheniya s ispolzovaniyem sredy ANSYS. [Supersonic flow simulation through a channel with variable cross section using software ansys "KomTekh"]. Taganrog. 2019, pp. 138-145.
11. Semenisty V.V., Gamolina I.E. Issledovaniye sposobov organizatsii parallelnogo resheniya vneshnikh zadach aerodinamiki na osnove skhem rasshchepleniya [Study of parallel solution organization for external aerodynamics problems based on splitting schemes], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki. [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5, pp. 60-67.
12. Semenisty V.V., Gamolina I.E. Organizatsiya struktur dannykh pri parallelnykh vychisleniyakh zadach aerodinamiki [Data structure organization using parallel calculations for problems of aerohydrodynamics], Mater. 4-toy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Proceedings of the 4th International Scientific Conference, Maykop], 2021, pp. 262-265.
13. MacCormack R.W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering, *J. Spacecraft and Rockets*, 2003, Vol. 40, No. 5, pp. 757-763.
14. Terenkov V.I., Arsenii V.F., Evseev E.G., Lutskiy Ya.A., Semenisty V.V. O korrektnosti i ustoychivosti algoritma rasparrallelivaniya progonki [On the correctness and stability of the parallelization algorithm of the run], Tr. int-ta prikl. matemat. im. I.N. Vekua Tbilis. un-ta [Proceedings of the I.N. Vekua Institute of Applied Mathematics]. Tbilisi, 1985, pp. 298-307.
15. Caughey Hafez. Contributions of Robert Mac-Cormack to Computational Fluid Dynamics, *Frontiers of Computational Fluid Dynamics*, 2002, pp. 1-26.
16. Bram V. Upwind and High-Resolution Methods for Compressible Flow: From Donor Cell to Residual-Distribution Schemes, *Communications in computational physics*, 2006, Vol. 1, No. 2, pp. 192-206.
17. Barkalov K.A. Metody parallelnykh vychisleniy. [Parallel Computing Methods]. N. Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskogo gosuniversiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2011, 124 p.
18. Kovenya V.M., Slyunyayev A.Yu. Modifikatsiya algoritmov rasshchepleniya dlya zadach gazovoy dinamiki i Navye-Stoksa [Modification of splitting algorithms for gas dynamics and Navier-Stokes problems], *Vychislitelnyye tekhnologii* [Computational technologies], 2007, Vol. 12, No. 3, pp. 71-86.
19. Kovenya, V.M., Eremin A.A. Predictor-Corrector Difference Scheme for Numerical Solution of the Euler and Navier-Stokes Equations, *Journal of Mathematical Sciences*, 2016, Vol. 215, No. 4, pp. 484-498.
20. Hoffman J.D. Numerical methods for engineers and scientists. Second edition revised and expanded. – New York: Marcel Dekker, Inc.. 2001, pp. 651-701.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.Ю. Медведев.

Семенистый Владимир Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: vlad60sem@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282135206; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Гамолина Ирина Эдуардовна – e-mail: iegamolina@sfnu.ru; тел.: 89185190837; кафедра высшей математики; к.т.н.; доцент.

Semenisty Vladimir Vasil'evich – Southern Federal University; e-mail: vlad60sem@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282135206; the department of higher mathematics; cand. of phys.-math. sc.; associate professor.

Gamolina Irina Eduardovna – e-mail: iegamolina@sfnu.ru; phone: +79185190837; the department of higher mathematics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.4(519.766)

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-189-201

О.И. Атакищев, В.Г. Грибулин, В.Е. Ананьев, Е.А. Титенко

РЕКОНФИГУРАЦИОННЫЕ МЕТАГРАММАТИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОЭТАПНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ АТАК

Цель исследования определяется существенным расширением классов угроз современным автоматизированным системам, динамичным развитием тактик и техник атак на их информационные ресурсы. Имеющиеся методы и аппаратно-программные средства эффективно противостоят одноэтапным атакам, имеющим фиксированную схему деструктивного воздействия и ограниченную во времени активность. Современные типы деструктивных воздействий понимаются как многоэтапные комплексные атаки, для которых актуально создание адекватного и эффективного аппарата описания, моделирования и отражения новых типов атак. Методы исследования основаны на развитии структурно-алгебраического подхода, в первую очередь – аппарата формальных грамматик и метаграмматик. Установлено, что известные формальные модели для описания и моделирования многоэтапных комплексных атак получаются громоздкими, затруднена их модификация. Большинство дескрипторов атак не оснащены представительным набором методов структурного и алгебраического анализа подобных сложно структурированных объектов. Для описания, моделирования и отражения таких атак разработан класс реконфигурационных метаграмматик. Эти метаграмматики содержат набор обычных и реконфигурационных правил согласования между элементами грамматик в составе грамматики. Данные правила позволяют выбирать в зависимости от достигнутых состояний синтаксического анализа конкретные ветви графа поиска. Это свойство существенно сокращает пространство перебора и повышает тем самым удельную эффективность поиска. Разработанный аппарат реконфигурационных метаграмматик создает необходимый теоретический базис для их эффективного использования при моделировании и отражении существующих и перспективных МКА, имеющих структурно-лингвистическое описание. Полученная в результате квалитетическая пятимерная диаграмма, построенная на набору практически значимых показателей (однородность, связность, компактность, адаптивность, направленность) показала преимущество реконфигурационных метаграмматик перед метаграмматиками общего вида. Методы синтаксического анализа в реконфигурационных метаграмматиках отличаются структурными правилами реконфигурации (структурной адаптации) и критериями выбора при их адаптации. Эти процедурные особенности позволяют расширить возможности моделирования атак и повысить эффективность процедур отражения многоэтапных комплексных атак.

Моделирование; иерархический грамматический разбор; структурная адаптация; реконфигурационное правило согласования.

O.I. Atakischev, V.G. Gribunin, V.E. Ananiev E.A. Titenko

RECONFIGURATION METAGRAMMATICS FOR DESCRIPTION AND MODELING OF MULTI-STAGE COMPLEX ATTACKS

The purpose of the study is determined by a significant expansion of the classes of threats to modern automated systems, the dynamic development of tactics and techniques for attacking their information resources. The available methods and hardware and software tools effectively resist single-stage attacks that have a fixed scheme of destructive impact and time-limited activity. Modern types of destructive influences are understood as multi-stage complex attacks, for which it is important to create an adequate and effective apparatus for describing, modeling and repelling new types of attacks. Research methods are based on the development of a structural-algebraic approach, primarily on the apparatus of formal grammars and metagrammars. It has been established that the well-known formal models for describing and modeling multi-stage complex attacks are cumbersome, and their modification is difficult. Most attack descriptors are not equipped with a representative set of methods for structural and algebraic analysis of such complexly structured objects. To describe, model and repel such attacks, a class of reconfiguration metagrammars has been developed. These metagrammars contain a set of regular and reconfiguration rules for matching between grammar elements within the grammar. These rules allow you to select specific branches of the search graph depending on the achieved parsing states. This property significantly reduces the search space and thus increases the specific efficiency of the search. The developed apparatus of reconfiguration metagrammars creates the necessary theoretical basis for their effective use in modeling and reflecting existing and prospective ICAs that have a structural-linguistic description. The resulting qualimetric five-dimensional diagram, built on a set of practically significant indicators (homogeneity, connectivity, compactness, adaptability, directionality) showed the advantage of reconfiguration metagrammars over general metagrammars. Methods of parsing in reconfiguration metagrammars differ in structural rules of reconfiguration (structural adaptation) and selection criteria for their adaptation. These procedural features make it possible to expand the possibilities of attack modeling and improve the efficiency of procedures for repelling multi-stage complex attacks.

Modeling; hierarchical parsing; structural adaptation; reconfiguration-matching rule.

Введение. Современный этап развития автоматизированных систем (АС) различного назначения в РФ и зарубежных странах характеризуется существенным расширением множеств угроз их информационной безопасности (ИБ) [1]. В первую очередь это связано с повышением роли самих АС при решении современных задач управления реальным уровнем сложности, информационно-аналитических задач сбора, актуализации, концентрации информации геополитического, жизнеобеспечивающего, специального характера, способной дестабилизировать работу органов государственной власти различных уровней, объектов критической инфраструктуры (газоснабжение, энергетика, объекты водного хозяйства и др.) силами недружественных стран, криминальных структур, отдельных хакеров и хакерских группировок. Главная особенность - существенное расширение классов угроз современным АС, динамичное развитие тактик и техник атак на их ресурсы. Переход систем и аппаратно-программных средств деструктивного воздействия от одиночных или периодических атак к непрерывным комбинированным сценариям определяет необходимость создания адекватных средств защиты от угроз, выявления уязвимостей и противостояния комплексу атак различных типов.

Также существенное усложнение АС различных классов создает дополнительные угрозы их информационной безопасности, потенциально увеличивает возможности внешних и внутренних нарушителей по реализации данных угроз, в том числе путем проведения многоэтапных атак, носящих комплексный характер по форме и характеру проведения. В большинстве случаев такие комплексы атак характеризуются комбинаторной реализацией числа и типов таких этапов как раз-

ведка (мониторинг), маскировка входа/выхода, передача похищенной информации и данных о функционировании АС в защищенном и замаскированном режиме, комплексного проактивного воздействия на разнородные информационные и телекоммуникационные ресурсы различных контуров АС и т.п. Большое число подобных этапов и элементов атак систематизировано в рамках модели (матрицы) MITRE ATT&CK [1], которая постоянно расширяется, отражает особенности реализации новых классов реальных многоэтапных атак.

Все это определяет необходимость решения задач ИБ АС на новом уровне, в том числе и учитывающем характер современных многоэтапных комплексных атак (МКА).

Проведенный анализ современных механизмов парирования угроз (отражения атак) ИБ АС показал следующее.

При создании систем ИБ современных АС реализуются передовые механизмы (методы) и технологии защиты информации, эффективно противостоящие одноэтапным атакам, имеющим фиксированную схему деструктивного воздействия и ограниченную во времени активность. На смену пространственно-временной локализации атак на ресурсы АС пришла непрерывно функционирующая противоборствующая информационно-разведывательная среда, анализирующая условия возникновения деструктивных процессов и генерирующая систему атак, имеющих иерархию и изменяемую прагматику исполнения. В этом контексте многоэтапные комплексные атаки (МКА) отличаются реконфигурацией, направленной на управляемую адаптацию структуры и модификацию параметров, что позволяет учитывать опыт МКА и новые сочетания параметров.

В связи с этим системы ИБ современных АС не в полной степени отвечают перспективным требованиям по адаптации к структурам перспективных МКА. Системы ИБ не позволяют оперативно управлять выбором стратегий и конкретных алгоритмов (тактик и схем) отражения комплексных многоэтапных адаптивных (реконфигурируемых) атак на ресурсы АС ВН. В большинстве случаев не удается реализовать общую стратегию адаптивного подхода к отражению подобных сложно структурированных атак, основанную, в первую очередь, на ситуационном сочетании частных стратегий и алгоритмов, со структурным дообучением в процессе функционирования систем и средств защиты информации АС.

Реализация перспективных механизмов (методов, методик) отражения современных комплексных атак, требует создания адекватного методического аппарата их отражения с адаптивной структурной подстройкой под реализуемые в атаках многоэтапные сложно структурированные процедуры.

Это позволит преодолеть объективное противоречие между возросшими требованиями к результативности отражения появившихся в последние годы классов многоэтапных комплексных атак и возможностями существующего методического аппарата по их отражению.

Постановка задачи. Исследование состояния вопроса по созданию подобных адаптивных механизмов и средств отражения МКА показало, что разработку для них методического аппарата и создание технических средств в последние годы предложено осуществлять в рамках достаточно представительного класса подходов, ориентированных на применение различных моделей описания вариантов тактик и техник МКА, а также стратегий и алгоритмов их отражения. Применительно к МКА выделяются следующие подходы [2]:

- ◆ алгебраические;
- ◆ статистические;
- ◆ адаптивные;
- ◆ поисковые;
- ◆ структурно-лингвистические.

Сводная табл. 1 отражает основные особенности данных подходов применительно к МКА.

Таблица 1

Особенности подходов анализа и оценки МКА

Подходы	Особенности	Показатели					
		Сложность расчета	Модульность	Иерархия	Предобработка	Имперфективная инф-ция	Параллелизм
Алгебраический	Базовые процессы и атаки описываются системой уравнений с параметрами	высокая	-	-	+	-	высокий
Статистический	Описание атак законами распределения случайных величин	средняя	-	-	-	-	средний
Поисковый	Формализация пространства поиска. Четкие критерии перебора	средняя	+	-	+	-	высокий
Адаптивный	Изменяемые веса, устойчивость к зашумлению, возможность обучения	высокая	-	-	+	+	средний
Структурно-алгебраический	Описание атак в виде сложно структурированных дескрипторов	средняя	+	+	+	+	высокий

Проведенный анализ предложенных к настоящему времени методов и методик применительно к решению задач отражения МКА в рамках структурно-алгебраического подхода показал также, что наиболее перспективным является создание и использование новых классов метаграмматик и ориентированных на них методов синтаксического анализа для учета специфики решаемых прикладных задач в области ИБ АС повышенной структурной сложности.

В рамках данных подходов атака понимается и описывается как некий объект-дескриптор, имеющий преимущественно локальные признаки и частные свойства. Тем не менее рассмотрение МКА предписывает в моделях и методах ориентироваться на характеристики иерархичности, компактности описания, структурной наращиваемости, потенциального параллелизма данных, интеграции с моделями обработки знаний, что позволяет рассматривать описание и реализацию атак как активную систему, имеющую целенаправленное изменяемое во времени поведение.

Перечисленные свойства в полной мере присутствуют в структурно-алгебраическом подходе [3–16], основной особенностью которого является использование подклассов атрибутивных формальных грамматик и грамматических систем (в первую очередь-метаграмматик) для формального описания множеств правил формирования стратегий и алгоритмов (тактик и техник) реализации МКА, их параметров, а также методов полного и неполного синтаксического анализа в качестве процедурной основы адаптивных стратегий, методов и методик отражения МКА.

Метод решения. Применительно к решению задач отражения МКА, особенности данного подхода в известных работах не рассматривались, в его рамках не разработаны метаграмматические модели и методы синтаксического анализа, учитывающие структурно-параметрические особенности отражения МКА, в целом, не разработаны методики отражения различных классов МКА, позволяющие эффективно решать прикладные задачи в рассматриваемой области исследований.

В целом, проведенный анализ показал, что при проведении перспективных исследований в данной прикладной области первоочередному решению подлежит достаточно широкий круг задач, связанных с созданием структурно-алгебраических моделей рассматриваемых сложно структурированных МКА. Данные модели должны отражать большинство структурных, и алгебраических особенностей многоэтапных комплексных процедур атак, динамику их структурно-параметрической адаптации под конкретные действия систем ИБ АС [2–4].

Также проведенный анализ известных подходов и методов решения задач формального описания (моделирования) МКА показал, что в рамках существующих формальных схем практически невозможно специфицировать все основные синтаксические (признаковые), структурные, параметрические, стохастические и семантические (а также другие экстралингвистические) отношения, свойственные основным классам МКА на ресурсы АС [2–12].

Известные формальные модели получают громоздкими, затруднена их разработка и модификация, большинство языков описания (моделирования) правил формирования МКА не оснащены достаточно представительным набором методов структурного (в первую очередь синтаксического) и алгебраического анализа подобных сложно структурированных атак.

Преодоление этих недостатков при решении рассматриваемого класса задач возможно при дальнейшем развитии аппарата метаграмматик в рамках создания их нового класса – реконфигурационных метаграмматик (РМГ), создающих формальный базис решения представительного класса задач в рассматриваемой прикладной области исследований.

В данной статье приводятся основные результаты создания и развития формального аппарата РМГ и особенности его практического применения для решения рассматриваемого класса задач.

В основу предлагаемого подхода к моделированию МКА положено понятие РМГ, которую определим как формальную систему следующего вида.

Определение 1. Реконфигурационная МГ представляет собой систему-тройку

$$G_{PMG} = \langle \{ G_{ia} \}, G_P, W_{AP} \rangle, \quad (1)$$

где $\{ G_{ia} \}$ – множество атрибутивных грамматик определенного вида, $i=0 \dots 3$;

G_P – реконфигурационная грамматика, входящая в МГ,

W_{AP} – реконфигурационная схема метаграмматики, содержащая набор обычных [1–5] и реконфигурационных правил согласования (определенного рода отображений, задающих условия переходов между атрибутивными грамматиками) между элементами грамматик, входящих в РМГ.

Реконфигурационные правила согласования определяют отображения элементов G_p и продукциями (метками продукций) $\{G_{ia}\}$. Данные правила позволяют выбирать в зависимости от достигнутых состояний синтаксического анализа G_p в РМГ, конкретные ветви разбора или их модификации для соответствующих грамматик $\{G_{ia}\}$. Это свойство РМГ существенно сокращает пространство перебора, определяя G_p совершать только необходимые или близкие к ним шаги грамматического разбора и тем самым повышая удельную эффективность поиска (синтаксического анализа). Введение реконфигурационных правил согласования определяет новизну заявленной системы-тройки – реконфигурационной МГ.

Таким образом, РМГ представляет собой систему взаимосвязанных грамматик, в которой обычные правила согласования задают взаимосвязи между элементами $\{G_{ia}\}$, аналогично [2], а реконфигурационные правила согласования определяют зависимости применения продукций в грамматиках $\{G_{ia}\}$ в зависимости от состояния разбора грамматики G_p , которую в дальнейшем будем определять как «реконфигурационную грамматику». Взаимосвязь грамматик существенно повышает возможности существующих МГ по реконфигурации (продукционной адаптации) цепочек вывода в грамматиках $\{G_{ia}\}$, что соответствует реконфигурации процедур МКА на различных этапах, если этим этапам поставить в соответствие отдельные грамматики. При этом правилам согласования поставлены в соответствие взаимосвязи этапов МКА, что позволяет формализовать и анализировать виды многоэтапных комплексных атак.

Проведенный анализ показал, что класс РМГ является развитием общего теоретического аппарата метаграмматик путем добавления в схему метаграмматики нового класса реконфигурационных правил согласования и реконфигурационной грамматики, по существу, в продукционной форме, управляющей реконфигурацией синтаксического анализа в грамматиках $\{G_{ia}\}$ РМГ.

Аналогично другим классам метаграмматик, РМГ допускают применение в схемах $\{G_{ia}\}$, реконфигурируемых по ситуациям, цепочек продукций. При этом используются дополнительные реконфигурационные правила согласования. В результате реконфигурационная грамматика, позволяет явным образом отразить структурную адаптацию реализуемых процедур МКА.

Входящее в РМГ множество грамматик $\{G_i\}$ может быть как конечным, так и бесконечным. В последнем случае должна быть решена проблема порождения (перечисления, рекурсивного задания) множества $\{G_i\}$ и его элементов.

В дальнейшем, аналогично [3], будут рассматриваться только конечные множества $\{G_i\}$. Входящие в эти множества грамматики могут отличаться по типу используемых правил подстановки, различных экстралингвистических отношений, задаваемых мер (вероятностных, нечетких) на множестве правил подстановки. При моделировании МКА с использованием РМГ, аналогично ранее предложенным метаграмматикам [2–16], применяется практически полный спектр известных классов формальных грамматик в $\{G_{ia}\}$.

Определение 2 (Классификация РМГ по типу правил подстановки). Будем называть РМГ метаграмматикой типа i и обозначать $G(i)$, если в ней используются грамматики типа i по классификации Хомского [3], $i=0...3$.

В соответствии с этим определением РМГ будем называть МГ типа 3 (регулярной ОП МГ), если множество $\{G_i\}$ и G_p включает только грамматики типа 3 (регулярные грамматики). Если хотя бы один элемент множеств $\{G_i\}$ и G_p является грамматикой типа 2 (контекстно-свободной грамматикой), то РМГ относится к типу 2 (контекстно-свободная РМГ). То же самое относится к контекстно-зависимым (тип 1) и неограниченным (тип 0) РМГ.

РМГ, аналогично другим метаграмматическим системам, может содержать как однотипные, так и разнотипные грамматики, отличающиеся использованием дополнительных элементов и отношений между входящими в них элементами (грамматики предшествования, управляемого предшествования, программные, графовые (веб), КИ-графовые [2] грамматики и т.п.), а также особенностями задания вероятностных и других мер на множествах правил подстановки и элементах грамматик (стохастические [3], нечеткие [5] грамматики).

Определение 3. Будем называть РМГ однородной, если множества $\{G_i\}$ и G_p состоят из однотипных грамматик (в указанном выше смысле). В противном случае будем называть РМГ неоднородной.

В РМГ могут быть использованы различные правила согласования, отличающиеся видом отображений множеств элементов грамматик $\{G_i\}$ и G_p , физической (семантической) интерпретацией этих отображений в соответствии с особенностями МКА, а также в целом формой задания этих отношений при описании правил в РМГ (рекурсивные, перечислительные и др. формы задания). Исходя из того, что при решении конкретных прикладных задач РМГ может использоваться для спецификации различных элементов МКА, а также исходя из необходимости проведения определенного рода операций над грамматиками $\{G_i\}$ в процессе синтаксического анализа, генерации цепочек признаков элементов атак и т.п., в качестве правил согласования могут использоваться отображения, определяющие различные действия.

В данном случае, помимо правил согласования, описанных в известных работах [2–15], предлагается использовать новые типы правил согласования – реконфигурационные (в обозначениях работы [3] – $RP(i)$ - правила согласования). Данные правила согласования представляются в виде $R_{tki} \rightarrow P_{mj}$, где R_{tki} – элемент грамматики G_p , полученный на очередном шаге синтаксического анализа, P_{mj} – m -й набор разрешенных меток продукции j -й грамматики, входящей в РМГ.

Указанные выше правила согласования могут быть дополнены в соответствии с особенностями решаемых задач и применяемых подклассов грамматик $\{G_i\}$, аналогично [2–15].

Система рассматриваемых правил в РМГ в общем случае может содержать как конечные, так и бесконечные наборы отображений. В дальнейшем будем рассматривать РМГ со схемой, содержащей конечное число правил согласования.

В РМГ могут быть выделены однозначные и многозначные правила согласования, в зависимости от используемых отображений. В данном случае многозначные правила могут использоваться для описания и координации параллельных процессов, происходящих при реализации МКА с использованием нескольких атакующих нарушителей.

В зависимости от типа взаимодействующих элементов грамматик обычные и реконфигурационные правила согласования могут быть также разделены на типы в соответствии со следующим определением.

Определение 4. Правило согласования называется правилом типа $R(L_x)P$, если оно задает отображение элемента грамматик G_p типа R в множество элементов грамматик $\{G_i\}$ типа P , где в качестве обозначений правил согласования используются приведенные выше обозначения, а в качестве обозначений элементов грамматик используются общепринятые указатели типа элементов грамматик: S – начальный символ, T – терминальный символ, N – нетерминальный символ, P – продукция, а также A – атрибут.

При наличии в $\{G_i\}$ и G_p специальных подклассов грамматик, имеющих в своем составе дополнительные элементы и правила (программные грамматики и т.п.), возможно использование правил согласования других типов, задающих отношения между элементами $\{G_i\}$ и G_p , аналогично [3].

Определение 5. Будем называть РМГ метаграмматикой с однородной схемой правил согласования, если схема РМГ состоит из однотипных правил. В противном случае будем называть РМГ комбинированной.

Для рассматриваемых РМГ аналогично [3] использовано также понятие обобщенной схемы.

Определение 6. Обобщенной схемой РМГ называется ориентированная нагруженная сеть вида

$$F_O = (\{G_i\}, G_P, D_O, E, f_O),$$

где $\{G_i\}$ и G_P – непустое конечное множество грамматик, входящих в РМГ (множество помеченных вершин);

D_O – конечная последовательность пар вида $\{G_i, G_j\}$, $i, j = 0 \dots 3$, существующих, если имеется хотя бы одно правило согласования (g_i, g_j) вида $AP(i)$;

f_O – отображение множества $\{i, j\}$ в E ($f(i, j)$ – пометки при дугах (g_i, g_j)).

Для более сложных систем правил согласования соответствующим образом должна быть изменена форма задания обобщенной схемы РМГ.

Для РМГ, понятия пути и длины пути в схеме правил согласования интерпретируется аналогично [3]. Для обобщенной схемы РМГ дополнительно определяется путь следующим образом.

Определение 7. Путем длины x в обобщенной схеме РМГ от вершины G_i к вершине G_j называется последовательность пар $(G^*_0, G^*_1) (G^*_1, G^*_2) \dots (G^*_{k-1}, G^*_k)$, где $G_i = G^*_0$, $G_j = G^*_k$ и существует хотя бы один путь вида $AP(i)$ в схеме РМГ длины k от элемента $g_i \in G_i$ до элемента $g_j \in G_j$ (обозначения аналогичны обозначениям в определении 6).

Определение 8. Путь в схеме (обобщенной схеме) РМГ будем называть однородным по типу правил согласования, если все входящие в него пары $(x^*_0, x^*_1) (x^*_1, x^*_2) \dots (x^*_{k-1}, x^*_k)$ (аналогично $(G^*_0, G^*_1) \dots (G^*_{k-1}, G^*_k)$) соответствуют правилам согласования, имеющим одинаковый тип.

Определение 9. Путь в схеме (обобщенной схеме) РМГ, однородный по типу правил согласования называется однородным.

Сведение понятия пути в схеме (обобщенной схеме) РМГ позволяет дать однозначную трактовку ряду других понятий, известных из теории формальных грамматик [3, 12–16], необходимых для описания и моделирования МКА.

Результаты и обсуждение. В ряде практически важных задач моделирования МКА возникает необходимость разбиения множества $\{G_i\}$, аналогично [12], на ряд подмножеств (слоев), стратифицированных по какой-либо системе дополнительных признаков. Подобное разбиение может отражать как объективные структурные свойства моделируемых (специфицируемых) МКА, так и вводиться, исходя из определенных теоретических предпосылок при необходимости сокращения объема метаграмматических моделей, их типизации, уменьшения сложности процедур синтаксического анализа. В дальнейшем подобные РМГ будем называть многоуровневыми или стратифицированными и, если необходимо, явным образом отражать это свойство в записи РМГ аналогично [3].

РМГ создают теоретическую основу для описания, моделирования существующих и новых типов МКА. При этом на структурном уровне качественные свойства РМГ задаются характеристиками однородности состава системы-тройки, связности частных грамматик, входящих в состав РМГ, компактности описания, адаптивности структуры, направленности грамматического разбора. Данные характеристики отражают общие реализационные возможности нового класса метаграмматик. Квалиметрическая диаграмма на рисунке 1 демонстрирует сравнительные возможности МГ общего типа (без реконфигурационных правил согласова-

ния) и реконфигурационных МГ. Квалиметрическая диаграмма построена в пяти-мерном пространстве признаков: 1 – однородность, 2 – связность, 3 – компактность, 4 – адаптивность, 5 – направленность.

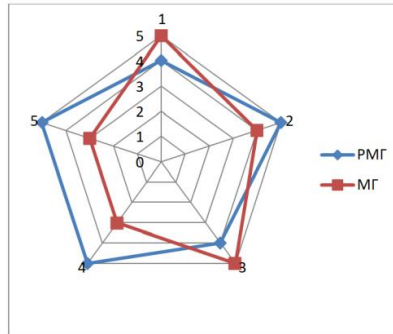


Рис. 1. Квалиметрическая диаграмма МГ и РМГ

Анализ диаграммы на рис. 1 и описанные свойства аппарата РМГ определили следующее:

- ◆ схема метаграмматики позволяет отразить в явном виде многоэтапность правил формирования МКА за счет использования в РМГ разбиения множества $\{G_i\}$, на ряд подмножеств (слоев) или отдельных грамматик, стратифицированных в соответствии с этапами МКА. Прямое структурное соответствие типа МКА и анализирующей ее грамматики обеспечивает межуровневый переход в общем пространстве поиска в соответствующую рассматриваемому типу МКА область графа;
- ◆ схема метаграмматики обеспечивает системную связь правил формирования МКА отдельных этапов за счет использования правил согласования РМГ;
- ◆ правила реконфигурации задают структурную адаптацию МКА при использовании в РМГ специальной реконфигурационной грамматики G_R ;
- ◆ правила реконфигурации согласования позволяют системно управлять модификацией правил согласования нижнего уровня для отдельных этапов МКА.

Выводы. Разработанный класс реконфигурационных МГ включает в свой состав большинство известных подклассов грамматик и позволяет синтезировать набор новых подклассов метаграмматик для решения задач описания и моделирования МКА. Предложенная формализация основных понятий для предложенного класса РМГ создает необходимый теоретический базис для их эффективного использования при моделировании и отражении существующих и перспективных МКА, имеющих структурно-лингвистическое описание. РМГ аналогично существующим МГ используют такие дополнительные элементы, как атрибуты, вероятностные и нечеткие меры, графы и ки-графы, индексы и т.п. [2–6]. Эта преемственность к метаграмматиками общего вида наряду с особыми правилами реконфигурации, позволяет учесть атрибутные (алгебраические, параметрические), стохастические, нечеткие особенности моделируемых МКА и учесть их при синтаксическом анализе. В РМГ за счет учета структурных правил реконфигурации (структурной адаптации) методы синтаксического анализа дополняются необходимыми правилами и критериями выбора при их адаптации, что позволяет существенно повысить эффективность процедур отражения МКА.

В целом, анализ особенностей РМГ, позволяет сделать вывод, что их использование позволяет создать необходимую формальную основу для описания и моделирования МКА, позволяющую, за счет учета особенностей МКА, отразить в моделях все основные структурно-параметрические правила их формирования, необходимые для создания эффективных методов отражения различных классов МКА.

Реконфигурационные МГ целесообразно использовать для структурной обработки многомерных графических образов, имеющих нерегулярную структуру [17, 18]. Также перспективной областью применения построенных продукционных систем являются схемы поиска и разрешения конфликтов в системах управления базами знаний, Data Mining системах [19–21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анищенко А.В., Язов Ю.К. Сети Петри-Маркова и их применение для моделирования процессов реализации угроз безопасности информации в информационных системах: монография. – Воронеж: Кварта, 2020. – 173 с.
2. Максимова Е.А., Садовникова Н.П. Оценка инфраструктурной устойчивости субъекта критической информационной инфраструктуры при деструктивных воздействиях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 4 (221). – С. 155-165.
3. Атакицев О.И., Борисенков И.Л., Грибунин В.Г., Смирнов Я.Д. Коллегиальные метаграмматики для моделирования динамично изменяемых программ создания систем информационной безопасности // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2020. – № 4 (190). – С. 29-43.
4. Атакицев О.И., Аджемов С.С., Емельянов С.Г. Формальные грамматики, метаграмматики и грамматические структуры. Их применение при принятии управленческих решений. – М.: МТУСИ, 2010. – 345 с.
5. Атакицев О.И., Борисенков И.Л., Царьков А.Н. Смирнов Я.Д. Особенности коллегиальных метаграмматик и их использования при решении задач графодинамики // Сб. материалов XV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 223-226.
6. Емельянов С.Г., Атакицев О.И., Стребков Д.А., Заичко В.А. Нечеткая многоуровневая модификация метода анализа иерархий и способ определения оценок предпочтительности альтернативных вариантов создания сложных систем космического назначения в условиях повышения неопределенности внешней среды // Известия ЮЗГУ. – 2012. – № 5 (44). – Ч. 2. – С. 50-60.
7. Атакицева И.В., Емельянов С.Г. [и др.]. Эталонная модель двойственно-атрибутной транслирующей метаграмматики и структурно-лингвистический способ обработки сложноорганизованных данных // Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая систематика». – 2006. – Вып. 14. – С. 24-28.
8. Емельянов С.Г., Атакицева И.В. Метаграмматические модели для описания вариантов сложноструктурированных стратегий управления // Перспективные системы и задачи управления: Сб. материалов ко 2-й Всероссийской научно-практической конференции. КЧР Домбай, 2007. – С. 23-26.
9. Емельянов С.Г., Атакицева И.В. [и др.]. Особенности применения структурно-лингвистического подхода на основе метаграмматик при выборе сложноструктурированных стратегий и программ управления // Современные информационные технологии в деятельности органов государственной власти: Сб. материалов 1-й Всероссийской научно-технической конференции. Курск, 2008. – С. 90-92.
10. Емельянов С.Г., Атакицева И.В. [и др.]. Метаграмматические модели для описания сложноструктурированных стратегий управления и оценки рисков их реализации // Современные информационные технологии в деятельности органов государственной власти: Сб. материалов 1-й Всероссийской научно-технической конференции. Курск, 2008. – С. 92-94.

11. Безкоровайный М.М., Костогрызов А.И., Львов В.М. Инструментально-моделирующий комплекс оценки качества функционирования информационных систем «КОК». – М.: «Вооружение. Политика. Конверсия», 2001. – 304 с.
12. Искусственный интеллект: в 3-х кн.: справочник / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990.
13. Городецкий В.И., Дрожжин В.В., Юсупов Р.М. Многоуровневые атрибутные грамматики для моделирования сложных структурно-динамических систем // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1986. – № 1. – С. 165.
14. Городецкий В.И., Дрожжин В.В., Полищук Г.М., Юсупов Р.М. [и др.]. Многоуровневые структуры атрибутных грамматик для моделирования сложных организационных систем и их применение в задачах принятия решений // Методы обработки информации и принятия решений: Науч.-техн. сб. (тр.). – М.: МО СССР, 1983. – С. 3.
15. Николаев А.В., Емельянов С.Г., Гриценко А.В. [и др.]. Особенности применения структурно-алгебраического подхода на основе атрибутных грамматических сетей к описанию топологической структуры сети обмена разнородной информацией распределенной системы поддержки принятия решений // Известия Тульского гос. ун-та. Серия «Бизнес-процессы и бизнес-системы». – 2005. – Вып. 2. – С. 3-9.
16. Ахо А., Ульман Дж. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. – Кн. 1, 2. – М.: Мир, 1978.
17. Титенко Е.А., Семенихин Е.А., Урясьева М.В. Модифицированная система Туэ и язык обобщенных конфликтных слов для организации параллельных продукционных вычислений // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 5 (67). – С. 32-43.
18. Гривачев А.В., Емельянов С.Г., Титенко Е.А. Модифицированная продукционная система для решения задачи структурного распознавания образов // Наукоемкие технологии. – 2014. – Т. 15, № 12. – С. 9-12.
19. Емельянов С.Г., Титенко Е.А., Зерин И.С. Однородные вычислительные структуры для параллельных символьных вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 6-2 (39). – С. 77-82.
20. Довзаль В.М., Титов В.С., Титенко Е.А. Стратегии быстрых символьных вычислений для исчислительной продукционной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 2. – С. 44-47.
21. Максимова Е.А. Методы выявления и идентификации источников деструктивных воздействий инфраструктурного генеза // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2022. – № 2. – С. 86-99.

REFERENCES

1. Anishchenko A.V., Yazov Yu.K. Seti Petri-Markova i ikh primeneniye dlya modelirovaniya protsessov realizatsii ugroz bezopasnosti informatsii v informatsionnykh sistemakh: monografiya [Petri-Markov networks and their application for modeling the processes of implementing information security threats in information systems: monograph]. Voronezh: Kvarta, 2020, 173 p.
2. Maksimova E.A., Sadovnikova N.P. Otsenka infrastrukturnoy ustoychivosti sub"ekta kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury pri destruktivnykh vozdeystviyakh [Assessment of infrastructural stability of a subject of critical information infrastructure under destructive influences], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 4 (221), pp. 155-165.
3. Atakishchev O.I., Borisenkov I.L., Gribunin V.G., Smirnov Ya.D. Kollegial'nye meta-grammatiki dlya modelirovaniya dinamichno izmenyaemykh programm sozdaniya sistem informatsionnoy bezopasnosti [Collegial meta-grammars for modeling dynamically changing programs for creating information security systems], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2020, No. 4 (190), pp. 29-43.
4. Atakishchev O.I., Adzhemov S.S., Emel'yanov S.G. Formal'nye grammatiki, metagrammatiki i grammaticheskie struktury. Ikh primeneniye pri prinyatii upravlencheskikh resheniy [Formal grammars, metagrammatics, and grammatical structures. Their application in making managerial decisions]. Moscow: MTUSI, 2010, 345 p.

5. *Atakishchev O.I., Borisenkov I.L., TSar'kov A.N. Smirnov Ya.D.* Osobennosti kollegial'nykh metagrammatik i ikh ispol'zovaniya pri reshenii zadach grafodinamiki [Features of collegial metagrammatics and their use in solving graphodynamics problems], *Sb. materialov XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Collection of materials of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks"]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, pp. 223-226.
6. *Emel'yanov S.G., Atakishchev O.I., Strebkov D.A., Zaichko V.A.* Nechetkaya mnogourovnevaya modifikatsiya metoda analiza ierarkhiy i sposob opredeleniya otsenok predpochtitel'nosti al'ternativnykh variantov sozdaniya slozhnykh sistem kosmicheskogo naznacheniya v usloviyakh povysheniya neopredelennosti vneshney sredy [Fuzzy multilevel modification of the hierarchy analysis method and a method for determining the preference estimates of alternative options for creating complex space systems in conditions of increasing uncertainty of the external environment], *Izvestiya YuZGU* [Proceedings of Southwest State University], 2012, No. 5 (44), Part 2, pp. 50-60.
7. *Atakishcheva I.V., Emel'yanov S.G. [i dr.].* Etalonnaya model' dvoystvenno-atributnoy transliruyushchey metagrammatiki i strukturno-lingvisticheskoy sposob obrabotki slozhnoorganizovannykh dannykh [The reference model of dual-attribute broadcasting metagrammatics and the structural-linguistic method of processing complexly organized data], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Tekhnologicheskaya sistematika»* [Izvestiya Tula State University. The series "Technological systematics"], 2006, Issue 14, pp. 24-28.
8. *Emel'yanov S.G., Atakishcheva I.V.* Metagrammaticheskie modeli dlya opisaniya variantov slozhnostrukturirovannykh strategiy upravleniya [Metagrammatic models for describing variants of complex structured management strategies], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Sb. materialov ko 2-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Promising management systems and tasks: Collection of materials for the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference]. KChR Dombay, 2007, pp. 23-26.
9. *Emel'yanov S.G., Atakishcheva I.V. [i dr.].* Osobennosti primeneniya strukturno-lingvisticheskogo podkhoda na osnove metagrammatik pri vybore slozhnostrukturirovannykh strategiy i programm upravleniya [Features of the use of a structural-linguistic approach based on metagrammatics in the selection of complex structured management strategies and programs], *Covremennye informatsionnye tekhnologii v deyatel'nosti organov gosudarstvennoy vlasti: Sb. materialov 1-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern information technologies in the activities of public authorities: Collection of materials of the 1st All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2008, pp. 90-92.
10. *Emel'yanov S.G., Atakishcheva I.V. [i dr.].* Metagrammaticheskie modeli dlya opisaniya slozhnostrukturirovannykh strategiy upravleniya i otsenki riskov ikh realizatsii [Metagrammatic models for describing complex structured management strategies and risk assessment of their implementation], *Covremennye informatsionnye tekhnologii v deyatel'nosti organov gosudarstvennoy vlasti: Sb. materialov 1-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern information technologies in the activities of public authorities: Collection of materials of the 1st All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2008, pp. 92-94.
11. *Bezkorovaynyy M.M., Kostogryzov A.I., L'vov V.M.* Instrumental'no-modeliruyushchiy kompleks otsenki kachestva funktsionirovaniya informatsionnykh sistem «KOK» [nstrumental modeling complex for assessing the quality of functioning of information systems "KOK"]. Moscow: «Vooruzhenie. Politika. Konversiya», 2001, 304 p.
12. *Iskusstvennyy intellekt [Artificial intelligence]: In 3 books: handbook, ed. by D.A. Pospelova.* Moscow: Radio i svyaz', 1990.
13. *Gorodetskiy V.I., Drozhzhin V.V., Yusupov R.M.* Mnogourovnevye atributnye grammatiki dlya modelirovaniya slozhnykh strukturno-dinamicheskikh sistem [Multilevel attribute grammars for modeling complex structural and dynamic systems], *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [News of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics], 1986, No. 1, pp. 165.
14. *Gorodetskiy V.I., Drozhzhin V.V., Polishchuk G.M., Yusupov R.M. [i dr.].* Mnogourovnevye struktury atributnykh grammatik dlya modelirovaniya slozhnykh organizatsionnykh sistem i ikh primeneniye v zadakhakh prinyatiya resheniy [Multilevel structures of attribute grammars for modeling complex organizational systems and their application in decision-making tasks], *Metody obrabotki informatsii i prinyatiya resheniy: Nauch.-tekhn. sb. (tr.)* [Methods of information processing and decision-making: scientific and technical collection (works)]. Moscow: MO SSSR, 1983, pp. 3.

15. Nikolaev A.V., Emel'yanov S.G., Gritsenko A.V. [i dr.]. Osobennosti primeneniya strukturno-algebraicheskogo podkhoda na osnove atributnykh grammaticheskikh setey k opisaniyu topologicheskoy struktury seti obmena raznorodnoy informatsiey raspredelennoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy [Features of the application of the structural-algebraic approach based on attribute grammatical networks to the description of the topological structure of the network for the exchange of heterogeneous information of a distributed decision support system], *Izvestiya Tul'skogo gos. un-ta. Seriya «Biznes-protsessy i biznes-sistemy»* [News of the Tula State University. The series "Business processes and business systems"], 2005, Issue 2, pp. 3-9.
16. Akho A., Ul'man Dzh. Teoriya sintaksicheskogo analiza, perevoda i kompilyatsii [Theory of syntactic analysis, translation and compilation]. Books 1, 2. Moscow: Mir, 1978.
17. Titenko E.A., Semenikhin E.A., Uryas'eva M.V. Modifitsirovannaya sistema Tue i yazyk obobshchennykh konfliktnykh slov dlya organizatsii parallel'nykh produktsionnykh vychisleniy [The modified Tue system and the language of generalized conflict words for the organization of parallel production calculations], *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technologies], 2011, No. 5 (67), pp. 32-43.
18. Grivachev A.V., Emel'yanov S.G., Titenko E.A. Modifitsirovannaya produktsionnaya sistema dlya resheniya zadachi strukturnogo raspoznavaniya obrazov [Modified production system for solving the problem of structural pattern recognition], *Naukoemkie tekhnologii* [High-tech technologies], 2014, Vol. 15, No. 12, pp. 9-12.
19. Emel'yanov S.G., Titenko E.A., Zerin I.S. Odnorodnye vychislitel'nye struktury dlya parallel'nykh simvol'nykh vychisleniy [Homogeneous computational structures for parallel symbolic computations], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwestern State University], 2011, No. 6-2 (39), pp. 77-82.
20. Dovgal' V.M., Titov V.S., Titenko E.A. Strategii bystrykh simvol'nykh vychisleniy dlya ischislitel'noy produktsionnoy sistemy [Strategies of fast symbolic calculations for the calculus production system], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrumentation], 2008, Vol. 51, No. 2, pp. 44-47.
21. Maksimova E.A. Metody vyyavleniya i identifikatsii istochnikov destruktivnykh voz-deystviy infrastrukturnogo geneza [Methods of identification and identification of sources of destructive impacts of infrastructural genesis], *Elektronnyy setevoy politematicheskii zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"* [Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU"], 2022, No. 2, pp. 86-99.

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

Атакищев Олег Игоревич – АНО «Институт инженерной физики»; e-mail: aoio07@mail.ru; г. Серпухов, Россия; зам. генерального директора по специальным проектам; д.т.н.; профессор; почетный работник науки и высоких технологий РФ.

Грибунин Вадим Геннадьевич – г.н.с.; д.т.н.; доцент; почетный работник науки и техники РФ.

Ананьев Виталий Евгеньевич – начальник отдела.

Титенко Евгений Анатольевич – Юго-Западный государственный университет; e-mail: johntit@mail.ru; г. Курск, Россия; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем; к.т.н.

Atakishchev Oleg Igorevich – ANO "Institute of Engineering Physics"; e-mail: aoio07@mail.ru; Serpukhov, Russia; deputy director general for special projects of the for special projects; dr. of eng. sc.; professor; honorary worker of science and high technologies of the Russian Federation.

Gribunin Vadim Gennadievich – chief researcher; dr. of eng. sc.; associate professor; honorary worker of science and technology of the Russian Federation.

Ananyev Vitaliy Evgenievich – head of the department.

Titenko Evgeny Anatolyevich – South-West State University; e-mail: johntit@mail.ru; Kursk, Russia; leading researcher of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems. cand. of eng. sc.

Раздел III. Связь, навигация и радиолокация

УДК 621.391.01

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-202-209

А.Н. Конев, А.А. Комаров, П.В. Луферчик, П.В. Штро

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОВОГО ФОНА НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА СИСТЕМЫ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СВЯЗИ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Ближнепольная магнитная связь (БПМС) обладает уникальными характеристиками, такими как скрытность, защищенность канала связи, возможность прохождения сигнала через абсолютное большинство препятствий без значимого затухания. БПМС может быть применена в интересах министерств и силовых структур Российской Федерации в таких сценариях использования, где применение традиционной ЭМ связи является невозможным. Одной из задач, в которых актуально применение БПМС, является обеспечение надежной беспроводной связи для спасателей, пожарных, сотрудников МЧС при выполнении их профессиональной деятельности в условиях завалов, вызванных различными разрушениями городских строений. Стоит отметить, что в таких условиях, проводимость строительных материалов и почвы может оказывать влияние на распространение не только электрического, но и магнитного поля. Дело в том, что из-за проводимости таких материалов, при использовании связи на основе МИ, в материалах возникают вихревые токи, что приводит к возникновению вторичного магнитного поля, находящегося в противофазе. При наложении двух полей возникают искажения, приводящие к быстрому затуханию магнитного поля при прохождении через материал. Рассматриваемая система не подвержена описанным выше эффектам. В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение помеховой обстановки в канале БПМС. Были проведены натурные эксперименты по измерению помеховой обстановки. По полученным данным сделан вывод, что применение систем БПМС в городских условиях является достаточно сложной задачей из-за характера помех, распространяющихся в канале такого вида связи. Для эффективного применения БПМС требуется разработка устройств приема, обеспечивающих достаточно сильную фильтрацию сигналов вне выбранной полосы. Применение цифровой фильтрации в таких системах является первоочередной необходимостью. Также, в таких системах, модулированный полезной информацией сигнал должен иметь узкую полосу. Максимальной эффективности при использовании систем БПМС возможно добиться в таких условиях, где наличие электрических кондуктивных помех сведено к минимуму: вдали от электрифицированных поселений, в водной среде, под землей.

Ближнепольная магнитная связь; защищенная связь; помеховая обстановка на низких частотах.

A.N. Konev, A.A. Komarov, P.V. Luferchik, P.V. Shtro

INVESTIGATION OF THE INTERFERENCE BACKGROUND AT THE INPUT OF THE RECEIVER OF THE NEAR-FIELD MAGNETIC COMMUNICATION SYSTEM IN URBAN CONDITIONS

Near-field magnetic communication (NFMC) has unique characteristics, such as secrecy, communication channel security, the ability to pass a signal through the vast majority of obstacles without significant attenuation. NFMC can be used in such use cases where traditional radio is impossible. One of the tasks in which the use of NFMC is relevant is to provide reliable wireless

communication for rescuers, firefighters, employees of the Ministry of Emergency Situations when performing their professional activities in the conditions of blockages caused by various destructions of urban buildings. It should be noted that under such conditions, the conductivity of building materials and soil can affect the propagation of not only electric, but also magnetic fields. The fact is that due to the conductivity of such materials, when using radio coupling, eddy currents arise in the materials, which leads to the appearance of a secondary magnetic field that is in antiphase. The system under consideration is not subject to the effects described above. This article presents the results of experimental studies aimed at studying the interference environment in the NFMC channel. Field experiments were carried out to measure the interference environment. Based on the data obtained, it was concluded that the use of NFMC systems in urban environments is a rather difficult task due to the nature of the interference propagating in the channel of this type of communication. The effective use of NFMC requires the development of receiving devices that provide sufficiently strong filtering of signals outside the selected band. Narrow band and high order filtering is key priority of observed communication system.

Near-field magnetic communication; secure communication; interference environment at low frequencies.

Введение. Задача обеспечения связи в пространстве, имеющем значительное количество препятствий с большой диэлектрической проницаемостью, является актуальной на сегодняшний день. Традиционные методы радиосвязи используют электромагнитные (ЭМ) волны, которые сильно ослабляются при прохождении через толстый слой проводимых материалов, что делает невозможным их эффективно использовать в условиях, когда на пути распространения сигнала имеется большое количество таких препятствий. В отличие от традиционных способов, реализация связи с помощью магнитной индукции (МИ) в такой среде распространения позволяет обеспечить достаточную дальность связи [1], имея при этом малые размеры катушек, использующихся, в качестве антенн [2]. Ближнепольная магнитная связь не восприимчива к отражению, рассеиванию, дифракции сигнала [3, 4]. В отличие от ЭМ связи, в связи на основе МИ подобные эффекты возникают лишь при прохождении через ферромагнитные материалы. Большинство материалов, окружающих нас на планете, такие как почва [5, 6], вода [7–9], строительные материалы, не обладают такими свойствами, имеют магнитную проницаемость, близкую к таковой у вакуума, тем самым обеспечивая беспрепятственное распространение магнитных волн [10, 11].

Постановка задачи. Одной из задач, в которых актуально применение БПМС, является обеспечение надежной беспроводной связи для спасателей, пожарных, сотрудников МЧС при выполнении их профессиональной деятельности в условиях завалов, вызванных различными разрушениями городских строений.

Стоит отметить, что в таких условиях, проводимость строительных материалов и почвы может оказывать влияние на распространение не только электрического, но и магнитного поля. [12] Дело в том, что из-за проводимости таких материалов, при использовании связи на основе МИ, в материалах возникают вихревые токи, что приводит к возникновению вторичного магнитного поля, находящегося в противофазе. При наложении двух полей возникают искажения, приводящие к быстрому затуханию магнитного поля при прохождении через материал.

Однако, описанные выше эффекты не оказывают влияния на работу проектируемой системы БПМС, описываемой в этой статье. [13] Строение приемных и передающих антенн в системе БПМС накладывает ограничения на доступный рабочий диапазон частот – эффективная работа возможна только на низких частотах от единиц до сотен кГц, в зависимости от используемой антенны. При распространении магнитного поля на таких низких частотах, вихревые токи имеют достаточно низкое значение, чтобы ими можно было пренебречь [14].

Другим применением систем БПМС является обеспечение защищенного канала связи для колонны воинских формирований. Поскольку магнитная энергия убывает достаточно быстро, обратно расстоянию в 6 степени, дистанционный перехват такой связи невозможен, возможность обнаружения колонны по уровню излучаемого сигнала отсутствует.

В приведенных выше областях применения надежность связи вне зависимости от окружающих условий является основным и самым важным параметром. Основной проблемой организации связи системы БПМС в городских условиях являются промышленные и сетевые шумы, излучаемые различной электроаппаратурой, линиями электропередач, другими внешними источниками помех, поскольку магнитные антенны чувствительны к электрической составляющей электромагнитного поля.

В городских условиях в описанном выше рабочем диапазоне частот БПМС наблюдается значительное помеховое загрязнение спектра. Значительную роль оказывают кондуктивные электромагнитные помехи. Согласно [15], кондуктивные электромагнитные помехи, представляют собой общие несимметричные напряжения, в полосе частот от 0 до 150 кГц, подобные тем, которые возникают при протекании электрического тока в силовых кабелях, расположенных поблизости от технических средств (ТС), и токов утечки в системах заземления.

Соответственно, при построении надежной системы БПМС требуется учитывать этот фактор, соответствующе выбрать рабочий диапазон частот, с учетом городской помеховой обстановки.

Решение поставленной задачи. Для оценки помеховой обстановки на входе приемника БПМС в городских условиях, использовалась приемная магнитная антенна в виде тонкоплечного магнитометра [16]. Наибольшую эффективность для такого типа антенн можно достичь в рабочем диапазоне частот 10...200 кГц. Выход антенны был подключен в анализатор спектра Rohde & Schwarz FSV Signal Analyzer с диапазоном работы 10 Гц ... 30 ГГц.

На рис. 1 изображено рабочее место для исследования помеховой обстановки



Рис. 1. Рабочее место для исследования помеховой обстановки

Полученные результаты по помеховой обстановке в полосе 0...200 кГц изображена рис. 2, 3, 4, 5.

Проанализировав полученные данные, можно отметить сильные источники промышленных помех в диапазонах частот 40...74 кГц, 95...100 кГц.

В качестве одного из самых значимых источников помех для приемной антенны системы БПМС были идентифицированы осветительные лампы, создающие помеховый фон в диапазоне частот от 45 до 60 кГц.

На рис. 2 представлены изображения спектра в диапазоне частот 0...200 кГц при включенном (а) и отключенном (б) электрическом освещении. На рис. 3 представлены изображения спектра в диапазоне частот 35...75 кГц при включенном (а) и отключенном (б) электрическом освещении. По представленным рисункам можно сделать вывод, что при отключении электрического освещения, помеховый фон значительно снижается. На рис. 4 изображен спектр сигнала на выходе антенны, при направлении антенны в сторону лампы освещения. По рис. 4 можно сделать вывод, что при направлении на осветительные приборы, помеховый фон в диапазоне частот от 45 до 60 кГц значительно возрастает.

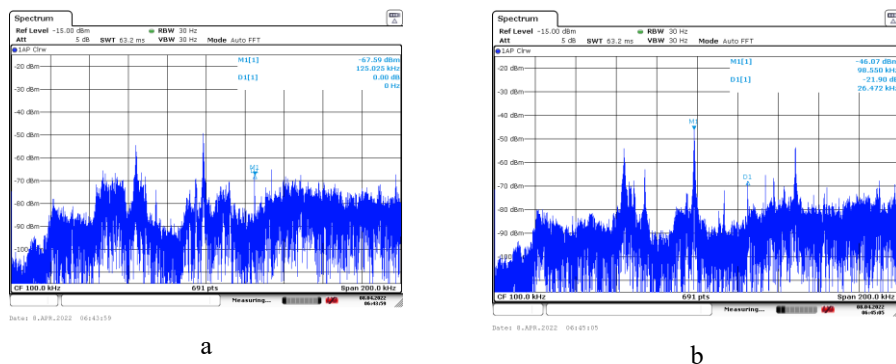


Рис. 2. Спектр на выходе приемной антенны при: а – включенном; б – отключенном освещении в диапазоне частот 0...200 кГц

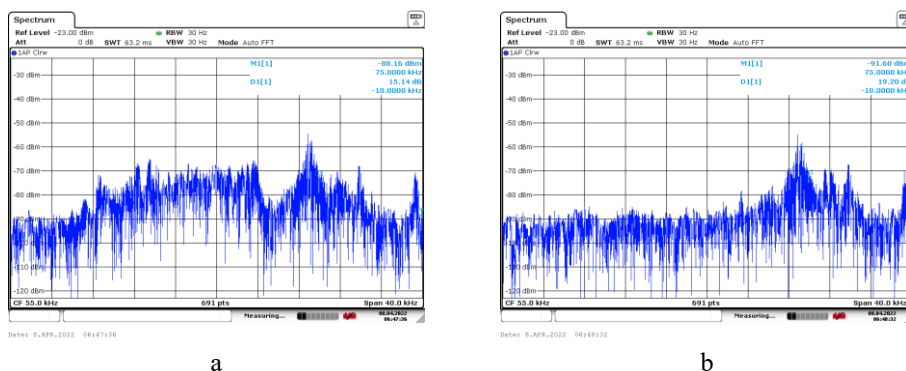


Рис. 3. Спектр на выходе приемной антенны при: а – включенном; б – отключенном освещении в диапазоне частот 35...75 кГц

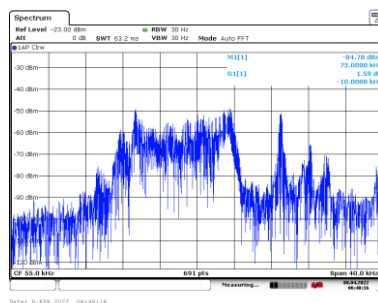


Рис. 4. Спектр сигнала при направлении в сторону лампы освещения

Источники остальных помех достоверно установить не удалось, однако уровень помех усиливается при наведении приемной антенны на сетевые приборы: сетевые источники, блоки питания, разветвители и т.д., что позволяет характеризовать эти помехи как кондуктивные. При обесточивании помещения, большинство помех пропадали.

Для получения объективной картины помеховой обстановки измерена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приемной антенны рис. 5. Для измерения АЧХ была сконструирована калибровочная катушка в виде цилиндрического соленоида диаметром 41 см, количеством витков, равным пяти. Индуктивность калибровочной катушки равна 17.9 мкГн; катушка обладает равномерной АЧХ в пределах 0...500 кГц. Приемная антенна была помещена во внутрь калибровочной катушки, с помощью осциллографа фиксировалось выходное напряжение антенны на разных частотах.

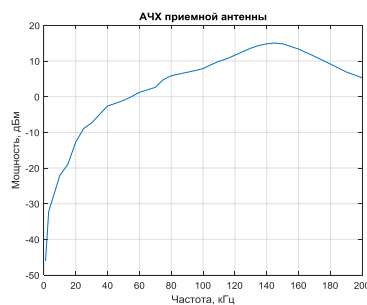


Рис. 5. АЧХ приемной антенны



Рис. 6. Шумовая обстановка на выходе приемной антенны с учетом нормировки по АЧХ антенны

Исходя из анализа полученных значений, были определены наилучшие рабочие диапазоны частот: 75...95 кГц, 100...147 кГц, 150...200 кГц.

Однако, диапазон частот 150...200 кГц использовать нецелесообразно, поскольку наибольшая дальность и эффективность индуктивных систем связи достигается на частотах не более 150 кГц [17, 18]. Кроме того, стоит отметить, что поскольку магнитная индукция передающей антенны обратно пропорциональна частоте передаваемого сигнала, для обеспечения максимальной дальности связи в реальных системах предпочтительно использовать как можно более низкие частоты сигналов [19].

Заключение. По полученным данным можно сделать вывод, что применение систем БПМС в городских условиях является достаточно сложной задачей из-за характера помех, распространяющихся в канале такого вида связи. Для эффективного применения БПМС требуется разработка устройств приема, обеспечивающих достаточно сильную фильтрацию сигналов вне выбранной полосы. Очевидно, что в таких системах, применение цифровой фильтрации является первоочередной необходимостью. Перспективно применение перестраиваемых аналоговых полосовых фильтров в приемном тракте, анализ доступных компонентов показал, что, несмотря на достаточно малое предложение перестраиваемых фильтров в данном частотном диапазоне, существуют подходящие модели, например, перестраиваемый полосовой фильтр LTC6602 фирмы Analog Devices. Также, в таких системах, модулированный полезной информацией сигнал должен иметь узкую полосу.

Максимальной эффективности при использовании систем БПМС возможно добиться в таких условиях, где наличие электрических кондуктивных помех сведено к минимуму: вдали от электрофицированных поселений, в водной среде, под землей.

В то же время, разработка такой системы является особенно важной задачей на сегодняшний день. Данная система обладает уникальными характеристиками, таким как скрытность, защищенность канала связи, возможность прохождения сигнала через абсолютное большинство препятствий без значимого затухания. БПМС может быть применена в интересах министерств и силовых структур Российской Федерации в таких сценариях использования, где применение традиционной ЭМ связи является невозможным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pal K. Kant.* Magnetic-Induction-Based Near-Field Communication: Connectivity for Short-Range IoT Applications // IEEE Explore, IEEE Computer society. – DOI: 10.1109/MC.2019.2892862.
2. *Sharma A.K., Yadav S., Dandu S.N., Kumar V., Sengupta J., Dhok S.B., and Kumar S.* Magnetic Induction-Based Non-Conventional Media Communications: A Review // IEEE Sensors Journal. – April 2017. – Vol. 17. – P. 926-940. – DOI: 10.1109/JSEN.2016.2640190.
3. *Hott M., Hoeher P.A.* Underwater Communication Employing High-Sensitive Magnetic Field Detectors // IEEE Access. – September 2020. – Vol. 8. – P. 177385-177394. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026623.
4. *Власов А.А., Родионов А.Ю.* Перспективы использования систем подводной коммуникации на основе магнитной индукции (обзор).
5. *Zhi Sun, Pu Wang, Mehmet C. Vuran, Mznah A. Al-Rodhaan, Abdullah M. Al-Dhelaan, Ian F. Akyildiz.* Mise-PIPE: Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring // Ad Hoc Networks. – 2011. – No. 9 (3). – P. 218-227. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2010.10.006.
6. *Kisseleff, S., Akyildiz I.F., and Gerstacker W.H.* Digital signal transmission in magnetic induction based wireless underground sensor networks // IEEE Transactions on Communications. – 2015. – Vol. 63, No. 6. – P. 2300-2311.
7. *Yuzhou Li, Shengnan Wang, Cheng Jin, Yu Zhang, Tao Jiang.* A survey of underwater magnetic induction. communications: fundamental issues, recent advances, and challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21 (3). – P. 2466-2487. – DOI: 10.1109/COMST.2019.2897610.
8. *Gulbahar B. and Akan O.B.* A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2012. – Vol. 11, No. 9. – P. 3326-3334.
9. *Guo H., Sun, Z. and Wang P.* On reliability of underwater magnetic induction communications with tri-axis coils // ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). – IEEE, 2019. – P. 1-6.
10. *Telford W., Geldart L., Sheriff R.* Applied Geophysics. – Cambridge University Press, 1990. [Online]. Available: <https://books.google.co.in/books?id=Q8ogAwAAQBAJ>.
11. *Sojodehi J.J., Wrathall P.N., Dinn D.F.* Magneto-inductive (MI) communications // Proc. MTS/IEEE Oceans. – 2001. – No. (11). – P. 513-519. – DOI: 10.1109/OCEANS.2001.968775.
12. *Xin Tan, Zhi Sun, Ian F. Akyildiz.* Wireless underground sensor networks: MI-based communication systems for underground applications // IEEE MAP. – 2015. – Vol. 57 (4). – P. 74-87. – DOI: 10.1109/MAP.2015.2453917.
13. *Guo H.* Performance Analysis of Near-Field Magnetic Induction Communication in Extreme Environments // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2020. – Vol. 90. – P. 77-83.
14. *Sogade J., Vichabian Y., Vandiver A., Reppert P.M., Coles D., Morgan F.D.* Electromagnetic cave-to-surface mapping system // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2004. – Vol. 42 (4). – P. 754-763.
15. ГОСТ Р 51317.4.16-2000 – Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц. Требования и методы испытаний. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.
16. *Babitskii A.N., Belyaev B.A., Boev N.M. and Izotov A.V.* Low noise wideband thin-film magnetometer // IEEE Sensors 2017, conference proceedings. – 2017. – P. 316-318. – DOI: 10.1109/ICSENS.2017.8233972.

17. Binbin Chai, Xin Zhang, Jinhong Wang. A Test of Magnetic Induction Communication from Air to Sea. 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) // Conference Paper Publisher, IEEE, 2018. – DOI: 10.1109/OCEANSKobe.2018.8559464.
18. Шварц Б.А. Оперативная беспроводная индуктивная связь внутри предприятия (Основы теории расчета). – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1978. – 208 с.
19. Gulati R.K., Pal A., Kant K. Experimental Evaluation of a Near-Field Magnetic Induction Based Communication System // IEEE Explore 2019, conference processing. – DOI: 10.1109/WCNC.2019.8885541.
20. Tumanski S. Induction coil sensors – a review // Measurement Science and Technology. – January 2007. – Vol. 18, No. 3.

REFERENCES

1. Pal K. Kant. Magnetic-Induction-Based Near-Field Communication: Connectivity for Short-Range IoT Applications, *IEEE Explore, IEEE Computer society*. DOI: 10.1109/MC.2019.2892862.
2. Sharma A.K., Yadav S., Dandu S.N., Kumar V., Sengupta J., Dhok S.B., and Kumar S. Magnetic Induction-Based Non-Conventional Media Communications: A Review, *IEEE Sensors Journal*, April 2017, Vol. 17, pp. 926-940. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2640190.
3. Hott M., Hoehner P.A. Underwater Communication Employing High-Sensitive Magnetic Field Detectors, *IEEE Access*, September 2020, Vol. 8, pp. 177385-177394. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026623.
4. Vlasov A.A., Rodionov A.Yu. Perspektivy ispol'zovaniya sistem podvodnoy kommunikatsii na osnove magnitnoy induksii (obzor) [Prospects for the use of underwater communication systems based on magnetic induction (review)].
5. Zhi Sun, Pu Wang, Mehmet C. Vuran, Mznah A. Al-Rodhaan, Abdullah M. Al-Dhelaan, Ian F. Akyildiz. Mise-PIPE: Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring, *Ad Hoc Networks*, 2011, No. 9 (3), pp. 218-227. DOI: 10.1016/j.adhoc.2010.10.006.
6. Kisseleff, S., Akyildiz I.F., and Gerstacker W.H. Digital signal transmission in magnetic induction based wireless underground sensor networks, *IEEE Transactions on Communications*, 2015, Vol. 63, No. 6, pp. 2300-2311.
7. Yuzhou Li, Shengnan Wang, Cheng Jin, Yu Zhang, Tao Jiang. A survey of underwater magnetic induction. communications: fundamental issues, recent advances, and challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, Vol. 21 (3), pp. 2466-2487. DOI: 10.1109/COMST.2019.2897610.
8. Gulbahar B. and Akan O.B. A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, Vol. 11, No. 9, pp. 3326–3334.
9. Guo H., Sun, Z. and Wang P. On reliability of underwater magnetic induction communications with tri-axis coils, *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2019, pp. 1-6.
10. Telford W., Geldart L., Sheriff R. Applied Geophysics. – Cambridge University Press, 1990. [Online]. Available: <https://books.google.co.in/books?id=Q8ogAwAAQBAJ>.
11. Sojodehi J.J., Wrathall P.N., Dinn D.F. Magneto-inductive (MI) communications, *Proc. MTS/IEEE Oceans*, 2001, No. (11), pp. 513-519. DOI: 10.1109/OCEANS.2001.968775.
12. Xin Tan, Zhi Sun, Ian F. Akyildiz. Wireless underground sensor networks: MI-based communication systems for underground applications, *IEEE MAP*, 2015, Vol. 57 (4), pp. 74-87. DOI: 10.1109/MAP.2015.-2453917.
13. Guo H. Performance Analysis of Near-Field Magnetic Induction Communication in Extreme Environments, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2020, Vol. 90, pp. 77-83.
14. Sogade J., Vichabian Y., Vandiver A., Reppert P.M., Coles D., Morgan F.D. Electromagnetic cave-to-surface mapping system, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2004, Vol. 42 (4), pp. 754-763.
15. GOST R 51317.4.16-2000 – Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ustoychivost' k konduktivnykh pomekham v polose chastot ot 0 do 150 kGts. Trebovaniya i metody ispytaniy [GOST R 51317.4.16-2000 – Electromagnetic compatibility of technical means. Resistance to conductive interference in the frequency band from 0 to 150 kHz. Requirements and test methods]. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2001.

16. Babitskii A.N., Belyaev B.A., Boev N.M. and Izotov A.V. Low noise wideband thin-film magnetometer, *IEEE Sensors 2017, conference proceedings*, 2017, pp. 316-318. DOI: 10.1109/ICSENS.2017.8233972.
17. Binbin Chai, Xin Zhang, Jinhong Wang. A Test of Magnetic Induction Communication from Air to Sea. 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), *Conference Paper Publisher, IEEE*, 2018. DOI: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559464.
18. Shvarts B.A. Operativnaya besprovodnaya induktivnaya svyaz' vnutri predpriyatiya (Osnovy teorii rascheta) [Operational wireless inductive communication within the enterprise (Fundamentals of calculation theory)]. 2nd ed., revised and suppl. Moscow: Svyaz', 1978, 208 p.
19. Gulati R.K., Pal A., Kant K. Experimental Evaluation of a Near-Field Magnetic Induction Based Communication System, *IEEE Explore 2019, conference processing*. DOI: 10.1109/WCNC.2019.8885541.
20. Tumanski S. Induction coil sensors – a review, *Measurement Science and Technology*. January 2007, Vol. 18, No. 3.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.М. Бородянский.

Конеv Александр Николаевич – АО «НПП «Радиосвязь»; e-mail: FBRLC@ya.ru; г. Красноярск, Россия; тел.: +79082181452; инженер-конструктор.

Комаров Алексей Александрович – e-mail: komarovalal@gmail.com; тел.: +79831576492; инженер-конструктор.

Луферчик Павел Валерьевич – e-mail: Luferchikp@gmail.com; тел.: +79232942552; начальник отдела.

Штро Павел Викторович – e-mail: faust_256@mail.ru; тел.: +79069712716; главный специалист.

Konev Alexandr Nikolaevich – JSC SPE Radiosvyaz; e-mail: FBRLC@ya.ru; Krasnoyarsk, Russia; phone: +79082181452; design engineer.

Komarov Alexey Alexandrovich – e-mail: komarovalal@gmail.com; phone: +79831576492; design engineer.

Luferchik Pavel Valerievich – e-mail: Luferchikp@gmail.com; phone: +79232942552; head of the department.

Shtro Pavel Viktorovich – e-mail: faust_256@mail.ru; phone: +79069712716; chief specialist.

УДК 621.376

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220

Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд, К.Е. Румянцев

ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОПОЛОСНОЙ КВАДРАТУРНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ НА ПОДНЕСУЩИХ ЧАСТОТАХ В КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КОММУНИКАЦИИ

Технология когерентной оптической связи позволяет создать систему передачи на большие расстояния с высокой пропускной способностью. Такие форматы модуляции, как квадратурная фазовая манипуляция (QPSK), обеспечивают высокую скорость передачи данных простым, надежным и экономичным способом. Эти методы модуляции, использующие несколько битов, передаются как символ, реализующий простые синфазные и квадратурные (IQ) форматы модуляции. Для увеличения пропускной способности в когерентных оптических системах используется мультиплексирование оптических поднесущих, когда несколько радиосигналов трансформируются одной оптической несущей. Это мультиплексирование имеет ограничения из-за двойной боковой полосы, что приводит к снижению мощности принимаемой поднесущей и ухудшает отношение сигнала несущей частоты к шуму. Чтобы аккумулировать эти эффекты, предлагается много различных

способов реализации оптической однополосной модуляции (OSSB). В статье предложен анализ системы когерентной оптической передачи для генерации QPSK-манипуляции с одной боковой полосой с использованием оптического I/Q-модулятора и M-ричной радиочастоты формирования импульса. Генератор псевдослучайных битовых последовательностей генерирует модулирующий сигнал модуляции со скоростью передачи 10 Гбит/с. Каждая битовая последовательность преобразуется в M-ричную последовательность символов из двоичных сигналов с использованием фазовой манипуляции (PSK). Генератор M-ичных формирует многоуровневое импульса в соответствии с последовательностью M-ичных входных символов. Электрические импульсы подаются на электроды электрооптического модулятора по схеме интерферометра Маха–Цендера (MZM). Точки смещения постоянного тока модулятора MZM находятся в квадратурной рабочей точке с коэффициентом ослабления 60 дБ и напряжением переключения 3 В. Оптическая волна излучается лазером непрерывного действия с длиной волны, равной 1550 нм.

Когерентная оптической системе коммуникации; однополосной квадратурной фазовой манипуляции; радиосигнал на поднесущих частотах; электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха–Цендера.

Hussein Ahmed Mahmood, K.Y. Rumyantsev

FORMATION OF A SINGLE SIDEBAND QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING OF RADIO SIGNALS AT SUB-CARRIER FREQUENCIES IN A COHERENT OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM

The coherent optical communication technology allows to create a transmission system over long distances with high bandwidth. Higher order modulation formats such as Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) provide high data rates in a simple, reliable and cost-effective manner. These multi-bit modulation methods are transmitted as a symbol implementing simple in-phase and quadrature (IQ) modulation formats. To increase throughput in coherent optical systems, optical subcarrier multiplexing is used, when several radio signals are multiplexed on one optical carrier. This multiplexing is limited by double sideband, resulting in reduced received subcarrier power and degraded carrier-to-noise ratio. To accumulate these effects, many ways of implementing optical single sideband (OSSB) are proposed. The paper proposes an analysis of a coherent optical transmission system for generating single-sideband QPSK modulation using an optical I/Q modulator and M-ary RF pulse shaping. The pseudo-random bit sequence generator generates a 10 Gb/s modulation baseband signal. Each bit sequence is converted into an M-ary sequence of symbols from binary signals using phase shift keying (PSK). The M-ary pulse generator generates a multi-level pulse shaping according to the sequence of M-ary input symbols. Electrical pulses are applied to the electrodes of the electro-optical modulator according to the Mach–Zehnder interferometer (MZM) scheme. The I/Q modulator operated at the quadrature operating point in both the in-phase and quadrature branches, with an extinction ratio 60 dB and 3 V switching voltage. The light wave is emitted by a CW laser with a wavelength of 1550 nm.

Coherent optical communication system, single sideband quadrature phase shift keying, subcarrier radio signal, electro-optic modulator (Mach–Zehnder interferometer system).

Введение. Мультиплексирование радиосигналов на поднесущих частотах – это решение для увеличения пропускной способности в системах оптической связи, в которых несколько сигналов в радиочастотной области и передаются по одной оптической несущей [1]. Одним из преимуществ SCM является то, что микроволновые устройства, используемые в SCM, более стабильны, чем их оптические аналоги [2]. Однако передача в обычных системах SCM ограничена из-за того, что оптические двойные боковые полосы испытывают различный фазовый сдвиг в результате хроматической дисперсии волокна (CD) [3]. Это может привести к уменьшению принимаемой мощности радиосигнала на поднесущей частоте, серьезно ухудшая отношение несущей к шуму (CNR) [4–5].

Оптическая одна боковая полоса передается с одной единственной боковой полосой. Таким образом, OSSB невосприимчив к накопленному CD, особенно после распространения на большие расстояния [6]. OSSB создается путем подавления нежелательной боковой полосы или так называемой рудиментарной боковой полосы с помощью одного из трех основных подходов, таких как метод Уивера, фильтрация боковой полосы и метод фазового сдвига [7]. Фильтрация боковой полосы – это простейший способ создания OSSB с уменьшенным спектральным составом вблизи несущей частоты. Однако на OSSB наблюдаются плохие характеристики со спектральным составом вблизи несущей частоты.

Это происходит из-за износа оптических фильтров [8], основан как на методах фильтрации боковой полосы, так и на фазовом сдвиге, заменяя преобразователь Гильберта смесителями и электрическим фильтром нижних частот [9]. Метод предполагает сложную техническую реализацию. Кроме того, эффективность подавления боковой полосы зависит от реализуемого затухания в электрическом фильтре. Помимо, метод фазового сдвига больше подходит для формата модуляции OSSB со значительным спектральным вблизи несущей частоты. Первоначально это делается путем реализации преобразователя Гильберта либо в оптической, либо в радиочастотной области. Использование трансформатора может быть сложным для широкополосного сигнала [8]. Однако успешно упрощена и усовершенствована за счет использования волоконной брэгговской решетки (FBG) [10, 11].

Впоследствии генерация OSSB с помощью методов фазового сдвига и частотного сдвига с использованием внешнего MZM с двумя плечами [3, 12–14]. Для эффективного подавления одной из оптических боковых полос разность мощностей модулирующих сигналов в оба плеча и отклонение фазы от требуемого $\pi/2$ в нижнее плечо должны быть ограничены погрешностями до 3 дБ [15]. Кроме того, эффективность MZM в полосе модуляции дополнительно улучшена и расширена еще на 5 дБ за счет резонансных электродных структур [16, 19]. Тем не менее, использование оптического модулятора LiNbO_3 сопряжено с проблемой дрейфа смещения из-за тепловой нестабильности [17–18].

В этой статье, мы представляем анализ системы передачи с мультиплексированием поднесущей, основанной на I/Q-оптическом модуляторе (модулятор Маха Цендера LiNbO_3 с двойным приводом) и RF-сигнале (импульсная форма Найквиста) для генерации оптического сигнала с однополосной QPSK-манипуляцией.

Синфазный/квадратурный (I/Q) оптический модулятор: Амплитуда и фаза оптической несущей могут модулироваться двоичными данными одновременно, так что каждые n битов входных данных отображаются в один символ (M):

$$n = \log_2(M). \quad (1)$$

Это помогает передавать больше информации по сравнению с амплитудной или фазовой модуляцией. Модуляция QPSK, например, использует четыре символа для переноса информации ($M = 4$), и поэтому количество битов на символ согласно (1) равно $n = 2$ битам.

QPSK можно реализовать с помощью двух параллельных MZM, встроенных в структуру MZM, и фазовращателя $\pi/2$, как показано на рис. 2. Входная мощность делится на две составляющие.

Созвездия сигналов бинарная фазовая манипуляция точка А (рис. 2,а) и точка Б (рис. 2,б) формируются бинарным вдвоенным накопителем MZM в верхнем и нижнем трактах. BPSK в нижнем плече сдвинут по фазе на $\pi/2$, генерируя сигнал BPSK в точке В, как показано на рис. 2,в. Сигнал BPSK в верхнем тракте объединяется с сигналом, сдвинутым по фазе на $\pi/2$, генерируя сигнал QPSK в виде точки Г, как показано на рис. 2,г.

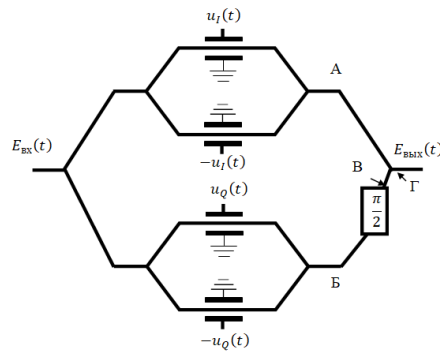


Рис. 1. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха–Цендера

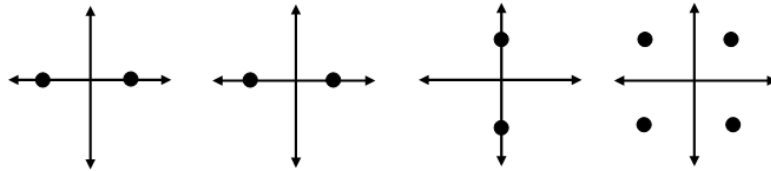


Рис. 2. Сигнальные созвездия фазовой манипуляции в точках А (а), Б (б), В (в) и Г (г) квадратурного модулятора

Передаточная функция электрического поля для модулятора QPSK может быть получена как:

$$\frac{E_{\text{вых}}(t)}{E_{\text{вх}}(t)} = \cos \left[\frac{\pi}{V_{\pi}} \cdot u_I(t) \right] + j \cos \left[\frac{\pi}{V_{\pi}} \cdot u_Q(t) \right]. \quad (2)$$

Модулятор QPSK с двумя MZM в двухтактной конфигурации является основным строительным блоком для всех высокоскоростных оптических передатчиков.

Физическая модель передающей станции когерентной оптической системы передачи на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией: Применяемая квадратурная фазовая манипуляция QPSK (quadrature phase shift keying или 4-QAM) кодирует два бита передаваемой информации одним символом. Причём длительность бита τ_b в 2 раза меньше длительности символа τ_s , т.е. $\tau_s = 2 \cdot \tau_b$. При этом символьная скорость в два раза ниже скорости передачи информации.

На рис. 3 приведена физическая модель передающей станции когерентной оптической системы передачи на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией и оптической амплитудной модуляцией.

Из исходного информационного цифрового потока данных (бит) $S_b(t)$ выделяется поток пар бит $S_{b0}(t)$. Сформулированный поток пар бит $S_{b0}(t)$ преобразуется в электронном кодирующем устройстве в синфазный $I(t)$ и квадратурный $Q(t)$ поток символов в соответствии с принципами квадратурной фазовой манипуляции QPSK.

На рис. 4 показана векторная диаграмма сигналов с квадратурной фазовой манипуляцией QPSK. Точки на диаграмме образуют созвездие фазовой манипуляции из четырёх точек. Все точки созвездия расположены на единичной окружности.

При передаче информации фаза сигнала задаётся исходным символом QPSK (парой бит $S_{b0}(t)$). Причём в зависимости от символа QPSK значение фазы (фазового сдвига) φ_i выбирается из набора (табл. 1)

$$\varphi_i = \left(\frac{2\pi}{M} (i - 1) + \phi \right); i = 1, 2, 3, 4. \quad (3)$$

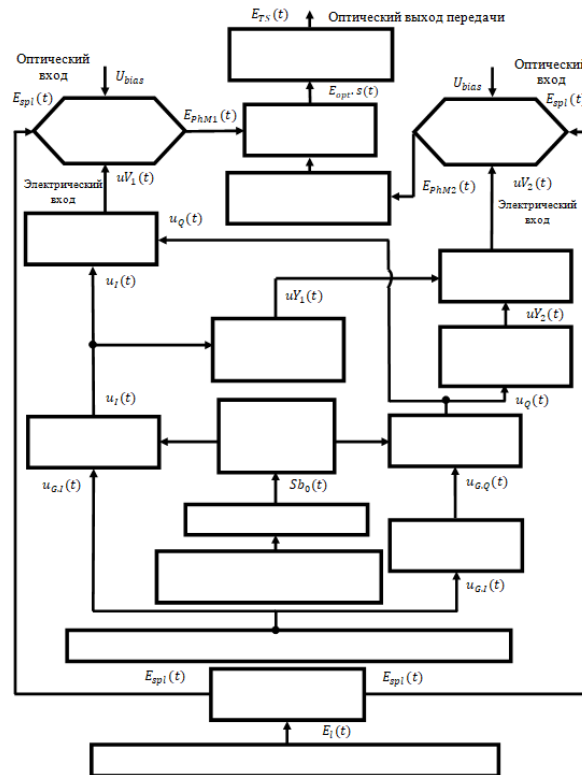


Рис. 3. Структура передающей станции когерентной оптической системы передачи на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией

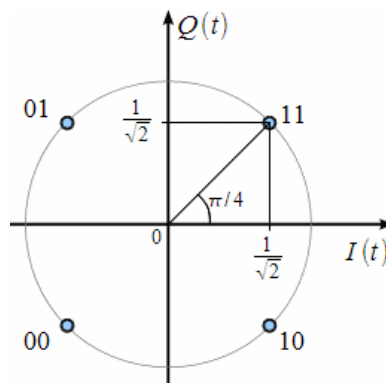


Рис. 4. Векторная диаграмма QPSK сигналов

Таблица 1

Соответствие между символами QPSK, значениями фазы φ_i , синфазной I_i и квадратурной Q_i компонентами

Символ QPSK	Значение параметра i	Значение фазы φ_i	Синфазный компонент I_i	Квадратурный компонент Q_i
00	1	$\pi/4$	1	1
01	2	$3\pi/4$	-1	1
11	3	$5\pi/4$	-1	-1
10	4	$7\pi/4$	1	-1

На выходах электронного кодирующего устройства во время действия символа QPSK формируются синфазная $I(t) = I_i$ и квадратурная $Q(t) = Q_i$ компоненты, причём (см. табл. 1)

$$I_i = \cos(\varphi_i); i = 1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

$$Q_i = \sin(\varphi_i); i = 1, 2, 3, 4. \quad (5)$$

Кодирование осуществляется следующим образом. Поток бит разбивается на пары. Причём синфазный сигнал $I(t)$ будет кодироваться первыми битами, а квадратурный сигнал $Q(t)$ – вторыми битами пары.

Часто используется условное обозначение электронного кодирующего устройства, выполняющего описанное кодирование синфазного сигнала $I(t)$ квадратурного и $Q(t)$ сигналов согласно созвездию QPSK $S_{b0}(t)$, показанное на рис. 5.

При квадратурной фазовой манипуляции необходимы два колебания $u_{G,I}(t)$ и $u_{G,Q}(t)$ с одинаковой круговой поднесущей радиочастотой ω_{RF} , но сдвинутые по фазе на 90° . Это достигается использованием генератора синусоидальных сигналов поднесущей радиочастоты ω_{RF} и электронного фазовращателя на $\varphi_{phs} = \pi/2$.

При использовании электронного фазовращателя с коэффициентом передачи $K_{ЭФВ}$ на входах электронных перемножителей будут действовать радиосигналы с одинаковыми амплитудой U_G , круговой поднесущей частотой ω_{RF} и начальной фазой φ_{RF} :

$$u_{G,I}(t) = U_G \cdot I(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u_{G,Q}(t) &= U_G \cdot Q(t) \cdot K_{ЭФВ} \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t + \varphi_{RF} + \pi/2) \\ &= -U_G \cdot Q(t) \cdot K_{ЭФВ} \cdot \sin(\omega_{RF} \cdot t + \varphi_{RF}) \end{aligned} \quad (7)$$

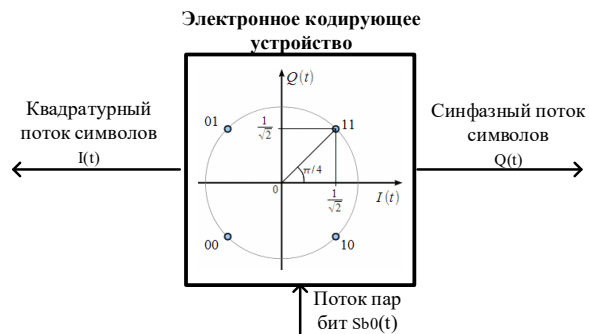


Рис. 5. Устройство кодирования синфазной и квадратурной составляющих на основе созвездия QPSK

На выходах электронных перемножителей с коэффициентами передачи K_x будут действовать радиосигналы с одинаковыми амплитудой U_G , круговой поднесущей частотой ω_{RF} и начальной фазой φ_{RF} :

$$u_I(t) = K_x u_{G,I}(t) = K_x \cdot U_G \cdot I(t) \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t + \varphi_{RF}). \quad (8)$$

$$u_Q(t) = K_x u_{G,Q}(t) = -K_x \cdot U_G \cdot Q(t) \cdot K_{\text{ЭФВ}} \cdot \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}). \quad (9)$$

Амплитуды радиосигналов на выходе электронных перемножителей $K_x U_G$ и $K_x \cdot U_G \cdot K_{\text{ЭФВ}}$ постоянны.

На выходе электронного аналогового сумматора с коэффициентом передачи K_{sum} формируется сигнал

$$u_{\text{sum}}(t) = K_{\text{sum}} \cdot [u_I(t) + u_Q(t)] \Rightarrow \leftarrow = K_{\text{sum}} \cdot K_x \cdot U_G \cdot [I(t) \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t + \varphi_{RF}) - Q(t) \cdot K_{\text{ЭФВ}} \cdot \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})]. \quad (10)$$

Для формирования сигнала с однополосной модуляцией SSB (амплитудной модуляцией с одной боковой полосой) используется преобразование Гильберта. Преобразователь Гильберта осуществляет поворот начальных фаз всех спектральных составляющих входного сигнала на один и тот же угол $-\pi/2$. Поворот на этот угол эквивалентен появлению множителя $\exp(-j \cdot \pi/2)$. Эта операция может быть выполнена с помощью широкополосного фазовращателя на $\pi/2$. Аналитический выходной сигнал преобразователя Гильберта является обобщением комплексного представления узкополосного сигнала, для которого вещественная и мнимая части связаны между собой. Для сигнала произвольной формы такая связь не является однозначной, поскольку не определена мнимая часть соответствующего комплексного сигнала. Заметим, однако, что значения спектра $S(\omega)$ вещественного сигнала в отрицательной области однозначно определяются значениями в положительной области частот. Поэтому вещественный сигнал может быть однозначно выражен с помощью комплексного (аналитического) сигнала. Спектр аналитического сигнала отличен от нуля лишь в положительной области частот и совпадает здесь со спектром входного сигнала.

Применение преобразования Гильберта и аналитического сигнала позволяют выполнять квадратурную модуляцию сигналов. Здесь в каждой текущей координате модулированных сигналов производится определение огибающей, мгновенной фазы и частоты сигналов.

После преобразователя Гильберта все отрицательные частотные компоненты сигнала сдвигаются по фазе на 90° , тогда как все положительные частотные компоненты отстают по фазе на 90° . Следовательно, на выходе первого и второго преобразователя Гильберта с коэффициентами передачи K_{Y1} и K_{Y2} формируются сигналы

$$u_{Y1}(t) = -K_{Y1} \cdot K_x \cdot U_G \cdot I(t) \cdot \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}). \quad (11)$$

$$u_{Y2}(t) = K_{Y2} \cdot K_x \cdot K_{\text{ЭФВ}} \cdot U_G \cdot Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t + \varphi_{RF}). \quad (12)$$

На выходе электронного аналогового вычитателя с коэффициентом передачи K_{sub} формируется сигнал

$$u_{\text{sub}}(t) = K_{\text{sub}} \cdot [u_{Y2}(t) - u_{Y1}(t)] \Rightarrow \leftarrow = K_{\text{sub}} \cdot K_x \cdot U_G \cdot [K_{Y2} \cdot K_{\text{ЭФВ}} \cdot Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t + \varphi_{RF}) + K_{Y1} \cdot I(t) \cdot \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})]. \quad (13)$$

Сигналы с выходов электронных аналоговых сумматора $u_{\text{sum}}(t)$ и вычитателя $u_{\text{sub}}(t)$ подаются на электрические входы соответственно первого и второго оптических фазовых модуляторов Маха-Цендера в составе двухпортового модулятора Маха-Цендера (ДПММЦ).

Отметим, что на оптические входы двухпортового оптического модулятора Маха-Цендера подаётся непрерывное оптическое излучение лазерного источника с постоянной интенсивностью (мощностью) $P_{opt}(t) = P_{opt}$.

Напряжённость электрического поля лазерного источника определяется формулой

$$E_l(t) = \sqrt{P_{opt}} \cdot \exp[j \cdot \omega_{opt} t + j \cdot \varphi_{opt}], \quad (14)$$

где $\omega_{opt} = c_{opt}/\lambda_{opt}$ – круговая частота оптического излучения;

λ_{opt} – длина волны оптического излучения;

$c_{opt}=300\,000$ км/с – скорость распространения оптического излучения.

Оптический делитель излучения с коэффициентами передачи K_{spl} обеспечивает подачу в каждое плечо интерферометра Маха-Цендера излучения с одинаковой напряжённостью

$$E_{spl}(t) = K_{spl} E_l(t) = \frac{K_{spl} \cdot \sqrt{P_{opt}}}{2} \cdot \exp[j \cdot \omega_{opt} t + j \cdot \varphi_{opt}]. \quad (15)$$

На выходе первого оптического фазового модулятора Маха-Цендера с коэффициентом передачи K_{phM1} в верхнем плече интерферометра действует излучение с напряжённостью

$$E_{phM1}(t) = K_{phM1} \cdot E_{spl}(t) \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sum}(t) + U_{bias1}}{U_\pi}\right], \quad (16)$$

где U_π – полуволновое напряжение, необходимое для введения фазового сдвига на π радиан; U_{bias1} – постоянное напряжение смещения.

Аналогично, на выходе второго оптического фазового модулятора с коэффициентом передачи K_{phM2} в нижнем плече интерферометра действует излучение с напряжённостью

$$E_{phM2}(t) = K_{phM2} \cdot E_{spl}(t) \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sub}(t) + U_{bias2}}{U_\pi}\right]. \quad (17)$$

После оптического фазовращателя на $\pi/2$ с коэффициентом передачи K_{phSh} будет сформировано оптическое излучение с напряжённостью

$$\begin{aligned} E_{phSh}(t) &= K_{phSh} \cdot E_{phM2}(t) \cdot \exp\left(j \frac{\pi}{2}\right) = j \cdot K_{phSh} \cdot E_{phM2}(t) = \\ &= j \cdot K_{phSh} \cdot K_{phM2} \cdot E_{spl}(t) \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sub}(t) + U_{bias2}}{U_\pi}\right]. \end{aligned} \quad (18)$$

На выходе оптического сумматора действуют оптическое поле с напряжённостью

$$\begin{aligned} E_{opt.s}(t) &= E_{phM1}(t) + E_{phSh}(t) = K_{phM1} E_{spl}(t) \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sum}(t) + U_{bias1}}{U_\pi}\right] + \rightarrow \\ &\leftarrow + j \cdot K_{phSh} K_{phM2} E_{spl}(t) \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sub}(t) + U_{bias2}}{U_\pi}\right]. \end{aligned} \quad (19)$$

С практической точки зрения принимаем $U_{bias1} = U_{bias2} = U_{bias}$. Кроме того считаем, что $K_{phM1} = K_{phM2} = K_{phM}$.

Тогда

$$E_{opt.s}(t) = K_{PhM} \cdot K_{PhSh} \cdot E_{spl}(t) \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{U_{bias}}{U_\pi} \right] \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sum}(t)}{U_\pi} \right] + \rightarrow$$

$$\leftarrow + j \cdot K_{PhM} \cdot K_{PhSh} \cdot E_{spl}(t) \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{U_{bias}}{U_\pi} \right] \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sub}(t)}{U_\pi} \right] \quad (20)$$

$$= \frac{E_{opt.s}(t)}{K_{PhM} \cdot K_{PhSh} \cdot E_{spl}(t) \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{U_{bias}}{U_\pi} \right]}$$

$$= \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sum}(t)}{U_\pi} \right] + j \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{u_{sub}(t)}{U_\pi} \right]. \quad (21)$$

Подставив (10) и (13) в (21) и применив разложение Якоби–Ангера [20]

$$\exp[j \cdot x \cdot \sin(\theta)] = \cos[x \cdot \sin(\theta)] + j \cdot \sin[x \cdot \sin(\theta)] \quad (22)$$

находим

$$\cos[x \cdot \sin(\theta)] + j \sin[x \cdot \sin(\theta)]$$

$$= J_0(x) + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(x) \cdot \cos[2 \cdot k \cdot \theta] + 2i \cdot \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(x) \cdot \sin[(2 \cdot k + 1) \cdot \theta]. \quad (23)$$

Приравнявая действительную и мнимую части, получаем

$$\cos[x \cdot \sin(\theta)] = J_0(x) + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(x) \cdot \cos[2 \cdot k \cdot \theta] \quad (24)$$

$$\sin[x \cdot \sin(\theta)] = 2 \cdot \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(x) \cdot \sin[(2 \cdot k + 1) \cdot \theta]. \quad (25)$$

Тогда

$$[I(t) \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t) - Q(t) \cdot \sin(\omega_{RF} \cdot t)] + j[Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t) + I(t) \cdot \sin(\omega_{RF} \cdot t)] =$$

$$= [I(t) + j \cdot Q(t)] \cdot \exp^{j\omega_{RF} \cdot t}. \quad (26)$$

Тогда, мы получаем представление функции оптического модулятора I/Q с одной боковой полосой:

$$E_{opt.s}(t) \cong K_{PhM} \cdot K_{PhSh} \cdot E_{spl}(t) \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{U_{bias}}{U_\pi} \right] + K_{PhM} \cdot K_{PhSh} \cdot E_{spl}(t)$$

$$\cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{U_{bias}}{U_\pi} \right] \cdot [I(t) + j \cdot Q(t)] \exp^{j\omega_{RF} \cdot t}. \quad (27)$$

После подстановки $U_{bias} = 0.5 \cdot U_\pi$ в (27), получаем следующий выходной сигнал I/Q модулятора:

$$E_{opt.s}(t) \cong K_{PhM} \cdot K_{PhSh} \cdot \sqrt{P_{opt}} \cdot \exp[j(w_{opt} + \pi/2)t + j\varphi_{opt}] + K_{PhM} \cdot K_{PhSh}$$

$$\cdot [I(t) + jQ(t)] \exp[j(w_{opt} + w_{RF} + \pi/2)t + j\varphi_{opt}]. \quad (28)$$

Результаты. Результаты смоделированы для схемы на рис. 3 с использованием программного обеспечения optisystem версии 14. На рис. 6 показан поток входных данных в PSK-кодер. На рис. 7 показано сигнальное созвездие квадратурной фазовой манипуляции на выходе генератора M-ичных импульсов.

Спектральная плотность мощности для сигнала со скоростью передачи данных 10 Гбит/с показана на рис. 8. Эти сигналы модулированы радиосигналом 10 ГГц (поднесущая), рис. 9. Показана спектральная плотность мощности для радиосигнала QPSK, который подается на оптический модулятор I/Q. Рис. 10 иллюстрирует спектральную плотность мощности квадратурной фазовой манипуляции с одной боковой полосой для системы когерентной оптической передачи.

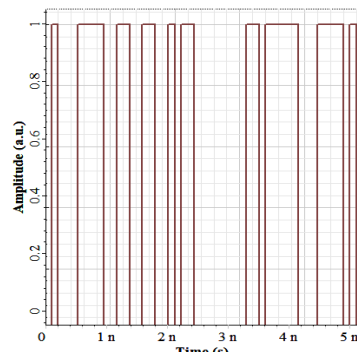


Рис. 6. Входной поток данных

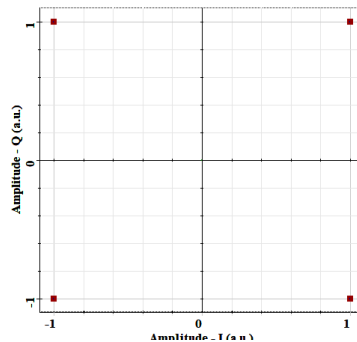


Рис. 7. Сигнальное созвездие квадратурной фазовой манипуляции на выходе генератора M-ичных импульсов

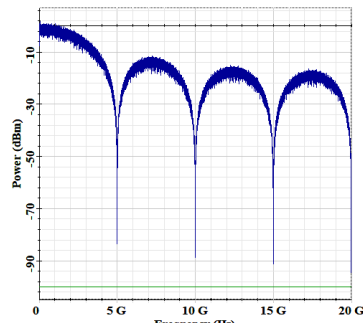


Рис. 8. Спектральная плотность мощности для сигнала со скоростью передачи данных 10 Гбит/с

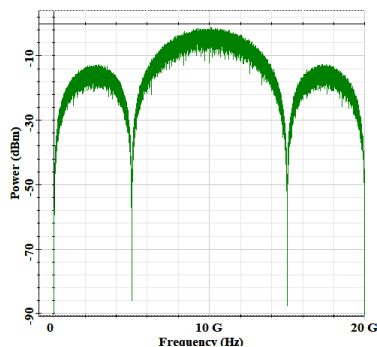


Рис. 9. Спектральная плотность мощности для радиосигнала QPSK

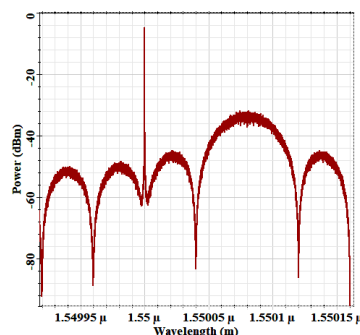


Рис. 10. Спектральная плотность мощности квадратурной фазовой манипуляции с одной боковой полосой

Закключение. В статье предложена структура когерентного оптического передатчика с формированием радиосигнала на поднесущих частотах с однополосной квадратурной фазовой манипуляцией благодаря включению устройства, выполняющего преобразование Гильберта. Получены соотношения для описания процесса формирования радиосигнала на поднесущих частотах с однополосной квадратурной фазовой манипуляцией. Моделированием на программной платформе *optisystem* версии 14 доказана возможность формирования радиосигнала на поднесущих частотах 10 ГГц с однополосной квадратурной фазовой манипуляцией, обеспечивая скорость передачи данных 10 Гбит/с в когерентной оптической системе коммуникации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K. and Richards D. Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, March, 2002, Vol. 20, No. 3, pp. 417-427.
2. Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K., and Richards D. 10- Gb/s SCM fiber system using optical SSB modulation, *IEEE Photonics Technology Letters*, August, 2001, Vol. 13, No. 8, pp. 896-898.
3. Fujiwara T. et al. Chromatic dispersion tolerant subcarrier multiplexing scheme based on tandem frequency shifted optical SSB modulation, *2009 35th European Conference on Optical Communication*. IEEE, 2009, pp. 1-2.
4. Smith G.H., Novak D., and Ahmed Z. Overcoming chromatic dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators, *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques*, August, 1997, Vol. 45, No. 8, pp. 1410-1415.

5. *Chen W.H. and Way W.I.* Multichannel single-sideband SCM/DWDM transmission systems, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, July, 2004, Vol. 122, No. 7, pp. 1679-1693.
6. *Fonseca D., Cartaxo A., and Monteiro P.* Transmission improvements using electrical dispersion compensation at the transmitter side and RZ pulse format in optical single sideband systems, *Proc. ICTON 2005, Barcelona, Spain, 2006*, pp. 381-384.
7. *Hahn S.* Hilbert transforms in signal processing. Artech House Publisher, Boston, 1996.
8. *Fonseca D., Cartaxo A., and Monteiro P.* Recent development on optical single sideband transmission system, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, June, 2006, Vol. 1, pp. 38-41.
9. *Fonseca D., Cartaxo A., and Monteiro P.* On the use of electrical precompensation of dispersion in optical single sideband systems, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, July/August, 2006, Vol. 12, No. 4, pp. 603-614.
10. *Blais S.R., Yao J.* Optical single sideband modulation using an ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating, *IEEE Photonics technology letters*, 2006, Vol. 18, No. 21, pp. 2230-2232.
11. *Zhang C. et al.* Application of phase-shifted fiber Bragg grating in single sideband transmission-based radio-over-fiber system, *Optical Engineering*, 2013, Vol. 52, No. 11, pp. 115101.
12. *Smith G.H., Novak D., and Ahmed Z.* Technique for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fiber-radio systems, *Electronics Letters*, January, 1997, Vol. 33, No. 1, pp. 74-75.
13. *Chen X., Huang D.* Effect of Mach-Zehnder modulator DC extinction ratio on single sideband modulation radio over fiber link, *2009 Asia Communications and Photonics conference and Exhibition (ACP)*. IEEE, 2009, Vol. 2009, pp. 1-6.
14. *Abdul-Rashid H.A., Tayahi M.B.* Novel technique for tandem single sideband communication systems using orthogonal carriers (TSSB-OC), *Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking*. SPIE, 2002, Vol. 4872, pp. 59-63.
15. *Nirmalathas A., Smith G.H., and Novak D.* Sensitivity analysis of optical SSB generation using a dual-electrode Mach-Zehnder modulator, *International Topical Meeting on Microwave Photonics MWP '98*, October 1998, pp. 79-82.
16. *Thach Giang Nguyen, Arnan Mitchell, and Yuvaraja S. Visagathilagar.* Demonstration of a Numerically Optimized Resonantly Enhanced Mach-Zehnder Modulator, *IEEE Photonics Technology Letters*, February, 2006, Vol. 18, No. 3, pp. 454-456.
17. *Greenblatt A.S., Bulmer C.H., Moeller R.P. and Burns W.K.* Thermal stability of bias point of packaged linear modulators in lithium niobate, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1995, Vol. 13, No. 12, pp. 2314-2319.
18. *Lim S.C., Abdul-Rashid H.A., Cheong W.S.* Sensitivity analysis on effects of bias drifting in subcarrier multiplexed transmission system employing OSSB modulation, *The 17th Asia Pacific Conference on Communications*. IEEE, 2011, pp. 213-217.
19. *Erkilinç M.S. et al.* Spectrally efficient WDM Nyquist pulse-shaped subcarrier modulation using a dual-drive Mach-Zehnder modulator and direct detection, *Journal of Lightwave Technology*, 2016, Vol. 34, No. 4, pp. 1158-1165.
20. *Cuyt A.A.M. et al.* Handbook of continued fractions for special functions. Springer Science & Business Media, 2008.

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

Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд – Диялайский университет; e-mail: hussein.ahmed8282@gmail.com; Дияла, Ирак; кафедра инженерных коммуникаций.

Румянцев Константин Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: rke2004@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационной безопасности и телекоммуникационных систем.

Hussein Ahmed Mahmood – College of Engineering, University of Diyala; e-mail: hussein.ahmed8282@gmail.com; Diyala, Iraq; the department of communications engineering.

Rumyantsev Konstantin Yvgen'evich – Southern Federal University; e-mail: rke2004@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems.

В.П. Федосов, Т.Т. Пацюк**АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МИМО-OFDM В УСЛОВИЯХ АКТИВНЫХ ПОМЕХ**

Рассмотрен алгоритм обработки пространственно-временных сигналов на основе МИМО-OFDM-системы связи при наличии активных помех. Приведены теоретические выкладки, уникальные подходы, необходимые для повышения пропускной способности канала связи при нахождении в нём точечного источника активных помех. Задача является актуальной в условиях плотной городской застройки, а также неуклонно растущих потребностей в улучшении помехоустойчивости и качества связи без расширения полосы пропускания. Для обработки информации в МИМО-OFDM-системе без помех инженерами преимущественно используется критерий максимума отношения сигнал/шум, однако при наличии активных помех применяется винеровский критерий. Он обеспечивает минимум среднеквадратической погрешности воспроизведения пилот-сигнала в OFDM. В этом случае выбирается сигнальное собственное число, собственный вектор, производится весовая обработка, принимается сигнал, который затем проверяется по критерию минимума ошибки. Технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением подразумевает наличие пилот-поднесущих, известных на приёмной стороне по частоте и коду модуляции. В раскодированном коде производится сравнение по СКО, обеспечивается пороговая обработка. При большой ошибке происходит отказ от этого собственного числа. Методом перебора на основе пилота ищется минимальная приемлемая ошибка. Собственный вектор найденного сигнала будет использоваться для весовой обработки. Представлены эксперименты по детектированию сигнала в канале связи с адаптацией и без адаптации с использованием винеровского критерия и наличия помехи при двух видах модуляции (QAM-4, BPSK). Результаты показывают, что адаптация позволяет достичь снижения BER (частоты ошибки битов) на всей линии кривой зависимости и для всех ОСШ. Разработанный алгоритм может быть использован для систем связи и управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) при наличии активных помех.

MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); антенная решетка (АР); базовая станция (БС); мобильная станция (МС); беспроводная связь; пропускная способность; активная помеха.

V.P. Fedosov, T.T. Patsyuk**ALGORITHM FOR PROCESSING SPACE-TIME SIGNALS BASED ON THE MIMO-OFDM SYSTEM UNDER ACTIVE INTERFERENCE**

An algorithm for processing space-time signals based on a MIMO-OFDM communication system in the presence of active interference is described. Theoretical calculations are given, the detection of approaches that often cause the bandwidth of the communication channel when leaving a point source of active interference. The task is relevant in the conditions of dense urban development, as well as the steadily growing need to improve noise immunity and communication quality without bandwidth coverage. To process information in a MIMO-OFDM system without interference, engineers mainly use the criterion of maximum signal-to-noise ratios, however, in the presence of active interference, the Wiener criteria. It measures the minimum RMS pilot measurement error in OFDM. In this case, a signal receipt of a monetary amount, an eigenvector is detected, weight processing is performed, a signal is received that occurs according to the minimum error criterion. An orthogonal frequency division multiplexing technology with pilot subcarriers is reduced at the receive frequency in frequency and modulation code. Thresholding was found in the decrypted code, produced by the RMS comparison. The arrival of big money comes from this own number. Pilot-based enumeration searches for the minimum acceptable error. The eigenvector of the found signal will be for weight processing. Experiments are carried out to detect a signal in a

communication channel with and without adaptation using the Wiener criterion and the presence of interference with two types of modulation (QAM-4, BPSK). The results show that the adaptation improves the BER (bit error rate) state along the entire line of the curve and for all SNRs. The developed algorithm can be used for communication and control systems of unmanned aerial vehicles in the presence of active interference.

MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); antenna array (AR); base station (BS); mobile station (MS); wireless connection; bandwidth; active interference.

Введение. Стремительное развитие технологий передачи информации началось в середине XX века, благодаря развитию микроэлектроники и высокоскоростных цифровых процессоров. Сейчас с совершенствованием средств обмена данными, появлением сетей связи третьего (3G), четвертого (4G/LTE) и пятого (5G) поколения запросы пользователей невероятно возросли. Оттого значительно ценится скорость передачи и объёмы переданной информации. Потому сейчас большее развитие получили MIMO-OFDM (Multiple Input Multiple Output - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) системы связи. Они позволяют увеличивать пропускную способность без расширения полосы пропускания [1–3], эффективно использовать радиочастотный спектр, а также противостоять межсимвольным помехам и интерференциям между поднесущими.

Городская инфраструктура не позволяет нам рассчитывать на беспрепятственное распространение сигнала. Здания, автомобили, ЛЭП – всё это становится барьерами для прохождения сигнала от передатчика к приёмнику по прямому пути и источниками переотражений сигналов и помех. Важным фактором в плотной городской застройке являются и другие каналы связи, которые могут «влезть» в полосу канала из-за нелинейности передатчика другой станции. Также качественный прием информации могут намеренно нарушать источники активных помех [4, 5].

Постановка задачи. Целью является разработка и исследование эффективности алгоритма обработки пространственно-временных сигналов на основе системы MIMO-OFDM в условиях активных помех в канале с многочисленными переотражениями.

Исходные данные. Средой распространения сигнала выбрана воздушная среда в городских условиях (плотная застройка). В качестве источника помехи используется модель точечного в пространстве источника с шумовой (нормальной) помехой. Источник с неизвестными координатами находится в канале связи.

Метод решения. Использование технологии MIMO (рис. 1) позволяет увеличить пропускную способность за счет одновременной передачи нескольких потоков данных через различные элементы антенной решетки (АР). Сигналы, излучаемые каждым из элементов, занимают одну полосу частот. Несмотря на то, что распространяются они в одной среде, за счет пространственной обработки такие сигналы могут быть разделены приемником, который также использует АР.

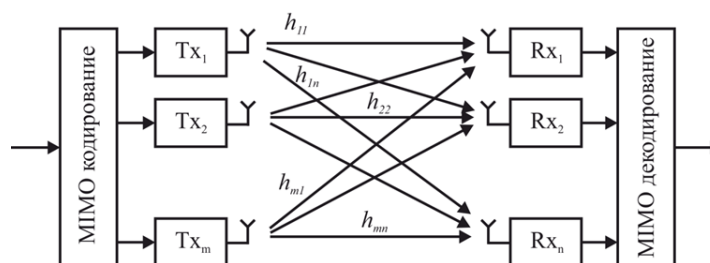


Рис. 1. Структурная схема MIMO-системы связи

Матрица коэффициентов передачи канала связи при этом выглядит следующим образом:

$$\mathbf{H}(t, \tau) = \begin{bmatrix} h_{11}(t, \tau) & h_{12}(t, \tau) & h_{13}(t, \tau) & \dots & h_{1N_t}(t, \tau) \\ h_{21}(t, \tau) & h_{22}(t, \tau) & h_{23}(t, \tau) & \dots & h_{2N_t}(t, \tau) \\ h_{31}(t, \tau) & h_{32}(t, \tau) & h_{33}(t, \tau) & \dots & h_{3N_t}(t, \tau) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1}(t, \tau) & h_{N_r,2}(t, \tau) & h_{N_r,3}(t, \tau) & \dots & h_{N_r,N_t}(t, \tau) \end{bmatrix}.$$

Технология OFDM представляет собой сочетание модуляции и мультиплексирования. Она повышает устойчивость канала связи против частотно-избирательных замираний, вызванных многопутным распространением сигналов. OFDM-сигнал состоит из множества ортогональных поднесущих, входящих в состав одного основного сигнала, а каждая поднесущая модулируется своим битовым потоком. При передаче информации ввиду наличия препятствий и помех отдельные поднесущие OFDM-сигнала могут быть искажены, а это может стать причиной потери информационных битов, входящих в состав передаваемого пакета. Тем не менее, применение технологии помехоустойчивого кодирования на передатчике позволяет в достаточной мере восстановить сигнал на приемной стороне.

Проанализируем упрощенную модель канала связи без помех [6]. В нем присутствует базовая станция (БС) и мобильная станция (МС). Обе станции включают приёмно-передающую аппаратуру как приёмниками, так и передатчиками. Чтобы обеспечить адаптацию MIMO на приеме [7, 8], разобьём антенную решётку приёмника МС на несколько блоков. На выходе AP приёмника строится пространственная корреляционная матрица. Затем находятся собственные числа, собственные вектора и строится соответствующая матрица. Отметим, что собственные числа здесь представляют собой мощности сигналов, пришедших на AP приёмника разными путями в совокупности с шумами приемной системы.

Проанализируем собственные числа с помощью критерия максимума отношения сигнал/шум (ОСШ). В алгоритм закладывается операция выбора максимального собственного числа (т.е. на раскрыт AP приходит максимальная мощность этого пути). Тогда выбирается соответствующий собственный вектор и коэффициенты столбца используются как весовой вектор. В этом случае получаем отдельную антенну из блока, у которой максимум характеристики направлен на конкретно выбранный путь, а на остальные пути формируются нулевые значения, и затем обеспечиваем такую обработку в каждом блоке.

Таким образом, приёмник адаптирован на один канал, однако эта же AP используется и для передачи [9–16]. По выбранному пути (чаще всего это будет прямой путь, если он есть) сигнал перенаправляется в обратную сторону, причем с максимальной мощностью. В приёмнике БС также обеспечивается адаптация, строится корреляционная матрица. Максимальное собственное число при этом будет одно, остальные подавляются (т.к. сигнал не излучается по другим направлениям). Собственный вектор, соответствующий собственному числу, используется уже для приёма MIMO-системы в БС. Иными словами, приемник БС аналогично разбивается на блоки, а затем они адаптируются на выбранный путь. Подобного рода адаптация является текущей, то есть она обеспечивается прямо в процессе приёма (приёмник в таком случае называется «информированным»).

Теперь рассмотрим работу алгоритма в условиях помех. Пусть имеется дезинформирующая активная помеха, которая создаётся точечным передатчиком, расположенным произвольно в канале связи. Поскольку канал распространения сигнала тот же самый, то число путей, приходящих на приёмник, увеличивается вдвое: сигнальные пути от БС и пути от помеховой станции (рис. 2).

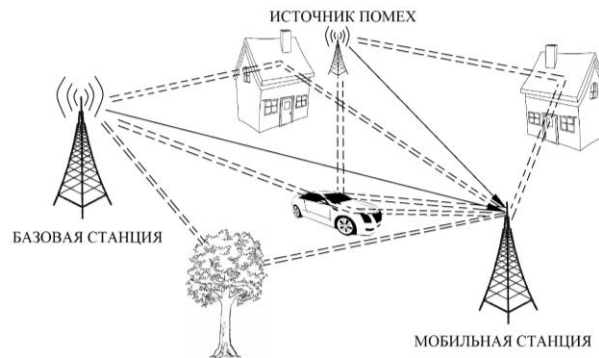


Рис. 2. Модель канала связи с источником активных помех

В предыдущем случае (без помехи) использовался критерий максимума ОСШ, однако здесь он не подходит: при выборе собственного числа возникает вопрос, каким оно является (помеховым или сигнальным). Потому будем использовать винеровский критерий, в котором обеспечивается минимум среднеквадратической погрешности воспроизведения пилот-сигнала в OFDM. В этом случае выбирается сигнальное собственное число, соответствующий ему собственный вектор, производится весовая обработка сигналов на выходах приёмной АР и сложение сигналов. Правильность выбора сигнального пути по критерию минимума среднеквадратической ошибки приёма сигналов пилот-поднесущих OFDM.

Технология OFDM подразумевает наличие пилот-поднесущих, известных на приёмной стороне по частоте и по коду модуляции [17, 18]. В расшифрованном коде выбираются позиции этих пилот-сигналов, производится сравнение по среднеквадратической ошибке, затем обеспечивается пороговая обработка. При большой ошибке происходит отказ от этого собственного числа. Так методом перебора ищется минимальная приемлемая ошибка, которая будет на основе пилот-поднесущей. Это будет означать, что выбран сигнальный путь с максимальной мощностью, а в направлении других сигнальных и помеховых путей в эквивалентной характеристике приёмной АР автоматически формируются нули [19].

На рисунках ниже представлены эксперименты по детектированию сигнала в канале связи с адаптацией и без адаптации с использованием винеровского критерия и наличия помехи, так как этот случай представляет особый интерес для практики. Моделирование произведено в среде Matlab [20].

Параметры канала связи:

Тип канал – Рэлеевский канал связи с многочисленными переотражениями;

Частота дискретизации – 500 кГц;

Максимальный Доплеровский сдвиг – 200 Гц.

Параметры системы связи:

Типы модуляции – QAM-4, BPSK;

Моделируемые ОСШ – 0÷20 дБ;

Отношение помеха/шум – 10 дБ;

Число приемных антенн – 4, 4, 6;
 Число передающих антенн – 1, 4, 4;
 Число символов модуляции – 1,5 x число приемных антенн;
 Число поднесущих – 24;
 Число сценариев для усреднения при оценке вероятности битовой ошибки – 10000.

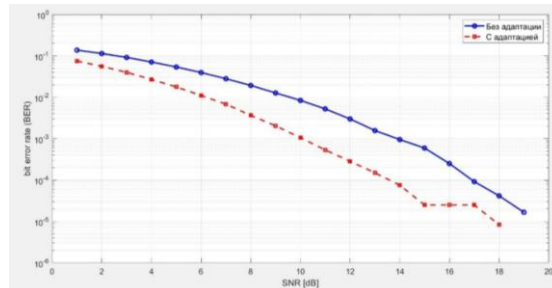


Рис. 3. Кривые BER 1x4 системы, QPSK модуляция

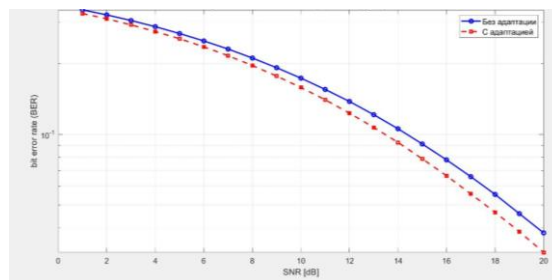


Рис. 4. Кривые BER 4x4-системы, QPSK модуляция

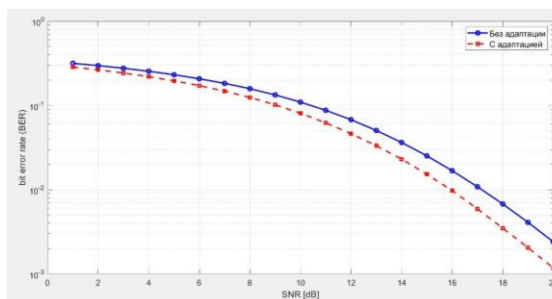


Рис. 5. Кривые BER 4x6-системы, QPSK модуляция

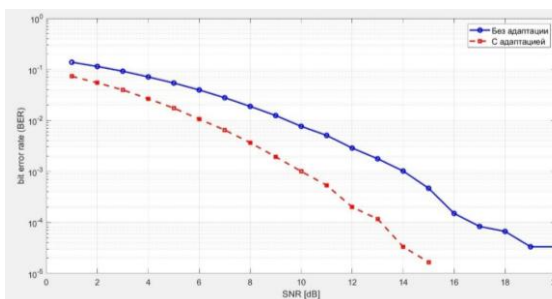


Рис. 6. Кривые BER 1x4-системы, BPSK модуляция

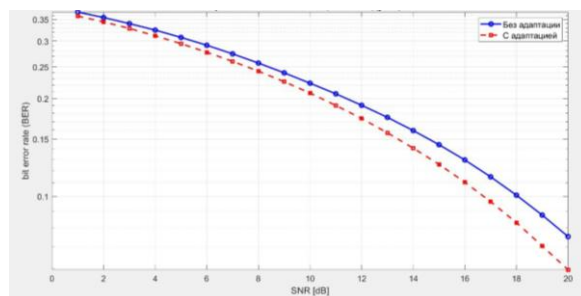


Рис. 7. Кривые BER 4x4-системы, BPSK модуляция

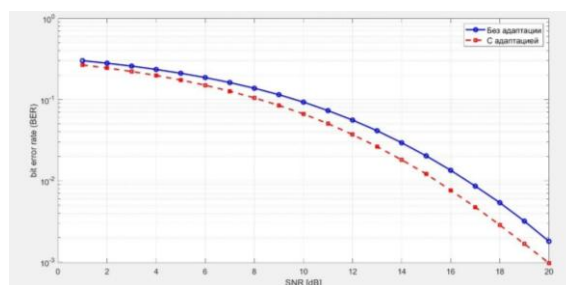


Рис. 8. Кривые BER 4x6-системы, BPSK модуляция

Видно, что применение адаптации даже в условиях наличия помехи на БС позволяет достичь снижения BER (частоты ошибки битов) на всей линии кривой зависимости и для всех ОСШ, что повышает помехоустойчивость приемника и является ценным для практических приложений ММО-OFDM-систем связи.

При этом очевидно, что адаптивная обработка улучшает качество детектирования сигнала вне зависимости от видов модуляций поднесущих, а также количества элементов приемных и передающих антенных решёток. Снижения вероятности битовой ошибки представлены в табл. 1 при отношении сигнал/шум 8 дБ для типов кодирования QPSK и BPSK при разном числе антенных элементов АР передатчика и приёмника: 1 x 4, 4 x 4 и 4 x 6.

Таблица 1

Результаты снижения вероятности битовой ошибки для различных параметров системы связи

№ п/п	Число антенн передатчика и приёмника	Тип модуляции сигнала	Отношение вероятностей битовой ошибки без адаптации и с адаптацией
1.	1 x 4	QPSK	7,7
2.	4 x 4	QPSK	1,2
3.	4 x 6	QPSK	1,3
4.	1 x 4	BPSK	16,3
5.	4 x 4	BPSK	1,1
6.	4 x 6	BPSK	1,4

Выводы. Разработанный алгоритм позволяет уменьшить вероятность битовой ошибки при наличии в канале точечного источника активных помех с отношением помеха/шум 10 дБ. Обеспечение адаптации элементов АР на приемной стороне даёт возможность выбора одного (в большинстве случаев прямого) пути, по

которому приходит максимальный сигнал, и подавления сигналов остальных путей. Таким образом, мощность передатчика тратится исключительно на путь, позволяющий обеспечить максимальную эффективность работы канала на приём. При отсутствии прямого пути система связи работает идентично путем выбора другого пути.

Использование винеровского критерия вместо критерия максимума ОСШ позволяет осуществлять качественную обработку сигнала даже тогда, когда на канал связи оказывают влияние помехи, как вызванные «внедрением» сигнала соседней станции (ввиду нелинейности передатчика этой станции), так и создание преднамеренной активной помехи. Благодаря пороговой обработке производится корректный выбор переданного БС сигнала, который пришел на раскрыв приемной АР.

Моделирование показывает снижение вероятности битовой ошибки на выходе приёмника при различных параметрах ММО-OFDM-системы связи.

На рисунках представлены результаты оценки вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум для алгоритма с адаптацией и без адаптации при различных числах элементов антенных решеток передатчика и приёмника, а также видов кодирования. эксперименты по детектированию сигнала в канале связи с адаптацией и без адаптации.

Разработанный алгоритм может быть использован для систем связи и управления беспилотными летательными аппаратами при наличии активных помех.

Разработка и исследование алгоритма выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №22-29-01389 от 21.12.2021 в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С. Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Антенны. – 2008. – № 11. – С. 98-104.
2. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решётки при использовании ММО-OFDM в релейском канале связи // Антенны. – 2013. – № 10 (197). – С. 45-49.
3. Федосов В.П., Емельяненко А.В., Гладушенко С.Г., Поморцев П.М. Методы и алгоритмы многоканальной пространственной обработки широкополосных сигналов // Нелинейный мир. – 2012. – Т. 10, №. 11. – С. 731-737.
4. Муравицкий Н.С., Федосов В.П. Метод улучшения приёма в системе беспроводной передачи данных на основе антенных решеток при наличии активных помех // Тр. международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭВМ - ИРЭМВ». – Таганрог: ТТИ ЮФУ. 2009. – С. 412-515.
5. Taiwen Tang; Heath R.W. Space-time interference cancellation in MIMO-OFDM systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2005. – P. 1802-1816.
6. Xirouchakis I.A. Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations A Ray Tracing Simulator Based on 3GPP TR 25.996 v. 6.1. 0 // Physics Department, University of Athens. – 2008.
7. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в ММО-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8. – С. 35-43.
8. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm based on antenna arrays for radio communication systems // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 14, No. 3. – P. 301-312.
9. Федосов В.П. Алгоритмы совместной адаптации на приём и передачу в системе связи на основе антенных решёток при наличии активных помех // Прикладная электродинамика и антенные измерения.
10. Федосов В.П., Терновой Д.О. Алгоритм совместной адаптации на прием и передачу в системе связи на основе антенных решеток // Радиотехника. – 2011. – №. 9. – С. 52-55.

11. Федосов В.П., Романов В.А. Статистическая радиотехника: электронное учебное пособие. – Ростов-на-Дону, 2008.
12. Fedosov V., Jameel J., and Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – P. 012131.
13. Fedosov V.P., Jameel J.S., and Kucheryavenko S.V. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2021. – P. 443-446.
14. Fedosov V., Legin A., and Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO—OFDM technique // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2017. – P. 218-221.
15. Fedosov V., Legin A., and Lomakina A. Algorithms based on MIMO-OFDM technology for realization of digital hydroacoustic communication channel // *Izvestiya SfedU, Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 168. – P. 148-158.
16. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Modeling of systems wireless data transmission based in antenna arrays in underwater acoustic channels в сборнике: Proceedings of SPIE // The International Society for Optical Engineering. Architectures, Algorithms, and Applications. Ser. "Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications 2016". – 2016. – P. 98720G.
17. Minn H., Al-Dhahir N. Optimal training signals for MIMO OFDM channel estimation // *IEEE transactions on wireless communications*. – 2006. – Vol. 5, No. 5. – P. 1158-1168.
18. Raleigh G.G., Cioffi J.M. Spatio-temporal coding for wireless communication // *IEEE Transactions on communications*. – 1998. – Vol. 46, No. 3. – P. 357-366.
19. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Устойчивость к ошибкам в оценке весовых векторов адаптивного пространственно-временного алгоритма радиосвязи на антенных решётках в релейском канале // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 11 (148). – С. 37-44.
20. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. – John Wiley & Sons, 2010.

REFERENCES

1. Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V., Muravitskiy N.S. Povyshenie effektivnosti radiosvyazi v releevskom kanale na osnove antennykh reshetok [Improving the efficiency of radio communication in the relay channel based on antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11, pp. 98-104.
2. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Sravnitel'naya effektivnost' besprovodnogo dostupa na osnove prostranstvennoy adaptatsii na vykhodakh antennoy reshetki pri ispol'zovanii MIMO-OFDM v releevskom kanale svyazi [Comparative efficiency of wireless access based on spatial adaptation at the antenna array outputs when using MIMO-OFDM in a relay communication channel], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10 (197), pp. 45-49.
3. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V., Gladushenko S.G., Pomortsev P.M. Metody i algoritmy mnogokanal'noy prostranstvennoy obrabotki shirokopolosnykh signalov [Methods and algorithms of multichannel spatial processing of broadband signals], *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2012, Vol. 10, No. 11, pp. 731-737.
4. Muravitskiy N.S., Fedosov V.P. Metod uluchsheniya priema v sisteme besprovodnoy peredachi dannykh na osnove antennykh reshetok pri nalichii aktivnykh pomekh [A method for improving reception in a wireless data transmission system based on antenna arrays in the presence of active interference], *Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluichenie i rasseyaniye EVM - IREMV»* [Proceedings of the international scientific conference "Radiation and scattering of computers - IREMV"]. Taganrog: TTI YuFU. 2009, pp. 412-515.
5. Taiwan Tang; Heath R.W. Space-time interference cancellation in MIMO-OFDM systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, pp. 1802-1816.
6. Xirouchakis I.A. Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations A Ray Tracing Simulator Based on 3GPP TR 25.996 v. 6.1. 0, *Physics Department, University of Athens*, 2008.

7. Fedosov V.P., Muravitskiy N.S. Adaptivnaya priemnaya antennaya reshetka dlya obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov v MIMO-sisteme besprovodnoy peredachi dannykh [Adaptive receiving antenna array for processing spatio-temporal signals in a MIMO-system of wireless data transmission], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 8, pp. 35-43.
8. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm based on antenna arrays for radio communication systems, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 301-312.
9. Fedosov V.P. Algoritmy sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennoykh reshetok pri nalichii aktivnykh pomekh [Algorithms of joint adaptation to reception and transmission in a communication system based on antenna arrays in the presence of active interference], *Prikladnaya elektrodinamika i antennoye izmereniya* [Applied electrodynamics and antenna measurements].
10. Fedosov V.P., Ternovoy D.O. Algoritmy sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennoykh reshetok [Algorithm of joint adaptation to reception and transmission in a communication system based on antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2011, No. 9, pp. 52-55.
11. Fedosov V.P., Romanov V.A. Statisticheskaya radiotekhnika: elektronnoe uchebnoye posobie [Statistical radio engineering: an electronic textbook]. Rostov-on-Don, 2008.
12. Fedosov V., Jameel J., and Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, pp. 012131.
13. Fedosov V.P., Jameel J.S., and Kucheryavenko S.V. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2021, pp. 443-446.
14. Fedosov V., Legin A., and Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO—OFDM technique, *2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2017, pp. 218-221.
15. Fedosov V., Legin A., and Lomakina A. Algorithms based on MIMO-OFDM technology for realization of digital hydroacoustic communication channel, *Izvestiya SFedU, Engineering Sciences*, 2015, Vol. 168, pp. 148-158.
16. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Modeling of systems wireless data transmission based in antenna arrays in underwater acoustic channels в сборнике: Proceedings of SPIE, *The International Society for Optical Engineering. Architectures, Algorithms, and Applications. Ser. "Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications 2016"*, 2016, pp. 98720G.
17. Minn H., Al-Dhahir N. Optimal training signals for MIMO OFDM channel estimation, *IEEE transactions on wireless communications*, 2006, Vol. 5, No. 5, pp. 1158-1168.
18. Raleigh G.G., Cioffi J.M. Spatio-temporal coding for wireless communication, *IEEE Transactions on communications*, 1998, Vol. 46, No. 3, pp. 357-366.
19. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Ustoychivost' k oshibkam v otsenke vesovykh vektorov adaptivnogo prostranstvenno-vremennogo algoritma radiosvyazi na antennoykh reshetkakh v releevskom kanale [Resistance to errors in the estimation of weight vectors of the adaptive space-time algorithm of radio communication on antenna arrays in the Rayleigh channel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 37-44.
20. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley & Sons, 2010.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Пацюк Тимур Тимофеевич – e-mail: patzyuck2011@yandex.ru; тел.: +79185120831; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – Southern Federal University; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor,

Patsyuk Timur Timofeevich – e-mail: patzyuck2011@yandex.ru; phone: +79185120831; the department of fundamentals of radio engineering; graduate student.

Раздел IV. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 621.31:533.65.013.622

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-230-243

М.Ю. Медведев, В.А. Костюков, М.Ю. Бутенко, В.Г. Гисцов, И.Д. Евдокимов АППАРАТНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ГРУППЫ БПЛА

В связи с ускоренным ростом объемов использования групп автономно функционирующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных средах решение проблемы оптимизации функционирования групп таких аппаратов по критерию минимума затрачиваемой энергии является актуальной научной задачей. В настоящей статье развивается новый подход обеспечения энергосбережения группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) за счет использования станций подзарядки БПЛА, обеспечивающих необходимую универсальность в обслуживании разных типов аппаратов. Рассматриваются наиболее эффективные варианты систем приземления, точного позиционирования, выработки энергии на станции, а также обосновывается гибридная система обеспечения подзарядки, сочетающая контактный и бесконтактный способы. Приводится обобщенная схема многоэтапного взаимодействия БПЛА со станцией подзарядки, предусматривающая возможность повторения одного из этапов в случае не полного его завершения в течение определенных интервалов времени, а также учитывающая особенности взаимодействия между агентами по доступным им каналам связи. Поставлена и решена задача оптимального распределения по энергетическому критерию БПЛА группы между пунктами назначения (ПН), совмещенными со станциями подзарядки (СП). Учитывается как крейсерский режим, так и маневрирование аппарата при взлете и посадке, когда мощность расходования энергии возрастает. Введено понятие эффективного расстояния до пункта назначения, учитывающего оценочные затраты энергии каждого БПЛА на достижение данного ПН с учетом его произвольного текущего положения и имеющейся очереди заданий на данный момент. Для исследования разработанных подходов и алгоритмов целераспределения и планирования движения БПЛА группы создано и апробировано программное обеспечение на базе среды Unity. Гибкость последнего позволяет моделировать различные алгоритмы информационных взаимодействий элементов внутри группы БПЛА, группы СП, а также перекрестных взаимодействий между БПЛА и СП. В частности, Программное обеспечение позволяет определять в каждый дискретный момент степень заряда каждого БПЛА, очереди ПН для каждого БПЛА, его историю пополнения заряда на станциях.

БПЛА; станция зарядки; гибридная система подзарядки; энергетическая эффективность функционирования; алгоритм целераспределения; оптимизация; Unity.

M.Y. Medvedev, V.A. Kostyukov, M.Y. Butenko, V.G. Gistsov, I.D. Evdokimov THE CONCEPT OF CREATING A PROMISING SYSTEM FOR RECHARGING AN AUTONOMOUS GROUP OF UAVS

Due to the accelerated growth in the use of groups of autonomously functioning unmanned aerial vehicles (UAVs) in various environments, solving the problem of optimizing the functioning of groups of such vehicles according to the criterion of the minimum energy consumed is an urgent scientific task. In this article, a new approach is being developed to ensure energy saving of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) by using UAV charging stations that provide the necessary versatility in servicing different types of vehicles. The most effective variants of landing systems, precise positioning, power generation at the station are considered, and a hybrid charging system combining contact and contactless

methods is also justified. A generalized scheme of multi-stage interaction of the UAV with the charging station is given, which provides for the possibility of repeating one of the stages if it is not fully completed within certain time intervals, and also takes into account the peculiarities of interaction between agents through the communication channels available to them. The problem of optimal distribution according to the energy criterion of the group's UAVs between destinations (PN) combined with charging stations (SP) has been set and solved. Both the cruising mode and the maneuvering of the vehicle during takeoff and landing, when the power consumption increases, are taken into account. The concept of the effective distance to the destination is introduced, taking into account the estimated energy costs of each UAV to reach this destination, taking into account its arbitrary current position and the available queue of tasks at the moment. To study the developed approaches and algorithms for targeting and planning the movement of the group's UAVs, software based on the Unity environment was created and tested. The flexibility of the latter allows modeling various algorithms of information interactions of elements within a group of UAVs, a group of charging stations, as well as cross-interactions between UAVs and charging stations. In particular, the software allows you to determine at each discrete moment the degree of charge of each UAV, the queues of destinations for each UAV, its history of recharge at stations.

UAV; charging station; hybrid charging system; energy efficiency of functioning; target allocation algorithm; optimization; Unity.

Введение. В связи с ростом объемов использования групп автономно функционирующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных природных и инфраструктурных условиях решение проблемы оптимизации функционирования таких групп по критерию минимума затрачиваемой ими энергии является актуальной научно-производственной задачей. Одним из важных аспектов решения этой проблемы является разработка облика перспективной станции подзарядки, способной в автономном режиме восполнять энергетические потери элементов указанных групп. При этом необходимо учитывать технические характеристики БПЛА группы, а также требование минимальности отношения «цена/ качество». Кроме того, разработка перспективной СП должна быть увязана с выборами оптимальных способов и соответствующих конструкций устройств для приземления БПЛА данного типа, а также для его позиционирования в определенной области стыковочной площадки с заданной точностью для последующей подзарядки. Для повышения точности автоматического приземления БПЛА мультикоптерного типа на платформу последняя может быть снабжена специальными опознавательными знаками-маркерами. В этом случае БПЛА должен быть снабжен специальным программно-аппаратным обеспечением для ориентации по указанным маркерам в условиях разной видимости [1, 2].

Система ориентирования по маркерам может быть дополнена специальными углублениями на стыковочной площадке по числу опор аппарата [3, 4], куда последние соскальзывают, или специальной реечной системой доводки БПЛА до области подзарядки [5, 6].

В патенте [7] рассматриваются основные способы контактной подзарядки БПЛА и соответствующие облики СП, однако не проведено соответствующего сравнительного анализа. В патенте [8] рассматривается возможный способ замены разряженных аккумуляторных батарей, а в работах [9, 10] – способы подзарядки АКБ на борту с помощью специальных проводящих устройств. В работе [11] рассматривается возможная реализация системы бесконтактной подзарядки на основе микрополосковых структур.

С другой стороны, решение указанной проблемы энергосбережения должно подразумевать уровень планирования и реализации взаимодействия в целом между группой БПЛА и группой СП, а также между элементами внутри каждой из этих групп, затрагивать вопросы оптимального, в том числе по энергетическому крите-

рию, такого взаимодействия, учитывающего особенности реализуемой группой БпЛА миссии, ограничения каналов связи, а также, возможно, опыт такой реализации в прошлом.

Наконец, вопрос энергетического обеспечения самой СП должен решаться, исходя из природных условий функционирования СП, группы БпЛА, особенностей ее миссии, по сути – на основании степени доступности централизованного энергоснабжения. Если последнее применять дорого, неэффективно или невозможно, то нецелесообразно использовать ветроэнергетические установки (ВЭУ) совместно с солнечными панелями.

Большую роль здесь могут сыграть вертикально-осевые ВЭУ, не требующие устройства ориентации по ветру и менее шумные, по сравнению с горизонтально-осевыми установками [12]. В работах [13, 14] показаны энергетические эффективности модифицированного ротора ВЭУ типа Дарье и установки планетарного типа, соответственно; в статье [12] обосновано применение вертикально-осевого ротора специального типа со статическими направляющими аэродинамическими структурами.

В случае сниженных требований по степени создаваемого акустического и инфракрасного шумов возможно применение горизонтально-осевых ВЭУ [15, 16], которые имеют больший коэффициент использования энергии ветра по сравнению с вертикально-осевыми установками, но в узком диапазоне скоростей [13, 14].

В работе [17] рассматривается диалоговая модель взаимодействия станции подзарядки с БпЛА группы, позволяющая обеспечить безопасную и надежную покупку БпЛА энергии у станции. В работе [18] решается задача максимизации времени функционирования каждого БпЛА группы на основе решения соответствующей задачи коммивояжера. В статье [19] рассматривается модель взаимодействия между БпЛА и СП, учитывающая предысторию процесса этого взаимодействия и возможность использования возобновляемых источников энергии на станциях подзарядки.

Рассмотренные работы затрагивают разные аспекты проблемы обеспечения энергосбережения группы БпЛА и показывают практическую важность и актуальность такой разработки.

В настоящей статье развивается новый подход интеграции нескольких видов подзарядки БпЛА для обеспечения необходимой универсальности в обслуживании разных типов аппаратов, а также предлагается постановка и решение при некоторых ограничениях задачи оптимального распределения БпЛА группы между пунктами назначения, совмещенными со станциями подзарядки, по энергетическому критерию.

Для исследования созданной концепции разработано программное обеспечение на базе среды Unity.

Разработка перспективной системы для автономного заряда АКБ БпЛА. Существуют контактные и бесконтактные способы зарядки. К первым относятся: а) зарядка без извлечения АКБ; б) замена разряженных АКБ на заряженные.

Преимуществом контактной зарядки является высокий КПД. При этом механическая часть контактной системы зарядки по способу а) значительно более проста по сравнению с соответствующей частью по способу б): в первом случае требуется только подвижная клемма с одной степенью свободы, которая должна пристыковываться к соответствующим разъемам АКБ [4], а по второму способу требуется две специальных подсистемы: манипуляционная с минимум двумя степенями свободы и конвейерная подсистема отвода разряженных АКБ и подвода заряженных [8]. Однако время нахождения БпЛА на станции для подзарядки АКБ по первому способу больше, чем по второму (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ существующих способов автоматической зарядки

Основные характеристики способа	Контактный способ подзарядки		Бесконтактная зарядка
	зарядка без извлечения АКБ	замена разряженных АКБ на заряженные	
Тип модуля для механических перемещений подвижных частей	Подвижная клемма	Манипулятор	Актuator
Число подвижных элементов	2 и более	3 и более	1
КПД, %	около 100	около 100	70 и ниже
Наличие мощного вычислительного модуля	нет	да	нет
Возможность заряда АКБ при неточном позиционировании	нет	нет	да
Время ожидания БПЛА на примере моделей модель 1: <i>DJI mavic mini</i> модель 2: <i>DJI matrice 300</i>	Большое 90-150 мин – модели 1, 60-120 мин – модели 2	Малое до 1 мин – для модели 1, 1-2 мин – для модели 2	Большое 180-600 мин – для модели 1, 180-600 – для модели 2
Наличие приёмника-передатчика для обмена информацией	нет	нет	да

Для контактной подзарядки важное значение играет синхронизация действий устройства подключения штекера к АКБ для способа а), или манипуляций с разряженной и ранее заряженной АКБ для способа б), – с ответным устройством на борту БПЛА. Такая синхронизация может быть осуществлена с помощью приёмопередатчиков, установленных на наземной станции и борту БПЛА.

Существующие контактные способы зарядки аккумуляторной батареи БПЛА основаны на использовании относительно сложного механизма [7, 8, 10]. В отличие от них зарядка по беспроводной технологии более проста. Способ передачи энергии в этом случае основан на явлении электромагнитной индукции, его эффективность сильно зависит от коэффициента связи взаимодействующих индуктивных катушек и их добротностей [20]. Основными недостатками бесконтактного способа являются: а) низкий КПД (в максимуме – не более 70% у существующих разработок, при неточном позиционировании БПЛА он резко падает); б) проблема электромагнитной совместимости с электронным бортовым оборудованием.

В табл. 1 произведено сравнение основных характеристик автоматизированных способов зарядки АКБ мультикоптеров.

Для оценки ожидаемых интервалов времени подзарядки по трем способам рассмотрены две модели БПЛА: *DJI mavic mini* и *DJI matrice 300*, для которых были взяты соответствующие данные производителя. Из приведенных данных видно превышение времени подзарядки по контактному штекерному и бесконтактному способам на два порядка, по сравнению со способом замены АКБ.

В настоящей статье предлагается гибридный способ подзарядки БПЛА, подразумевающий использование контактного способа заряда АКБ для БПЛА с требованием минимального времени обслуживания, и бесконтактного способа для тех классов аппаратов, для которых по регламенту допустимо значительно большее время обслуживания на станции.

Обобщенный алгоритм взаимодействия БПЛА и станции. Процесс взаимодействия состоит из трех этапов: приземления, позиционирования и непосредственно подзарядки. На каждом из этапов происходит вначале синхронизация действий БПЛА и станции: на первом этапе может быть использован радиоканал или луч лазера (канал 1 на рис. 2), а на последних двух целесообразно задействовать bluetooth-канал (канал 2).

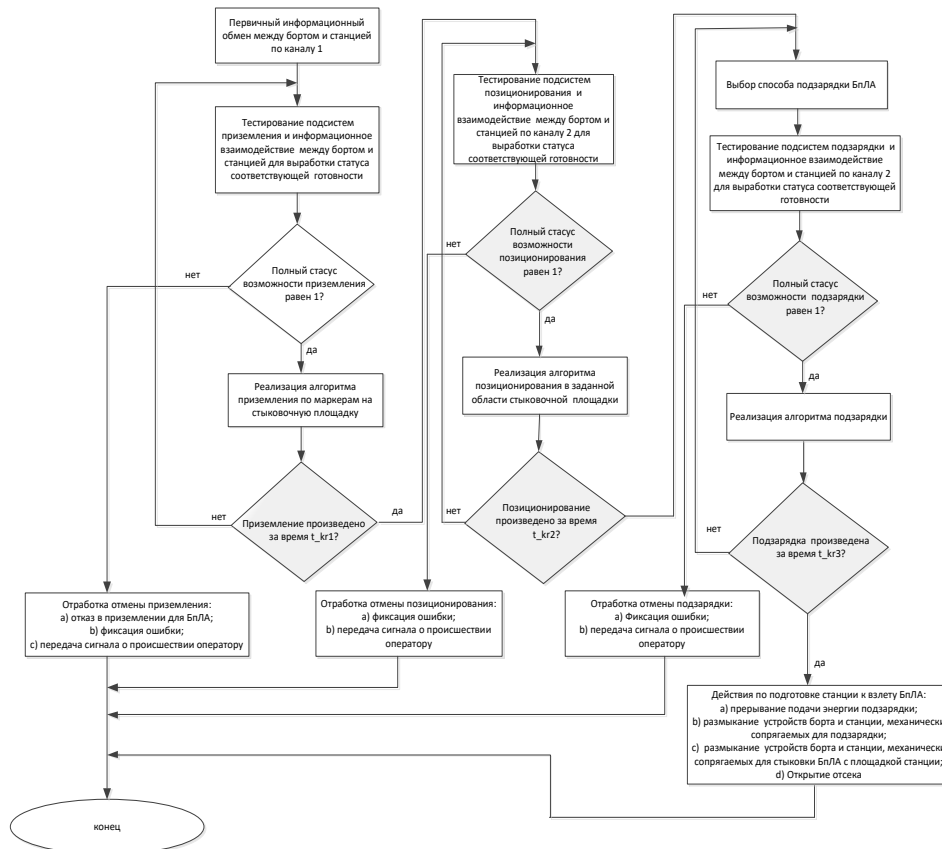


Рис. 2. Блок-схема обобщенного алгоритма взаимодействия БПЛА и станции подзарядки

Блок схема обобщенного алгоритма взаимодействия БПЛА и станции в процессе подзарядки приведена на рис. 2. Агенты тестируют свои собственные подсистемы, осуществляющие текущий этап, и передают полученную информацию друг другу. На каждую попытку реализации этапа отводится определенное время (t_{kr1} , t_{kr2} , t_{kr3} – для первого, второго и третьего этапов), по истечении которого, если этап не был завершен успешно, производится новая попытка его осуществления. Если тестирование показало невозможность осуществления этапа, тогда происходит аварийное его прерывание, фиксация соответствующей ошибки с сообщением сведений о ней оператору.

Особенности алгоритмического обеспечения системы управления группой БПЛА, курсирующих между пунктами назначения с возможностью подзарядки. Дана однородная группа БПЛА заданного класса в количестве K штук, которая курсирует между N стационарными пунктами назначения $S_i, i = 1, \dots, N$. Каждый

БПЛА забирает некоторый груз на одной из станций и отвозит на другую. Для определенности БПЛА группы будем считать работающими на электрических двигателях с накоплением энергии в аккумуляторах. Каждый из пунктов назначения снабжен системой подзарядки БПЛА. Каждый БПЛА может иметь максимальную энергию заряда $E_{0\max}$. Стационарные пункты расположены друг относительно друга таким образом, чтобы любой БПЛА, находящийся в произвольном пункте назначения S_{i1} , мог достигнуть любого другого пункта с номером S_{i2} , $i_2 \neq i_1$ без необходимости приземляться для подзарядки. Если каждый БПЛА в режиме полета с оптимальной крейсерской скоростью v_{kr} расходует энергию заряда с мощностью P_{kr} , то тогда наибольшее расстояние между пунктами назначений должно быть ограничено сверху значением $l_{\sup} = k_E \frac{E_{0\max}}{P_{kr}} v_{kr}$, где коэффициент

$k_E = k_{E1} + k_{E2} < 1$ учитывает два фактора. Во-первых, в реальности за счет фаз ускоренного движения при взлете, посадке средняя мощность расходования энергии будет несколько больше, чем величина P_{kr} для крейсерского режима, что учитывается фактором $k_{E1} < 1$. Второй фактор $k_{E2} < 1$ состоит в том, что реальная траектория движения аппарата не является прямым отрезком, соединяющим два пункта назначения.

Оператор, находящийся на некотором наземном пункте, периодически, в дискретные моменты времени t_q , $q = 1, 2, \dots, U$, выдает задания на перевозку грузов из одних пунктов назначения в другие, что формируется в виде пакета:

$$\left[(j_1^{q,1} j_2^{q,1}), (j_1^{q,2} j_2^{q,2}), \dots, (j_1^{q,M_q} j_2^{q,M_q}) \right] \# \quad (1)$$

где, например, пара $(j_1^{q,1} j_2^{q,1})$ – обозначение элементарного задания по перевозке груза из пункта с номером $j_1^{q,1}$ в пункт назначения с номером $j_2^{q,1}$ и т.д.; M_q – число назначенных в момент t_q элементарных заданий. Затем оператором либо самой группой БПЛА решается задача распределения БПЛА группы между введенными парами пакета (1). При этом задействуются в общем случае все БПЛА, в том числе и те, которые на момент t_q находятся в процессе выполнения задания.

В начальный момент времени t_1 оператор выдает задания еще не задействованным БПЛА, которые находятся в некоторых пунктах назначения.

Рассмотрим алгоритм взаимодействия между БПЛА и станциями подзарядки. БПЛА в процессе функционирования постоянно оценивает оставшуюся энергию для возможности достижения целевого пункта назначения, соответствующего текущему элементарному заданию. Если оцениваемой энергии недостаточно для достижения целевой точки, тогда принимается решение о поиске ближайшей станции подзарядки, находящейся на ближайшем ПН.

В процессе выбора подходящей станции подзарядки каждый БПЛА может использовать алгоритм, рассмотренный в работе [19]. Он подразумевает учет двух факторов: а) текущие пространственное положение БПЛА относительно каждой станции подзарядки и характеристики самих станций подзарядки, заявляемые последними; б) предысторию процесса взаимодействия БПЛА с каждой станцией, что выражается соответствующими взвешенными коэффициентами.

Если возникает ситуация, что два и более БПЛА выбрали одну и ту же станцию подзарядки, тогда конфликт разрешается с помощью очередности поступления сигнала от БПЛА до станции подзарядки: более ранний сигнал дает право более быстрого доступа к СП. Таким образом, возможно формирование очередей на подзарядку на СП, и возникновение времени ожидания, что является неизбежным для данного алгоритма и является платой за его простоту.

Основная задача функционирования группы БПЛА заключается в том, чтобы за ограниченное время выполнить все задания. С учетом требования достаточной автономности функционирования группы БПЛА решение этой задачи сводится к оптимизации функционирования группы по энергетическому критерию.

Транспортные связи между пунктами назначения, соответствующие элементарным заданиям, можно выразить в виде графа, вершины которого обозначают пункты назначения, а ребра – соответствующие назначенные задания на данный момент времени, показаны сплошными линиями (рис. 3). При этом новые элементарные задания пришедшего пакета есть (см. (2)):

$$[(S_1S_2), (S_8S_2), (S_2S_5), (S_3S_4), (S_3S_6), (S_7S_3), (S_8S_1), (S_6S_1)] \# \quad (2)$$

На этом же рисунке для некоторой миссии указаны также: текущие положения БПЛА на момент t_q прихода нового задания (показаны сплошными кружками).

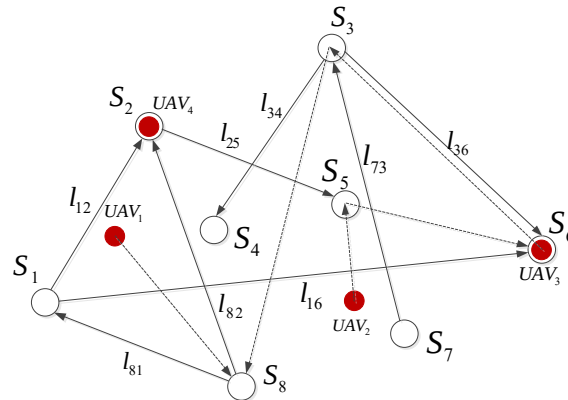


Рис. 3. Графовое представление совокупности положений ПН, БПЛА, элементарных заданий в очереди, а также текущих заданий сразу после прихода нового пакета в момент t_q

В результате решения задачи распределения элементарных заданий нового пакета между элементами группы БПЛА, последние получают новые задания. Каждое новое задание становится актуальным для данного БПЛА, если он на момент прихода нового задания был свободным. Если же БПЛА уже выполняет некоторое задание, то ему новое может быть поставлено в очередь. Для примера пунктирными линиями показаны траектории БПЛА, назначенные им алгоритмом целераспределения и которые они должны пройти с учетом уже имеющихся в их очередях заданий. Так, БПЛА-1 должен достичь пункта назначения S_8 ; БПЛА-2 – S_5 и затем S_6 ; БПЛА-3 находится на станции S_6 , должен достичь S_3 , а затем S_8 ; БПЛА-4 находится в S_2 и все текущие задания у него выполнены.

Рассмотрим оптимизационную задачу минимизации суммарной энергии, затрачиваемой всеми БПЛА на выполнение задачи достижения целевых пунктов назначения.

Оптимизационная задача распределения БПЛА группы между назначенными элементарными заданиями по энергетическому критерию. Рассмотрим задачу распределения БПЛА в количестве N штук (точки $\{X_i\}, i=1,2,\dots,N$), между пунктами назначения (ПН) в количестве $M=N$ штук (точки $\{Y_j\}, j=1,2,\dots,M$) по критерию минимума полной затрачиваемой ими энергии. Введем в рассмотрение целочисленную функцию $\xi(q,i,m)$, $m=1,\dots,M_{q,i}$, перечисляющую номера всех тех ПН, которые поставлены в очередь i -му БПЛА на q -м шаге обновления (в момент t_q) в количестве $M_{q,i}$ штук.

Если для i -го БПЛА поставить в очередь некоторый пункт назначения Y_j , соответствующий начальной точке одного из элементарных заданий присланного пакета структуры (1), тогда оценка затраченной аппаратом энергии на достижение ПН Y_j может быть представлена в следующем виде:

$$E_{i,j} = \frac{|Y_{\xi(q,i,1)} - X_i|}{v_{kr}} P_{kr} + \sum_{k=1}^{M_{q,i}-1} \left[\frac{|Y_{\xi(q,i,k)} - Y_{\xi(q,i,k+1)}|}{v_{kr}} P_{kr} \right] + \frac{|Y_j - Y_{\xi_{next}}|}{v_{kr}} P_{kr} + \left(\frac{P_{kr}}{k_{E1,0}} \Delta t_{tl} \right) M_{q,i} \quad (3)$$

где $\xi_{next} = \xi(u,i,M_{q,i})$. Здесь первое слагаемое соответствует затратам энергии i -го БПЛА на достижение ранее назначенного ПН $Y_{\xi(q,i,1)}$, стоящего первым в очереди без учета маневров посадки и взлета; второе соответствует затратам на движение БПЛА между всеми остальными целевыми точками в его очереди без учета этих маневров, третье – затратам на движение из последней точки в очереди $Y_{\xi_{next}}$ до гипотетической точки отправления Y_j некоторого нового элементарного задания, опять без учета маневров. Наконец, четвертое слагаемое в (3) соответствует учету указанных маневров для всех ПН в очереди, причем $k_{E1,0}$ – есть средний коэффициент увеличения мощности при таких маневрированиях, Δt_{tl} – суммарное время посадки и взлета без учета времени возможной подзарядки БПЛА. Параметры $\Delta t_{tl}, k_{E1,0}$ для простоты считаются одними и теми же для всех БПЛА группы.

Тогда оптимизационная задача формулируется так:

$$s_E = \sum_{i=1}^N E_{i,\eta(i)} \rightarrow \min, \quad \eta_{opt} = \underset{\{\eta\}}{argmins_E} \quad (4)$$

где $\eta(i)$ – функция распределения номеров $i=1,2,\dots,N$ БПЛА по номерам станций $j=1,2,\dots,N$.

Заметим, что энергия $E_{i,j}$ в (3) пропорциональна следующему функционалу:

$$\rho_e(X_i, Y_j, q) = \frac{v_{kr}}{P_{kr}} E_{i,j} = |Y_{\xi(q,i,1)} - X_i| + \sum_{k=1}^{M_{q,i}-1} |Y_{\xi(q,i,k)} - Y_{\xi(q,i,k+1)}| + \left(\frac{M_{q,i}}{k_{E1,0}} \right) v_{kr} \Delta t_{tl} + |Y_j - Y_{\xi_{next}}| \quad (5)$$

Введенный функционал $\rho_e(X_i, Y_j, q)$ назовем эффективным расстоянием до пункта назначения Y_j с учетом текущего положения БПЛА и всех заданий в его очереди на q -м шаге обмена информацией. Сумму первых трех слагаемых в (5) назовем начальным расстоянием ρ_{e0} для i -го БПЛА на q -м шаге обмена информацией:

$$\rho_{e0}(X_i, q) = |Y_{\xi(q,i,1)} - X_i| + \sum_{k=1}^{M_{q,i}-1} |Y_{\xi(q,i,k)} - Y_{\xi(q,i,k+1)}| + \left(\frac{M_{q,i}}{k_{E1,0}}\right) v_{kr} \Delta t_{tl} \# \quad (6)$$

где $\xi_{next} = \xi(q, i, M_{q,i})$. Тогда (4) может быть переписано в виде:

$$s_E = \sum_{i=1}^N [\rho_{e0}(X_i, q) + |Y_{\eta(i)} - Y_{\xi_{next}}(q, i)|] \rightarrow \min \# \quad (7)$$

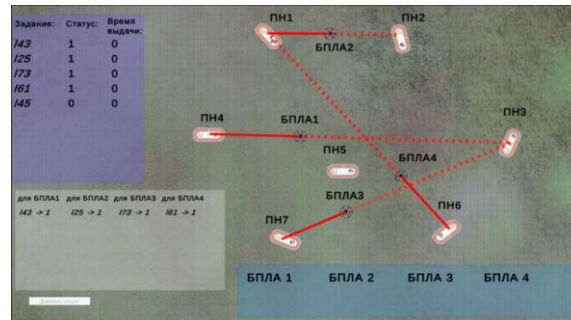
Данная задача для $N \leq 10$ может быть решена методом непосредственного перебора соответствующих вариантов перестановок $N!$.

Программный комплекс моделирования движений БПЛА группы между пунктами назначения с возможностью пополнения энергии на станциях подзарядки. Для моделирования движений БПЛА группы между пунктами назначения с возможностью пополнения энергии на станциях подзарядки реализован программный модуль в среде Unity. Модуль позволяет создавать подгруппы: пунктов назначения (ПН), станций подзарядки (СП), а также подгруппу БПЛА, элементы которой курсируют между ПН, перевозя грузы, и могут приземляться на СП для восполнения энергии. Время подзарядки было взято соответствующим способом замены АКБ – без учета маневров приземления и посадки составляющим порядка $t_{30}=30$ с. Ниже рассмотрен случай, когда каждая СП совмещена с некоторым ПН. Также в начальный момент положения БПЛА совпадают с соответствующими станциями. Модель расходования энергии каждым БПЛА соответствует ранее рассмотренной в п. 4; для всех БПЛА было положено: $\Delta t_{tl} = 60$ с, $k_{E1,0} = 0,3$, $v_{kr} = 15$ м/с.

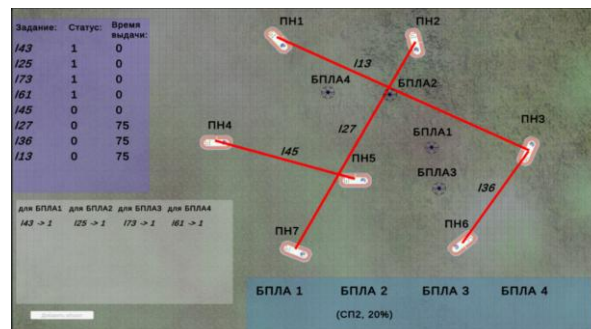
Симулятор позволяет моделировать: взаимодействие оператора с группой БПЛА, выраженное в передаче в произвольные дискретные моменты времени пакетов заданий в виде (1); целераспределение ПН между аппаратами по энергетическому критерию (7) с учетом их текущих положений и пунктов назначений, имеющих в очереди каждого из них; принятие решений каждым БПЛА о необходимости подзарядки на некоторой СП согласно методике, изложенной в [19]; планирование перемещений аппаратов с учетом назначенных им заданий и основных их ТТХ.

На рис. 4 показаны положения БПЛА относительно стационарных пунктов назначения в момент времени $t_1=25$ мин после получения первого пакета заданий в момент $t_0=0$. Сплошными линиями показаны уже пройденные участки траекторий, спланированных для аппаратов после решения задачи о назначениях по критерию (7); пунктирными – оставшиеся участки траекторий до достижения ближайшего для каждого БПЛА ПН. Также выводится информация о статусе элементарных заданий: значение 0 означает выработано и назначено, но соответствующий БПЛА пока не приступил к выполнению; значение 1 – один из аппаратов получил назначение и приступил к выполнению этого задания; 2 – данное задание выполнено.

Далее, в момент времени $t_2=75$ мин приходит новый пакет заданий: $[l_{13}, l_{36}, l_{27}]$; ребра графа, соответствующие новым заданиям, выделяются сплошными линиями (рис. 5). Четыре элементарных задания имеют статус «0», поскольку от предыдущего пакета осталось одно нераспределенное задание l_{45} . К моменту t_2 все ранее назначенные задания имеют статус «в процессе выполнения». После этого решается задача соответствующего целераспределения.

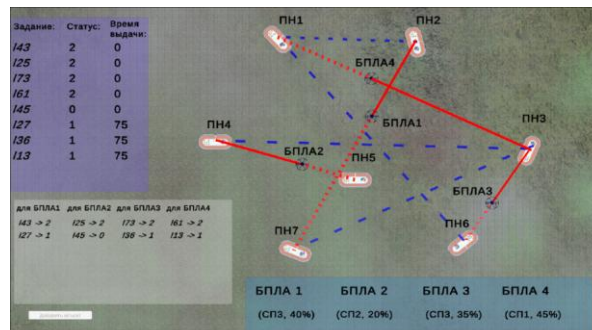
Рис. 4. Состояние выполнения миссии на момент $t_1=25$ мин

На рис. 6 показано состояние выполнения миссии на момент $t_3=100$ мин, когда БПЛА-1 один раз пополнил запасы энергии на СПЗ в размере 40% от полного заряда АКБ, БПЛА 2 – на СП2 с пополнением энергии в размере 20% от полного заряда, БПЛА 3 – на СП3 с пополнением энергией на 35%, БПЛА 4 – на СП1 с пополнением энергией на 45%.

Рис. 5. Состояние выполнения миссии на момент назначения $t_2=75$ мин второго пакета заданий

В момент t_3 элементарные задания (l_{43} , l_{25} , l_{73} , l_{61}) выполнены, (l_{13} , l_{36} , l_{27}) – в процессе выполнения, а l_{45} пока не стало выполняться.

Таким образом, созданный программный комплекс может быть эффективно использован для разработки и оптимизации по энергетическому критерию алгоритмов планирования движений БПЛА при перемещениях между пунктами назначения с учетом станций подзарядки.

Рис. 6. Состояние выполнения миссии на момент $t_3=100$ мин

Заключение. В настоящей статье развивается новый подход интеграции нескольких видов подзарядки БПЛА для обеспечения необходимой универсальности в обслуживании разных типов аппаратов, приведена соответствующая обобщенная блок-схема алгоритма трехэтапного взаимодействия, учитывающая фазы приземления, позиционирования и подзарядки БПЛА на станции.

Предлагается постановка и решение новой задачи оптимального распределения БПЛА группы между пунктами назначения по критерию минимальности энергетических затрат группой БПЛА при выполнении ею миссии с учетом как крейсерского режима, так и маневрирования при взлете и посадке.

Для исследования созданной концепции разработано программное обеспечение на базе среды Unity, приведены результаты соответствующего моделирования, подтверждающие эффективность программы для апробации различных алгоритмов взаимодействия БПЛА группы с пунктами назначения и станциями подзарядки.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант «Исследование путей и методов оптимизации систем управления неоднородных робототехнических комплексов по критерию энергоэффективности», № 22-29-00370.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Косова А.Е., Корилов А.М. Автоматическая посадка малых беспилотных летательных аппаратов с использованием компьютерного зрения // Доклады ТУСУР. – Вып. № 3. – Т. 20. – С. 191-196.
2. Нго К.Т., Нгуен В.В., Харьков И.Ю., Усина Е.Е., Шумская О.О. Функциональная модель взаимодействия БЛА с наземной роботизированной платформой при решении сельскохозяйственных задач // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – Вып. 6-3. – С. 41-50.
3. Musa Galimov, Roman Fedorenko, and Alexander Klimchik. UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. – https://www.researchgate.net/publication/342538741_UAV_Positioning_Mechanisms_in_Landing_Stations_Classification_and_Engineering_Design_Review.
4. Габдуллин Айдар Ринатович, Галимов Муса Музагитович, Климчик Александр Сергеевич. Посадочная платформа для беспилотного летательного аппарата / Патент № RU 2710887 C1, 2020 г.
5. Габдуллин Айдар Ринатович, Галимов Муса Музагитович, Климчик Александр Сергеевич. Посадочная платформа для БПЛА вертикального взлета и посадки / патент RU 2722249 C1, 2020 г.
6. HEISHA DNEST2 // Heisha Technology. 23.03.2022. – URL: <https://www.heishatech.com/solutions/dnest-hardware-for-drone-in-a-box-solution/> (дата обращения: 23.03.2022).
7. Патент US9387928B1 «MULTI-USE UAV DOCKING STATION SYSTEMS AND METHODS». Jul. 12, 2016.
8. Патент US 9,139,310 B1 «SYSTEMS AND METHODS FOR UAV BATTERY EXCHANGE». Sep. 22, 2015.
9. Патент WO 2016/113766 «AI ELECTRICALLY CHARGING SYSTEM FOR DRONES». 7 January 2016 (07.01.2016).
10. Фетисов В.С., Ахмеров Ш.Р., Сизоненко Р.В. Интеллектуальная коммутация бортовых посадочных электродов БПЛА с открытыми контактными площадками зарядной платформы // Второй Всероссийский научно-практический семинар «беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта». – 2015. – С. 115-122.
11. Широков И.Б., Широкова Е.И., Азаров Андрей Андреевич. Система беспроводной передачи энергии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 380-389.
12. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pavlenko D.D., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K. Investigation of a rotor speed controlling of a promising wind-driven power plant using several variable elements of its geometry // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 10. – С.599-608. – DOI: 10.17587/mau.21.599-608.

13. Горелов Д.Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 3. – С. 325-333.
14. Михненко Л.В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа // Научный вестник МГТУ. – 2008. – № 125. – С. 22-24.
15. Ying P., Chen Y.K., Xu Y.G., Tian Y. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine // *Applied Energy*. – Vol. 146. – P. 74-83.
16. Wenyi Liu. Design and kinetic analysis of wind turbine blade-hub-tower coupled system // *Renewable Energy*. – August 2016. – Vol. 94. – P. 547-557.
17. Vikas Hassija, Vinay Chamola, Dara Nanda Gopala Krishna and Mohsen Guizani. A Distributed Framework for Energy Trading Between UAVs and Charging Stations for Critical Applications», *Fellow IEEE*, 2020.
18. Li Li, Jie Wu, Yixiang Xu, Jun Che, Jin Liang. Energy-controlled Optimization Algorithm for Rechargeable Unmanned Aerial Vehicle Network // 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – 2017. – Vol. 43. – P. 1337-1342.
19. Костюков В.А., Пишихонов В.Х. The system of decentralized control of a group of mobile robotic means interacting with charging stations // Сб. трудов "Frontiers in Robotics and Electromechanics". – Изд-во Springer, 2022 (принято к публикации).
20. Нараянан Рагху (Raghu Nuraayan). Выбор катушек для беспроводных зарядных устройств // Компоненты и технологии. – 2015. – № 9.

REFERENCES

1. Kosova A.E., Korikov A.M. Avtomaticheskaya posadka mal'kh bespilotnykh letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem komp'yuternogo zreniya [Automatic landing of small unmanned aerial vehicles using computer vision], *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], Issue No. 3, Vol. 20, pp. 191-196.
2. Ngo K.T., Nguen V.V., Khar'kov I.Yu., Usina E.E., Shumskaya O.O. Funktsional'naya model' vzaimodeystviya BLA s nazemnoy robotizirovannoy platformoy pri reshenii sel'skokhozyaystvennykh zadach [A functional model of UAV interaction with a ground-based robotic platform in solving agricultural problems], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, Issue 6-3, pp. 41-50.
3. Musa Galimov, Roman Fedorenko, and Alexander Klimchik. UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. Available at: https://www.researchgate.net/publication/342538741_UAV_Positioning_Mechanisms_in_Landing_Stations_Classification_and_Engineering_Design_Review.
4. Gabdullin Aydar Rinatovich, Galimov Musa Muzagitovich, Klimchik Aleksandr Sergeevich. Posadochnaya platforma dlya bespilotnogo letatel'nogo apparata [Landing platform for unmanned aerial vehicle]. Patent No. RU 2710887 C1, 2020.
5. Gabdullin Aydar Rinatovich, Galimov Musa Muzagitovich, Klimchik Aleksandr Sergeevich. Posadochnaya platforma dlya BpLA vertikal'nogo vzleta i posadki [Landing platform for vertical take-off and landing UAVs], Patent RU 2722249 C1, 2020.
6. HEISHA DNEST2, *Heisha Technology*. 23.03.2022. Available at: <https://www.heishatech.com/solutions/dnest-hardware-for-drone-in-a-box-solution/> (accessed 23 March 2022).
7. Patent US9387928B1 «MULTI-USE UAV DOCKING STATION SYSTEMS AND METHODS». Jul. 12, 2016.
8. Patent US 9,139,310 B1 «SYSTEMS AND METHODS FOR UAV BATTERY EXCHANGE». Sep. 22, 2015.
9. Patent WO 2016/113766 «AI ELECTRICALLY CHARGING SYSTEM FOR DRONES». 7 January 2016 (07.01.2016).
10. Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R., Sizonenko R.V. Intellektual'naya kommutatsiya bortovykh posadochnykh elektrodov BpLA s otkrytymi kontaktnymi ploshchadkami zaryadnoy platformy [Intelligent switching of on-board landing electrodes of a UAV with open contact pads of a vertical platform], *Vtoroy Vserossiyskiy nauchno-prakticheskiy seminar «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta»* [The second All-Russian scientific and practical seminar "Unmanned transport vehicles with elements of artificial intelligence"], 2015, pp. 115-122.

11. Shirokov I.B., Shirokova E.I., Azarov Andrey Andreevich. Sistema besprovodnoy peredachi energii [Wireless energy transmission system], *Infokommunikatsionnye i radioelektronnye tekhnologii* [Infocommunication and radioelectronic technologies], 2019, Vol. 2, No. 3, pp. 380-389.
12. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pavlenko D.D., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K. Investigation of a rotor speed controlling of a promising wind-driven power plant using several variable elements of its geometry, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, Vol. 21, No. 10, pp. 599-608. DOI: 10.17587/mau.21.599-608.
13. Gorelov D.N. Energeticheskie kharakteristiki rotora Dar'e (obzor) [Energy characteristics of the Darye rotor (review)], *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and aeromechanics], 2010, Vol. 17, No. 3, pp. 325-333.
14. Mikhnenkov L.V. Vetroenergeticheskaya ustanovka planetarnogo tipa [Wind power plant of planetary type], *Nauchnyy vestnik MGTU* [Scientific Bulletin of MSTU], 2008, No. 125, pp. 22-24.
15. Ying P., Chen Y.K., Xu Y.G., Tian Y. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine, *Applied Energy*, Vol. 146, pp. 74-83.
16. Wenyi Liu. Design and kinetic analysis of wind turbine blade-hub-tower coupled system, *Renewable Energy*, August 2016, Vol. 94, pp. 547-557.
17. Vikas Hassija, Vinay Chamola, Dara Nanda Gopala Krishna and Mohsen Guizani. A Distributed Framework for Energy Trading Between UAVs and Charging Stations for Critical Applications», *Fellow IEEE*, 2020.
18. Li Li, Jie Wu, Yixiang Xu, Jun Che, Jin Liang. Energy-controlled Optimization Algorithm for Rechargeable Unmanned Aerial Vehicle Network, *2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2017, Vol. 43, pp. 1337-1342.
19. Kostyukov V.A., Pshikhopov V.Kh. The system of decentralized control of a group of mobile robotic means interacting with charging stations, *Sb. trudov "Frontiers in Robotics and Electromechanics"* [Collection of works "Frontiers in Robotics and Electromechanics"]. Izd-vo Springer, 2022 (accepted for publication).
20. Narayanan Ragkhu (Raghu Nurayanan). Vybory katushek dlya besprovodnykh zaryadnykh ustroystv [Selection of coils for wireless chargers], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2015, No. 9.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.А. Агеев.

Медведев Михаил Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371694; кафедра ЭиМ, НИИ РИПУ; д.т.н.; профессор; с.н.с.

Костюков Владимир Александрович – e-mail: vakostukov@sfedu.ru; тел.: +79054787016; кафедра ЭиМ, НИИ РИПУ; к.т.н.; доцент; м.н.с.

Бутенко Максим Юрьевич – НИИ РИПУ; e-mail: butenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; инженер.

Гисцов Владислав Геннадьевич – e-mail: giscov@sfedu.ru; тел.: +79515057398; техник.

Евдокимов Игорь Дмитриевич – e-mail: ievdokimov@sfedu.ru; тел.: +79182235832; техник.

Medvedev Mikhail Yurievich – Southern Federal University; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694, the department of E&M; Research Institute of RiPU; dr. of eng. sc.; professor; senior researcher.

Kostyukov Vladimir Alexandrovich – e-mail: vakostukov@sfedu.ru; phone: +79054787016; the department of E&M, Research Institute of RiPU; cand. of eng. sc.; associate professor; junior researcher.

Butenko Maxim Yurievich – Research Institute of RiPU; e-mail: butenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; engineer.

Gistsov Vladislav Gennadievich – e-mail: giscov@sfedu.ru; phone: +79515057398; technician.

Evdokimov Igor Dmitrievich – e-mail: ievdokimov@sfedu.ru; phone: +79182235832; technician.

А.В. Проскуряков**КОНЦЕПЦИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ОСНОВЕ
ВЕРИФИКАЦИИ ФРАГМЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ**

Предложен один из вариантов концепции разработки и реализации синтеза МИС с позиции системного подхода, которая предназначена для решения задач диагностики заболеваний посредством применения и разработке методологии верификации состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям и использовании для этого статистических параметров (математическое ожидание, дисперсия, гистограмма, коэффициент вариации, автокорреляционная матрица, коэффициент корреляции) для количественной оценки состояний лобной или верхнечелюстной пазухи при отоларингологических заболеваниях, органов грудной клетки при бронхолегочных заболеваниях, костных тканей и их идентификации в соответствии с классом патологий при диагностике пациента в автоматическом режиме по рентгенографическим (томографическим) изображениям. Предложен вариант реализации МИС для диагностики и оценки результатов медицинских исследований, построенная по модульному принципу на базе технологий сетей Intranet и Internet с использованием стандартных протоколов передачи данных, аудио-видео информации, графической информации медицинского характера и включающая подсистему технического обеспечения, подсистему математического обеспечения, подсистему программного обеспечения, подсистему информационного обеспечения, подсистему организационного обеспечения, подсистему информационной безопасности, подсистему методического обеспечения и поддержки. Указано на современное состояние развития медицинской диагностической техники, оснащённость которой медицинских учреждений страны и не оперативная её доступность для населения способствовало и привело к появлению и активному развитию новых направлений в области лучевой диагностики, к которым относятся: цифровая и плёночная рентгенография, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография. Приведен краткий анализ реализации математических моделей методов диагностики, реализуемых программным обеспечением для функционирования подсистемы поддержки принятия решения медицинской автоматизированной информационной системы. Показаны примеры практической реализации программного и информационного обеспечения методов верификации медицинских объектов виде экранных форм для работы с фрагментами исследуемого объекта и результатами анализа рентгенографических изображений. Это позволяет повысить оперативность, точность верификации состояния медицинских биологических объектов, достоверность процесса диагностики заболеваний. Показана научная новизна, результаты апробации материала, представленного в статье на международных, всероссийских конференциях, научных журналах.

Биологический; верификация; безэталонный метод верификации; диагностика; информация; инвариантность; концепция; кроссплатформенный; медицинский; метод; метод эталонный; мобильность; модульность; подход; системный; статистика; рентгенография; томография; энтропия; эталон.

A.V. Proskuryakov**THE CONCEPT OF A MEDICAL INFORMATION SYSTEM FOR SOLVING
PROBLEMS OF DISEASE DIAGNOSIS BASED ON VERIFICATION
OF FRAGMENTS OF MEDICAL BIOLOGICAL OBJECTS**

This article offers one of the variants of the concept of developing and implementing the synthesis of MIS from the perspective of a systematic approach, which is designed to solve the problems of diagnosing diseases through the application and development of a methodology for verifying the state of fragments of biological objects using computed tomographic images and using statistical parameters for this (expectation, variance, histogram, coefficient of variation, autocorrelation matrix, correlation coef-

ficient) for quantitative assessment of the conditions of the frontal or maxillary sinus in otolaryngological diseases, chest organs in bronchopulmonary diseases, bone tissues and their identification in accordance with the class of pathologies in the diagnosis of the patient in automatic mode by radiographic (tomographic) images. A variant of the implementation of MIS for the diagnosis and evaluation of the results of medical research is proposed, built on a modular principle based on the technologies of Intranet and Internet networks using standard data transmission protocols, audio-video information, graphic information of a medical nature and including a subsystem of technical support, a subsystem of mathematical support, a subsystem of software, a subsystem of information support, a subsystem of organizational support, information security subsystem, subsystem of methodological support and support. It is pointed out the current state of development of medical diagnostic equipment, the equipment of which medical institutions of the country and its non-operational accessibility to the population contributed to and led to the emergence and active development of new directions in the field of radiation diagnostics, which include: digital and film radiography, computed tomography, magnetic resonance imaging. A brief analysis of the implementation of mathematical models of diagnostic methods implemented by software for the functioning of the decision support subsystem of the medical automated information system is given. Examples of practical implementation of software and information support for verification methods of medical objects in the form of screen forms for working with fragments of the object under study and the results of the analysis of radiographic images are shown. This makes it possible to increase the efficiency, accuracy of verification of the state of medical biological objects, the reliability of the disease diagnosis process. The scientific novelty, the results of the approbation of the material presented in the article at international, All-Russian conferences, scientific journals are shown.

Biological; verification; non-etalon verification method; diagnostics; information; invariance; concept; cross-platform; medical; method; reference method; mobility; modularity; approach; system; statistics; radiography; tomography; entropy; standard.

Введение. В данной статье рассматривается один из вариантов концепции разработки и реализации медицинской информационной системы (МИС), на примере реализации медицинской автоматизированной диагностической информационной системы (МАДИС) на базе системного подхода для решения задач диагностики заболеваний. Современный этап развития медицины характеризуется развитием и внедрением новых методов, способов диагностики, позволяющих повысить своевременность, точность и достоверность диагностических мероприятий в различных областях и направлениях медицины. Фактически в медицине всё большее значение получают методы, способы, средства ранней диагностики заболеваний, что позволяет выявить заболевание на ранних стадиях и тем самым предотвратить или приступить к её лечению на ранних этапах развития. Таким образом в современных условиях развития акцент делается на диагностические направления медицины, методы и способы ранней диагностики, а также медицинские автоматизированные диагностические информационные системы. Согласно основным положениям национального проекта «Здравоохранение», одно из ведущих мест в нём занимают вопросы развития и внедрения современных информационных технологий, рентгенологических высоких технологий, внедрение на их базе медицинских информационных систем (МИС), медицинских автоматизированных информационных систем (МАИС), медицинских автоматизированных диагностических информационных систем (МАДИС), диагностического оборудования, которое предназначено для решения проблемы повышения эффективности диагностики заболеваний путём своевременного выявления различных заболеваний и проведения **дифференциальной диагностики** [5–8]. Постановления правительства РФ, Указы президента РФ о совершенствовании системы медицинского обслуживания населения, о внедрении новой техники и технологий в сферу медицины наталкиваются на препятствия, связанные с недостаточным финансированием в связи с сокращением в бюджете статьи расходов на медицину, медобслуживание.

Решению задач повышения эффективности диагностики заболеваний путём своевременного выявления различных заболеваний и проведения **дифференциальной диагностики** мешают следующие проблемы.

Статья расходов госбюджета на медицину в 2017 году была сокращена с 0,7% в 2016 году до 0,4% ВВП и эта тенденция продолжает сохраняться и в 2022 году, когда бюджет предполагает **сокращение расходов на здравоохранение – с 1,362 трлн рублей в 2021 году до 1,245 трлн рублей в 2022, или на 117 млрд рублей.**

В результате огромное количество медучреждений в средних, малых городах и сельской местности могут остаться неохваченными передовыми технологиями в области диагностики и лечения заболеваний.

Значительное превышение импорта по отношению к экспорту медицинского оборудования и медицинских изделий, то есть большая импортозависимость в данной области, что отражает диаграмма, показанная на рис. 1.

Выходом в создавшейся ситуации является, разработка средств и методов диагностики и лечения на базе передовых технологий с повсеместным внедрением МИС, МАИС, МАДИС на базе комплекса технических средств (КТС) вычислительной техники (ВТ), комплекса программных средств (КПС) системных и инструментальных, сетевых технологий и вычислительных сетей, новых информационных технологий в целом, позволяющих своевременно, оперативно осуществлять диагностику, лечение, сопровождение пациентов в клиниках и стационарах.

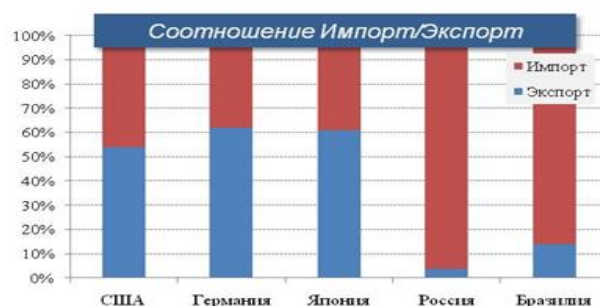


Рис. 1. Соотношение экспорта и импорта медицинского оборудования и медицинских изделий

В настоящее время в процессе решения задач диагностики заболеваний широко используются снимки, изображения фрагментов биологических объектов и объектов в целом, что позволяет повысить наглядность и объективность при решении данного класса задач. Сегодня на смену аналоговым приходят цифровые медицинские изображения. Перевод в цифровую форму (с самого начала их получения или позже) облегчает обработку изображений, хранение и передачу медицинских визуальных данных. Эти возможности значительно расширились с появлением автоматизированных рабочих мест (АРМ) с большим объёмом памяти для хранения данных и достаточной вычислительной мощностью. Существующие информационные технологии могут помочь на всех этапах получения и обработки медицинских изображений [1–4]. Компьютеры непосредственно принимают участие в создании некоторых типов изображений, которые не могут быть получены другим способом: компьютерная томография (КТ), позитронная эмиссионная томография (ПЭТ), ядерный магнитный резонанс – магнитно-резонансная томография (МРТ).

Постановка задачи. Для повышения эффективности медицинского обслуживания необходимо широко внедрять в практику работы медицинских учреждений: поликлиник, клиник, стационаров, больниц современные МИС (МАИС и

МАДИС). При рассмотрении концептуального подхода к проектированию и построению современных МИС, МАИС и МАДИС необходимо исходить из следующих базовых понятий:

- ◆ цели внедрения современных автоматизированных информационных систем;
- ◆ причины, способствующие внедрению современных автоматизированных информационных систем;
- ◆ причины, обуславливающие необходимость внедрения современных автоматизированных информационных систем;
- ◆ задачи, решаемые современными автоматизированными информационными системами;
- ◆ требования, которым должны удовлетворять современные автоматизированные информационные системы.

Необходимо синтезировать медицинскую информационную систему как разновидность автоматизированной информационной системы для верификации фрагментов медицинских биологических объектов с целью решения задач диагностики заболеваний, с использованием математических моделей, информационных моделей описания состояния диагностируемых медицинских биологических объектов, алгоритмов и программного обеспечения инвариантных к видам заболеваний на базе методов концептуального и системного проектирования.

В данной работе акцент сделан на рассмотрение и описание одного из вариантов концепции разработки и реализации медицинской информационной системы (МИС), на примере реализации медицинской автоматизированной диагностической информационной системы (МАДИС) на базе системного подхода для решения задач диагностики заболеваний путём использования методов верификации состояния медицинских биологических объектов.

Реализация. Цели внедрения. Основными целями внедрения современных медицинских автоматизированных информационных систем являются:

- ◆ сохранение здоровья человека путём повышения эффективности и управляемости лечебно-диагностического процесса, рационализации использования средств, улучшения качества оказания медицинской помощи;
- ◆ повышение эффективности организации труда медицинских работников;
- ◆ внедрение новых технологий, в том числе новых информационных технологий [5].

Реализация. Причины, обуславливающие необходимость внедрения медицинских автоматизированных информационных систем. Основными причинами, обуславливающие необходимость внедрения медицинских автоматизированных информационных систем являются:

- ◆ врачи делают огромное количество записей о ходе лечебного процесса и оформляют учётную и отчётную документацию;
- ◆ средний медицинский персонал ежедневно разбирается в записях и назначениях лечащего врача, фактически вести «вторую бухгалтерию» по выполнению необходимых лечебных назначений;
- ◆ взаимодействие между лечащим врачом и другими специалистами часто осуществляется на уровне пожеланий;
- ◆ врач-диагност из-за недостатка времени ограничивается при заполнении истории болезни краткими записями-заключениями;
- ◆ контроль лечения заболевания осуществляется в ретроспективном плане, так как значительная доля ошибок при обследовании больного пациента, установлении окончательного диагноза, а также в процессе лечения часто осуществляется только при его выписке[5].

Реализация. Подходы при проектировании. В работе [5] авторы указывают на следующие причины использования информационных технологий (ИТ):

- ◆ наглядность при изучении и освоении ИТ (современное ПО позволяет более наглядно представлять различную медицинскую информацию, что способствует её более детальному анализу врачами);
- ◆ интерактивность (взаимная связь в диалоговом режиме);
- ◆ мультимедийные возможности (уникальные возможности: видеозаписи исследований, звук, качественные снимки, двух- и трёхмерные модели органов человека, построенных на основании данных диагностики);
- ◆ свободный поиск текста;
- ◆ групповая работа в многопользовательском режиме;
- ◆ достаточно доступная стоимость.

Для любой автоматизированной информационной системы (АИС), в том числе МИС, можно выделить три основных этапа жизненного цикла (ЖЦ) системы:

- ◆ первый этап – этап проектирования(разработки);
- ◆ второй этап – этап ввода в эксплуатацию системы;
- ◆ третий этап – эксплуатации системы;
- ◆ четвёртый этап – этап вывода системы из эксплуатации.

Одним из самых критических этапов ЖЦ МАИС является этап проектирования. Ошибки заложенные на этом этапе будут проявляться на всех последующих этапах ЖЦ МИС и определять уровень качества её работы в целом. На этапе проектирования должны быть заложены основные характеристики и показатели интегрального критерия качества функционирования МИС.

Для этого при проектировании должны быть чётко обозначены функциональная и обеспечивающая составляющие проектируемой МИС.

Синтезируемая МИС, обеспечивающая получение, хранение, обработку, выдачу диагностической информации должна:

- ◆ включать в свой состав автоматизированные рабочие места (АРМ) врачей клиницистов;
- ◆ строиться по принципу интеграции отдельных подсистем в единую целую систему;
- ◆ каждая подсистема удовлетворять модульному принципу построения, развития и подключения – интеграции в систему на уровне комплекса технических средств (КТС);
- ◆ удовлетворять модульному принципу построения на уровне комплекса программных средств (КПС);
- ◆ поддерживать управление и работу сервисных служб системы;
- ◆ в качестве инфраструктуры построения данной системы использовать сети, вычислительные сети Intranet / Internet, позволяющие осуществлять оперативный обмен информацией между основными компонентами системы, независимо от местоположения пациента и диагностической аппаратуры;
- ◆ формировать и выдавать оперативные и достоверные результаты диагностики.

Обеспечивающая составляющая должна в обязательном порядке включать следующие подсистемы:

- ◆ подсистему технического обеспечения, включающую базовые компоненты комплекса технических средств (КТС) системы, в том числе локальной вычислительной сети (ЛВС) типа Intranet медицинского учреждения: больница, поликлиника с возможностью подключения к информационно - медицинским ресурсам других медицинских учреждений посредством Internet;

- ♦ подсистему математического обеспечения, описывающую алгоритм процедуры диагностики на основании предложенных методов и методик;
- ♦ подсистему программного обеспечения, реализующую практически алгоритм процедуры диагностики на основании предложенных методов;
- ♦ подсистему информационного обеспечения, содержащего необходимую исходную информацию для диагностики заболеваний и статистическую информацию о результатах диагностики, личная информация, дневник пациента и т.д.;
- ♦ подсистему организационного обеспечения;
- ♦ подсистему информационной безопасности;
- ♦ подсистему методического обеспечения и поддержки, а также другие вспомогательные подсистемы [4].

МИС в целом и её подсистемы на базе предлагаемой концепции должны строиться исходя из основных требований системного подхода, предъявляемых к системам данного вида.

- ♦ удовлетворять требованиям кроссплатформенности;
- ♦ удовлетворять требованиям инвариантности к решаемым системой задачам (по возможности);
- ♦ удовлетворять требованиям модульности построения комплекса технических средств (КТС);
- ♦ удовлетворять требованиям модульности построения комплекса программных средств (КПС);
- ♦ иметь возможность интегрировать систему в современные вычислительные сети Intranet/Internet на уровне отдельных компонентов, модулей, подсистем и системы в целом;
- ♦ иметь возможность оперативного доступа к информационным ресурсам МИС со стационарных и мобильных рабочих станций, терминалов и других современных терминальных средств доступа;
- ♦ иметь реализацию адаптивного к пользователю МИС интуитивно-понятного интерфейса, позволяющего пользователям упростить процедуру доступа к информационно-вычислительным ресурсам системы и сделать её более прозрачной;
- ♦ в целом основные функциональные возможности МИС должны удовлетворять требованиям базового критерия качества, включающего функциональные и конструктивные критерии, на основании базовых характеристик и показателей, по которым оценивается качество функционирования КПС и системы в целом: гибкость, модульность, надежность, тестируемость, полнота, способность к взаимодействию, модифицируемость и т.д.

Реализация. Подсистема технического обеспечения. Структура системы поддержки принятия как подсистемы МИС. Структурная схема системы поддержки принятия как подсистемы МИС, подсистемы технического с возможностью подключения АРМ МИС показана на рис. 2. Успешное внедрение и эксплуатация предлагаемого АРМ по диагностированию например параназальных пазух пациента на основе анализа рентгенограммы в первую очередь зависит от телекоммуникационной системы, развернутой в клинике, а конкретно в ЛОР - отделении, в котором он является терминалом или рабочей станцией сети. Необходимо соблюдать требование стандартизации единства информационного пространства на уровне ЛОР - отделения в процессе применения АРМ как рабочей станции, так как несоблюдение данного требования приведёт к потере всякого смысла использования подобной системы, следовательно необходимо сформулировать постановку задачи комплексирования телекоммуникационной сети клиники [2, 7].

Реализация. Подсистема математического обеспечения. Краткое описание методов, используемых для диагностики

1. Метод сравнения с эталоном, основанный на математической статистике. Область исследуемого объекта и его эталон представляем матрицами интенсивности яркости пикселей.

В качестве эталона выбираем такой фрагмент снимка, на котором имеет место постоянное значение интенсивности яркости, в работе в качестве эталона было принято изображение глазницы. Таким образом, представив лобную пазуху и глазницу в виде матриц X и Y , размерами $n \times n$, можно приступить к их математической обработке. Основные этапы алгоритма эталонного способа метода диагностики могут быть представлены следующим образом.

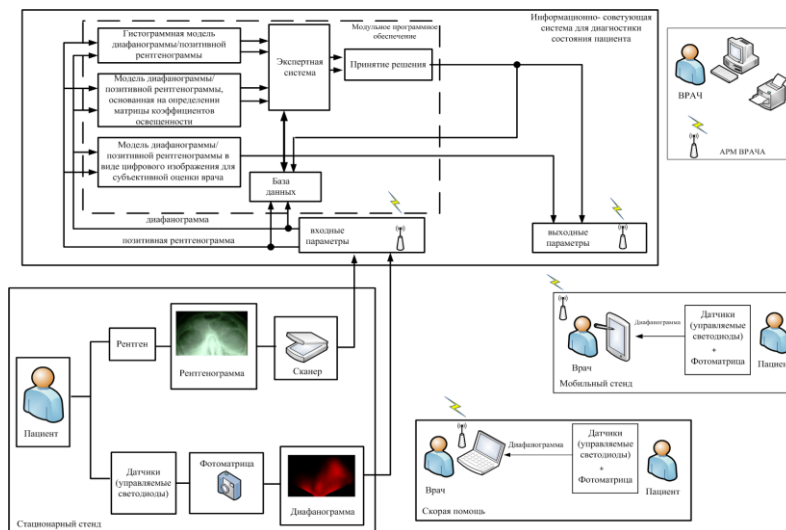


Рис. 2. Подсистема технического обеспечения. Структура системы поддержки принятия как подсистемы МИС

Недостатком эталонного способа при автоматической диагностике рентгенографического изображения является качество изображения такого выбранного фрагмента снимка, на котором имеет место постоянное значение интенсивности яркости. Данная погрешность может привести к существенному искажению качества результата обработки снимка и тем самым к неточному или неправильному диагнозу заболевания пациента, что может в некоторых случаях привести к неверному медикаментозному или хирургическому лечению [7–10, 12].

2. Метод, основанный на вычислении расстояния между изображениями эталона и исследуемой области. Область исследуемого объекта и его эталон представляем матрицами интенсивности яркости пикселей. Проведя анализ матрицы яркости эталона, получаем среднее значение яркости пикселей. Формируем вспомогательную матрицу относительно небольшого размера, в зависимости от размера исследуемой области.

Позиция, где коэффициент корреляции достигает своего наибольшего значения, является позицией наихудшего соответствия. Область вокруг позиции наихудшего соответствия, рассматривается как область с патологией, если отношение между средним значением вспомогательной матрицы и средним значением области наихудшего соответствия не превышает 0.85 [18, 19].

3. Метод, основанный на вычислении оценки информативности эталона и исследуемой области. Информативность рентгеновского изображения оценивается объемом полезной диагностической информации, которую врач получает при изучении снимка. В конечном итоге, она характеризуется различимостью на снимках деталей исследуемого объекта.

Область исследуемого объекта и его эталон представляем матрицами интенсивности яркости пикселей [18, 19].

4. Безэталонный метод (способ). Для реализации безэталонного способа при решении задачи анализа и обработки рентгенографического изображения определяем термин «изображение» как некий математический объект, обладающий определенными математическими свойствами. При проведении математических операций над изображением по аналогии с эталонным способом предполагаем, что оно существует в цифровой форме – «цифровое изображение», которое представляется дискретным массивом чисел, образующих матрицу элементов b_{ij} с параметрами (i, j) , где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq n$. Элементы b_{ij} являются квадратом (пикселем, апертурой), определяемым неравенством $i - 1 \leq x \leq i$ и $j - 1 \leq y \leq j$ (хиу – пространственные координаты непрерывного изображения). Тогда любой матрице $[b_{ij}]$ порядка $n \times n$ можно сопоставить изображение, значение яркости которого в квадрате b_{ij} равно постоянной величине $\bar{b}_{ij}$ для каждой пары (i, j) . Элемент цифрового изображения можно представить в виде случайной величины $\bar{b}(i, j)$, а матрицу $n \times n$ как матрицу случайных величин $[\bar{b}(i, j)]$.

Следовательно, используя средства и методы математической статистики и матричного счисления, можно описать все существенные свойства рентгенографических изображений и на основании данных свойств, с использованием соответствующих алгоритмов обработки, осуществить достоверную качественный анализ снимков с последующей диагностикой заболеваний. [2, 3, 6–9, 12, 16, 17].

5. Информационно-энтропийный метод (способ). Он основан на методе исчисления новой (непредсказуемой) и избыточной (предсказуемой) информации Клода Шеннона. При таком анализе мы рассчитываем показатель энтропии целевой области, рассчитываем максимальный показатель энтропии (исходя из количества уровней изображения), и, сравнивая полученные два значения, делаем вывод анализа (по принципу – чем больше энтропия, тем хуже). Данный подход также позволяет получить релевантный результат при условии хорошей ограниченности исследуемого объекта (исследуемый объект должен включать всю исследуемую область, и не включать ничего кроме этого) [8, 9].

Примеры практической реализации подсистемы программного и информационного обеспечения МИС на базе методов верификации медицинских объектов. Программное и информационное обеспечение МИС на базе методов верификации медицинских объектов реализует обработку рентгеновских и томографических снимков. Вся информация об оцифрованных рентгеновских снимках пациентов хранится в электронном виде в базе данных (БД).

Первоначально база данных не содержит никакой информации, поэтому для работы с программным обеспечением медицинской автоматизированной системы необходимо наполнить БД. То есть работа с системой начинается с процедуры наполнения БД информацией оцифрованных рентгеновских снимков пациентов.

После выбора пункта «Открыть из базы данных» из вкладки «Файл», появляется диалоговое окно «Поиск по базе пациентов».

Диалоговое окно «Поиск по базе пациентов» показано на рис. 3. В нем можно выбрать заранее обработанные снимки пациентов.

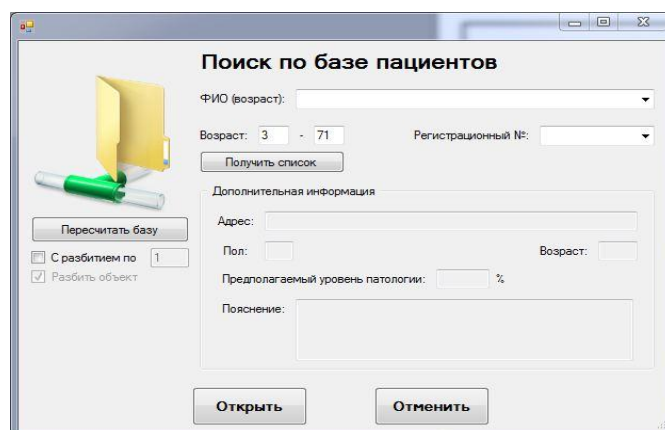


Рис. 3. Диалоговое окно «Поиск по базе пациентов»

Чтобы выбрать ранее обработанные снимки пациентов необходимо для этого ввести в поля «Возраст» возрастной интервал, в котором находится искомый пациент.

После этого поля «ФИО (возраст)» и «Регистрационный №» будут отображать информацию о пациентах только из выбранной возрастной категории. Диалоговое окно с пациентами выбранной возрастной категории показана на рис. 4.

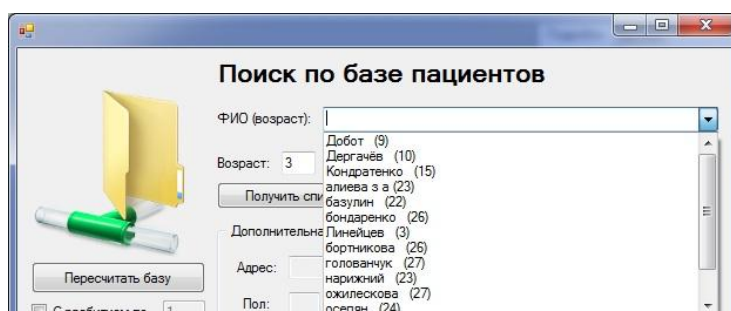


Рис. 4. Вкладка с пациентами из поля «ФИО (возраст)»

После выбора пациента в одном из вышеуказанных полей, в секции «Дополнительная информация» будут указаны дополнительные данные в соответствующих полях: «Адрес», «Пол», «Возраст», «Предполагаемый уровень патологии» и «Пояснение».

При выборе пациента в виде ссылки в поле «Ф.И.О.» происходит переход на страницу с подробной информацией и графиками объектов и эталонов данного пациента. Подробная информация с графиками объектов и эталонов конкретного обследуемого пациента показана на рис. 5.

Для сохранения нового или изменения уже существующего снимка во вкладке «Файл» выберите пункт «Сохранить в базу данных».

После появления диалогового окна «Форма базовой информации о пациенте» требуется заполнить или изменить основные поля: «Фамилия», «Имя», «Отчество», «Возраст», «Пол» и «Регистрационный №».

Экранная форма окна «Форма базовой информации о пациенте» показана на рис. 6.

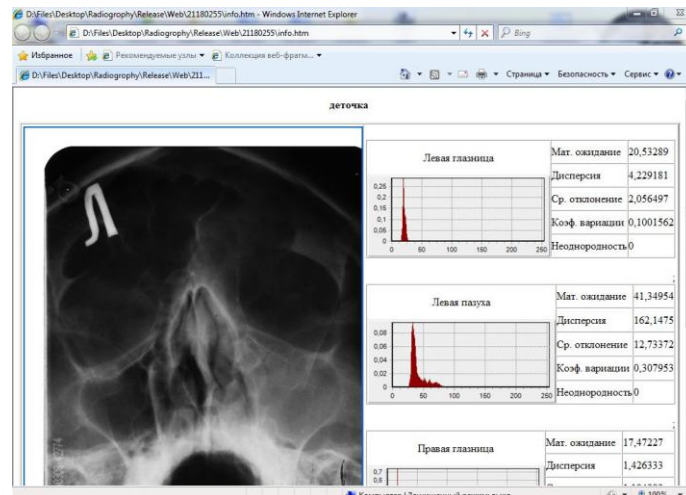


Рис. 5. Страница web-интерфейса с характеристиками пациента

The dialog box titled "Форма базовой информации о пациенте" contains the following fields and controls:

- Фамилия:
- Имя:
- Отчество:
- Адрес:
- Возраст:
- Пол:
- Регистрационный №:
- Дополнительная информация:
 - Предполагаемый уровень патологии: %
 - Пояснение:
- Buttons: Сохранить, Отменить

Рис. 6. Диалоговое окно «Форма базовой информации о пациенте»

Научная новизна. Результаты. Научная новизна заключается в том, что в данной статье предложен один из вариантов концепции разработки и реализации синтеза МИС с позиции системного подхода, который заключается в разработке методологии верификации состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям и использовании для этого статистических параметров (математическое ожидание, дисперсия, гистограмма, коэффициент вариации, автокорреляционная матрица, коэффициент корреляции) для количественной оценки состояний лобной или верхнечелюстной пазухи при отоларингологических заболеваниях, органов грудной клетки при бронхолегочных заболеваниях, костных тканей и их идентификации в соответствии с классом патологий при диагностике пациента в автоматическом режиме по рентгенографическим (томографическим) изображениям. Это позволило получить следующие результаты:

- ♦ предложен вариант реализации МИС для диагностики и оценки результатов медицинских исследований построенный по модульному принципу на базе технологий сетей Intranet и Internet с использованием стандартных протоколов передачи данных, аудио-видео информации, графической информации медицинского характера;

- ♦ разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм обработки рентгенографических изображений с использованием эталонного и безэталонного – информационно-энтропийного способов метода диагностики инвариантного к видам заболеваний (параназальных пазух при ЛОР – заболеваниях, бронхо-лёгочных заболеваниях);
- ♦ это позволило повысить качество обработки рентгенографических снимков и как следствие точность диагностики заболеваний;
- ♦ разработанное программное обеспечение позволило повысить степень автоматизации процесса обработки рентгенографических снимков с элементами автоматической обработки, что позволяет формализовать процедуру постановки диагноза;
- ♦ разработано программное обеспечение, реализующее алгоритмы обработки статистических параметров (гистограмма, математическое ожидание, коэффициент вариации) для количественной оценки состояний лобной или верхнечелюстной пазухи и их идентификации в соответствии с классом патологий при диагностике пациента в автоматическом режиме по рентгенографическим и томографическим изображениям;
- ♦ разработано информационное обеспечение – структура базы данных в виде набора связанных таблиц для хранения базовой информации о пациентах и процессе диагностики и лечения [18–20];
- ♦ информационное обеспечение реализовано с возможностью инвариантности хранимой информации и моделей методов (способов) диагностики с целью возможности адаптации для различных лечебных учреждений;
- ♦ система построена с позиций системного подхода, удовлетворяет требованиям гибкости, универсальности, инвариантности объектов исследования;
- ♦ результаты работы прошли апробацию на десяти международных и семнадцати Всероссийских научно-технических конференциях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блинов Н.Н., Мазуров А.И. Что впереди? // Мед. техника. – 2006. – № 5. – С. 3-6.
2. Блинов Н.Н., Мазуров А.И. Проблемы расширения диагностических возможностей медицинской рентгенотехники // Мед. техника. – 2011. – № 5. – С. 1-5.
3. Волков А.Г. Лобные пазухи. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2000. – 512 с.
4. Мухин Ю.Ю., Лебедев Г.С. Подходы к параметрической оценке и сопоставлению функций медицинских информационных систем // Информационно-измерительные системы. – 2013. – № 10. – С. 19-27.
5. Гусев А.В., Романов Ф.А., Дуданов И.П., Воронин А.В. Медицинские информационные системы: монография. – Петрозаводск: Петр.ГУ, 2005. – 404 с.
6. Рожкова Н.И., Кочетова Г.П. Динамика технической оснащённости диагностической службы Российской Федерации за 2002-2010 гг. // Мед. техника. – 2012. – № 2. – С. 1-5.
7. Волков А.Г., Самойленко А.П., Проскуряков А.В. Метод диагностики состояния параназальных пазух по их рентгенографическим изображениям // X Международную научно-техническую конференцию «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2012). – 2012. – С. 63-67.
8. Самойленко А.П., Проскуряков А.В. Способы реализации метода диагностики состояния параназальных пазух по их рентгенографическим изображениям // Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2014). – 2014. – С. 71-75.
9. Проскуряков А.В., Самойленко А.П. АРМ поддержки принятия решений при диагностике ЛОР-заболеваний медицинской интегрированной автоматизированной информационной диагностической системы // Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2014). – 2014. – С. 68-72.

10. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* Подсистема математического и программного обеспечения поддержки принятия решений на базе способов диагностики заболеваний по рентгеновским снимкам «Медицинской автоматизированной диагностической информационной системы» // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – № 1. – С. 34-43. – ISSN 1561-1531.
11. *Проскуряков А.В., Смеречинский Д.В.* Информационное обеспечение интегрированной автоматизированной системы обработки данных результатов обследования в медицинском учреждении // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – № 2. – С. 30-39. – ISSN 1561-1531.
12. *Проскуряков А.В.* Реализация способов диагностики заболеваний в медицинской автоматизированной информационной системе поддержки принятия решений. // Сб. трудов XII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2016). – Владимир, Суздаль, 2016. – С. 303-307.
13. *Тарасов Н.В., Проскуряков А.В.* Реализация алгоритма информационно-энтропийного анализа медицинских рентгенографических и томографических снимков // Матер. IV Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности» (ФПАКТИБ'2018). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2018. – С. 461-465.
14. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* Формирование статистического образа для распознавания состояния репаративного процесса костных тканей // Сб. трудов XIII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2018). – Владимир, Суздаль, 2018. – С. 205-209.
15. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* Методология верификации состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям // Сб. трудов XIII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2018). – Владимир, Суздаль, 2018. – С. 209-212.
16. *Проскуряков А.В., Самойленко А.П.* Метод построения статистических портретов при реализации безэталонного способа обработки и анализа медицинских рентгенографических и томографических снимков // Сб. материалов XVI Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, системный анализ и управление» (ИТСАиУ-2018). – Ростов-на-Дону, Таганрог, 2018. – С. 207-213.
17. *Проскуряков А.В.* Реализация безэталонного способа обработки медицинских рентгенографических и томографических снимков для диагностики заболеваний // Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко «КомТех-2019». – Ростов-на-Дону, Таганрог, 2019. – С. 156-164.
18. *Проскуряков А.В.* Верификация состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям // Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко «КомТех-2019». – Ростов-на-Дону, Таганрог, 2019. – С. 169-175.
19. *Проскуряков А.В.* Синтез информационной системы верификации фрагментов биологических объектов для диагностики заболеваний на базе методов системно-концептуального подхода // Сб. материалов XVII Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, системный анализ и управление» (ИТСАиУ-2019). – Ростов-на-Дону, Таганрог, 2019. – С. 207-213.
20. *Проскуряков А.В.* Автоматизация процесса верификации состояния фрагментов биологических объектов подсистемой поддержки принятия решений для диагностики заболеваний // Информатизация и связь. – 2021. – № 8. – С. 85-90.

REFERENCES

1. *Blinov N.N., Mazurov A.I.* Chto vpered? [What's ahead?], *Med. tekhnika* [Honey. technic], 2006, No. 5, pp. 3-6.
2. *Blinov N.N., Mazurov A.I.* Problemy rasshireniya diagnosticheskikh vozmozhnostey meditsinskoy rentgenotekhniki [Problems of expanding diagnostic capabilities of medical X-ray equipment], *Med. tekhnika* [Honey. technic], 2011, No. 5, pp. 1-5
3. *Volkov A.G.* Lobnye pazukhi [Frontal sinuses]. Rostov-on-Don: Izd-vo «Feniks», 2000, 512 p.

4. Mukhin Yu.Yu., Lebedev G.S. Podkhody k parametricheskoy otsenke i sopostavleniyu funktsiy meditsinskikh informatsionnykh sistem [Approaches to parametric assessment and comparison of functions of medical information systems], *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy* [Information and measurement systems], 2013, No. 10, pp. 19-27.
5. Gusev A.V., Romanov F.A., Dudanov I.P., Voronin A.V. Meditsinskie informatsionnye sistemy: monografiya [Medical information systems: monograph]. Petrozavodsk: Petr.GU, 2005, 404 p.
6. Rozhkova N.I., Kochetova G.P. Dinamika tekhnicheskoy osnashchennosti diagnosticheskoy sluzhby Rossiyskoy Federatsii za 2002-2010 gg. [Dynamics of technical equipment of the diagnostic service of the Russian Federation for 2002-2010], *Med. tekhnika* [Honey. Technic], 2012, No. 2, pp. 1-5.
7. Volkov A.G., Samoylenko A.P., Proskuryakov A.V. Metod diagnostiki sostoyaniya paranazal'nykh pazukh po ikh rentgenograficheskim izobrazheniyam [Method of diagnosing the condition of paranasal sinuses by their radiographic images], *X Mezhdunarodnuyu nauchno-tekhnicheskuyu konferentsiyu «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2012)* [International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2012)], 2012, pp. 63-67.
8. Samoylenko A.P., Proskuryakov A.V. Sposoby realizatsii metoda diagnostiki sostoyaniya paranazal'nykh pazukh po ikh rentgenograficheskim izobrazheniyam [Methods of implementing the method of diagnosing the condition of paranasal sinuses by their radiographic images], *Sb. trudov XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2014)* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2014)], 2014, pp. 71-75.
9. Proskuryakov A.V., Samoylenko A.P. ARM podderzhki prinyatiya resheniy pri diagnostike LOR-zabolevaniy meditsinskoy integrirovannoy avtomatizirovannoy informatsionnoy diagnosticheskoy sistemy [Decision support ARM for the diagnosis of ENT diseases of the medical integrated automated information diagnostic system], *Sb. trudov XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2014)* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2014)], 2014, pp. 68-72.
10. Proskuryakov A.V., Samoylenko A.P. Podsystema matematicheskogo i programmnoy obespecheniya podderzhki prinyatiya resheniy na baze sposobov diagnostiki zabolevaniy po rentgenovskim snimkam «Meditsinskoy avtomatizirovannoy diagnosticheskoy informatsionnoy sistemy» [Subsystem of mathematical and software support for decision-making based on methods of diagnosis of diseases by X-rays "Medical automated diagnostic information system"], *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial automated control systems and controllers], 2015, No. 1, pp. 34-43. ISSN 1561-1531.
11. Proskuryakov A.V., Smerechinskiy D.V. Informatsionnoe obespechenie integrirovannoy avtomatizirovannoy sistemy obrabotki dannykh rezul'tatov obsledovaniya v meditsinskom uchrezhdenii [Information support of the integrated automated data processing system of examination results in a medical institution], *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial automated control systems and controllers], 2015, No. 2, pp. 30-39. ISSN 1561-1531.
12. Proskuryakov A.V. Realizatsiya sposobov diagnostiki zabolevaniy v meditsinskoy avtomatizirovannoy informatsionnoy sisteme podderzhki prinyatiya resheniy [Implementation of methods for diagnosing diseases in a medical automated decision support information system], *Sb. trudov XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2016)* [Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2016)]. Vladimir, Suzdal', 2016, pp. 303-307.
13. Tarasov N.V., Proskuryakov A.V. Realizatsiya algoritma informatsionno-entropiynogo analiza meditsinskikh rentgenograficheskikh i tomograficheskikh snimkov [Implementation of the algorithm of information-entropy analysis of medical radiographic and tomographic images], *Mater. IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti» (FPAKTIB'2018)* [Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference "Fundamental and Applied Aspects of Computer Technology and Information Security" (FPAKTIB'2018)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2018, pp. 461-465.

14. Proskuryakov A.V., Samoilenko A.P. Formirovanie statisticheskogo obraza dlya raspoznavaniya sostoyaniya reparativnogo protsessa kostnykh tkaney [Formation of a statistical image for recognition of the state of the reparative process of bone tissues], *Sb. trudov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2018)* [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2018)]. Vladimir, Suzdal', 2018, pp. 205-209.
15. Proskuryakov A.V., Samoilenko A.P. Metodologiya verifikatsii sostoyaniya fragmentov biologicheskikh ob"ektov po komp'yuterno-tomograficheskim izobrazheniyam [Methodology of verification of the state of fragments of biological objects by computer tomographic images], *Sb. trudov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii» (FREME'2018)* [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2018)]. Vladimir, Suzdal', 2018, pp. 209-212.
16. Proskuryakov A.V., Samoilenko A.P. Metod postroeniya statisticheskikh portretov pri realizatsii bezetalonnogo sposoba obrabotki i analiza meditsinskikh rentgenograficheskikh i tomograficheskikh snimkov [Method of constructing statistical portraits in the implementation of a non-etalon method of processing and analyzing medical radiographic and tomographic images], *Sb. materialov XVI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie» (ITSaiU-2018)* [Collection of materials of the XVI All-Russian Scientific Conference of Students, postgraduates and young scientists "Information technologies, system analysis and management" (ITSaiU-2018)]. Rostov-on-Don, Taganrog, 2018, pp. 207-213.
17. Proskuryakov A.V. Realizatsiya bezetalonnogo sposoba obrabotki meditsinskikh rentgenograficheskikh i tomograficheskikh snimkov dlya diagnostiki zabolevaniy [Implementation of a non-etalon method of processing medical radiographic and tomographic images for the diagnosis of diseases], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. Pyavchenko «KomTekh-2019»* [Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Piavchenko "Komtech-2019"]. Rostov-on-Don, Taganrog, 2019, pp. 156-164.
18. Proskuryakov A.V. Verifikatsiya sostoyaniya fragmentov biologicheskikh ob"ektov po komp'yuterno-tomograficheskim izobrazheniyam [Verification of the state of fragments of biological objects using computed tomographic images], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. Pyavchenko «KomTekh-2019»* [Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Piavchenko "Komtech-2019"]. Rostov-on-Don, Taganrog, 2019, pp. 169-175.
19. Proskuryakov A.V. Sintez informatsionnoy sistemy verifikatsii fragmentov meditsinskikh biologicheskikh ob"ektov dlya diagnostiki zabolevaniy na baze metodov sistemno-kontseptual'nogo podkhoda [Synthesis of the information system of verification of fragments of medical biological objects for the diagnosis of diseases based on the methods of the system-conceptual approach], *Sb. materialov XVII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie» (ITSaiU-2019)* [Collection of materials of the XVII All-Russian Scientific Conference of Students, postgraduates and young scientists "Information technologies, system analysis and management" (ITSaiU-2019)]. Rostov-on-Don, Taganrog, 2019, pp. 207-213.
20. Proskuryakov A.V. Avtomatizatsiya protsessa verifikatsii sostoyaniya fragmentov meditsinskikh biologicheskikh ob"ektov podsystemoy podderzhki prinyatiya resheniy dlya diagnostiki zabolevaniy [Automation of the process of verifying the state of fragments of medical biological objects by the subsystem of decision support for the diagnosis of diseases], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2021, No. 8, pp. 85-90.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Проскуряков Александр Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: avproskuryakov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371673; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; старший преподаватель.

Proskuryakov Alexander Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: avproskuryakov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371673; the department of mathematical support and computer application; senior lecturer.

Р.Н. Набиев, А.А. Абдуллаев, Г.И. Гараев, В.А. Аббасов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КОНВЕРТОПЛАНОВОГО ТИПА

В целях повышения эффективности и безопасности полетов проанализированы результаты исследований определения центра нагрузки, центровки и тяжести летательного аппарата на стадии проектирования и изготовления. Также проанализированы характеристики существующих методов и средств, и на примере беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа разработана методология определения центра тяжести летательного аппарата с применением известного метода «весы-масса». При определении веса спроектированного и разработанного беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа и расчете координат центра тяжести был проведен анализ среднеквадратичного отклонения и вероятной ошибки. Рассмотрены характеристики и возможности практического применения мобильных электронных весов в качестве основного средства измерения нагрузки беспилотного летательного аппарата в стационарных условиях, а также непосредственного взвешивания, позволяющего определить центр тяжести. Описан метод, разработанный для определения центра тяжести летательного аппарата с повышенной точностью, и представлена модель построения предложенной системы. Проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных с целью определению массы и центра тяжести беспилотного летательного аппарата. Для этого в соответствии с методикой плоскость лабораторного стола приводили в горизонтальное положение с уровнем и проверяли погрешности измерения цифровых измерительных весов по результатам измерения эталонной нагрузки. Измерения повторяли, меняя положение весов по часовой стрелке. По результатам измерений, поскольку центр тяжести летательного аппарата принимался по обеим осям по-разному, а промежуточная точка выпадала за пределы центральной оси (вправо или влево, вперед-назад), были проведены повторные измерения путем смещения нагрузки в соответствующем направлении для обеспечения центрирования во время измерений. По окончательным результатам были построены диаграммы центра тяжести на основе расчетных значений координат точек пересечения диагоналей и определены случайные значения наклона. На основании построенных диаграмм с помощью программы был получен итоговый график со среднеквадратической ошибкой отклонения летательного аппарата от оси симметрии, равной $\sigma = 0,047$ см.

Центр тяжести; вес; нагрузка; беспилотный летательный аппарат; конвертоплан; взвешивание.

R.N. Nabiyev, Q.I. Qarayev, A.A. Abdullayev, V.A. Abbasov

DETERMINATION OF THE CENTER OF GRAVITY OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE OF A TILTROTOR TYPE

The article analyzes research work in the direction of the correct location of the load center, centering and gravity of the aircraft at the design and manufacturing stage in order to improve the efficiency and safety of flights, as well as the characteristics of existing methods and means, and, using the example of a tiltrotor unmanned aerial vehicle, a methodology for using the known the "scale-graph" method, which is widely used in determining the center of gravity of an aircraft. When determining the mass of the tiltrotor-type unmanned aerial vehicle designed and developed by us and calculating the coordinates of the center of gravity, an analysis of the standard deviation and probable error was carried out. The characteristics and possibilities of practical application of mobile electronic scales as the main means of measuring the load of an unmanned aerial vehicle in stationary conditions, as well as direct weighing, which makes it possible to determine the center of gravity, are considered. A method developed for determining the center of gravity of an aircraft with increased accuracy is described, and a model for constructing the proposed system is presented. The results of theoretical and experimental studies carried out to determine

the mass and center of gravity of an unmanned aerial vehicle are analyzed. To do this, in accordance with the methodology, the plane of the laboratory table was brought to a horizontal position with a level gauge and the measurement errors of digital measuring scales were checked according to the results of measuring the reference load. The measurements were repeated by changing the position of the scales clockwise. According to the measurement results, since the center of gravity of the aircraft was taken differently on both axes, and the intermediate point fell outside the central axis (to the right or left, front to back), repeated measurements were taken by shifting the load in the appropriate direction to ensure centering during measurements. According to the final results, center of gravity diagrams were constructed based on the calculated values of the coordinates of the points of intersection of the diagonals and random slope values were determined. Based on the diagrams constructed using the program, the final graph was obtained with the root-mean-square error of the deviation of the aircraft from the axis of symmetry, equal to $\sigma=0.047$ sm.

Center of gravity; weight; loading, unmanned aerial vehicle; tiltrotor; weighing.

Введение. Вопрос точного определения массы и центра тяжести летательного аппарата (ЛА), а также разработки новых методов и технологий в этом направлении остается актуальным и по сей день. Известно, что координаты центра тяжести планеров можно определить заранее на основании справочников. Однако эти данные соответствуют ненагруженному состоянию и не отвечают последнему оснащению планера.

Центр тяжести (ЦТ) – это «воображаемая» точка, на которую в одинаковой мере влияет вес всех частей летательного аппарата, и в которой пересекаются оси вращения (x , y , z) планера летательного аппарата в трехмерном пространстве (рис. 1). При изменении груза ЛА (например, смена аккумулятора, установка камеры в передней части ЛА и пр.) меняется расположение ЦТ. На этапе изготовления ЦТ ЛА должен располагаться в спроектированном для этого месте. Этот процесс называется «центрированием» модели. Расположение ЦТ для разных ЛА индивидуально. Если для вновь разрабатываемого БПЛА используется готовая модель планера, то расположение ЦТ уже указано в руководстве по эксплуатации этой модели. Центровка ЛА существенно влияет на его стабильность и управляемость. Отклонение расположения ЦТ от предельно допустимого приводит к частичной или полной потере беспилотником своей управляемости [1–3].

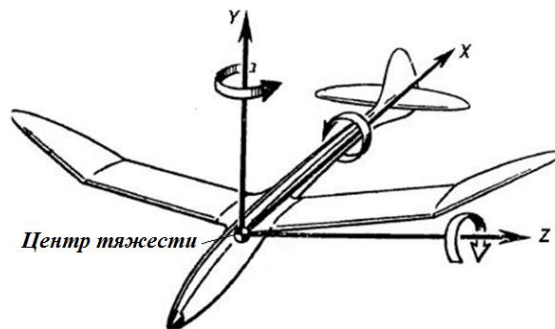


Рис. 1. Модель вращения планера по осям x , y , z , проходящих перпендикулярно центру тяжести ЛА

Существующие методы и средства, применяемые для определения нагрузки и ЦТ, расчета веса, а также подготовки данных центрирования ЛА, имеют ряд недостатков. В некоторых случаях в результате ошибочного анализа специалистами полученных параметров безопасность полетов снижается.

В нашей научно-исследовательской работе были представлены сведения о назначении ЦТ БПЛА «ARAN-04», разработанного на базе неподвижного «летающего крыла» «Skywalker X8 Flying Wing 2120mm», лежащего в основе БПЛА конвертопланового типа, путем смещения на 440 мм. назад и на 5 мм. взад-вперед в направлении центральной оси от передней части [4–8]. Эти значения верны при условии, что планер не комплектуется дополнительными деталями и установками.

Целью работы является определение координат реального ЦТ БПЛА «ARAN-04», разработанного на базе неподвижного «летающего крыла» «Skywalker X8 Flying Wing 2120mm» конвертопланового типа, в статическом режиме по осям x и z .

ЦТ является основным показателем, характеризующим точку центрирования и балансировки ЛА. Сила тяжести, действующая на ЛА со стороны ЦТ, является компенсирующей силой массы всех составляющих его элементов. Общий вес ЛА включает в себя вес планера, источника питания (*топливо или аккумуляторная батарея*), систем управления и движения, а также полезной нагрузки. Расположение ЦТ определяет сбалансированность, устойчивость и управляемость ЛА на земле и в воздухе, а самое главное – степень безопасности полета. Координаты ЦТ определяются следующими известными статическими уравнениями:

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\sum G_i x_i}{\sum G_i} & a) \\ y_c &= \frac{\sum G_i y_i}{\sum G_i} & b) \\ z_c &= \frac{\sum G_i z_i}{\sum G_i} & c) \end{aligned} \quad (1)$$

где G_i – вес отдельных частей (элементов, грузов) ЛА; x_i , y_i , z_i – координаты их центров тяжести [9]. Ось x совпадает с горизонтальной линией симметрии (также называемой линией симметрии конструкции или структуры) вдоль фюзеляжа (корпуса ЛА), ось y перпендикулярна оси x и направлена вверх, ось z перпендикулярна оси x и направлена в сторону правого крыла [10].

Известно, что центровка ЛА, определяемая как расстояние от ЦТ до начала средней аэродинамической хорды (САХ), определяется длиной этого расстояния, выраженной в процентах, и рассчитывается по следующей формуле (рис. 2):

$$x_{AM}(\%) = \frac{x_{AM}}{b_{OAX}} * 100, \quad (2)$$

где x_{AM} – расстояние от ЦТ до начала САХ; b_{OAX} – длина САХ. Если к ЛА массой « G » с центровкой x_{AM} добавить или снять груз весом ΔG на расстоянии l от центра тяжести, то точка приложения компенсирующей силы ΔG и G сместится на Δx в направлении изменения массы, в результате чего ЦТ ЛА приобретает новое местоположение [3]. В этом случае линейное смещение ЦТ может быть выражено %-ым значением САХ:

$$\Delta x = \frac{G * l}{(G \pm \Delta G) b_{OAX}} * 100. \quad (3)$$

Таким образом, x_{AM} рассчитывается по следующей формуле:

$$x_{AM \text{ yeni}} = x_{AM} \pm \Delta x. \quad (4)$$

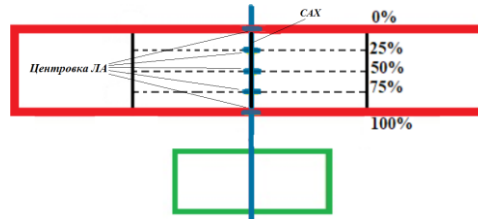


Рис. 2. Характеристика зависимости центровки ЛА от его САХ и ЦТ

На практике расчет центрирования выполняется графически по кривым центрирования для каждого типа и конфигурации ЛА [3]. Однако такие методы расчета недостаточно точны, так как в расчетах учитываются средние массы элементов и агрегатов.

Метод и средства определения ЦТ ЛА. В последние годы перегрузка сверх разрешенного значения, а также нарушение центровки как пилотируемых, так и беспилотных ЛА в гражданской, военной и экспериментальной авиации привело к увеличению числа летных инцидентов. В связи с этим особое внимание следует уделить разработке и применению передовых систем предполетного измерения веса и центровки ЛА [3, 11].

ЦТ следует определять с точностью не более 0,2-0,3% от общей длины ЛА по продольной оси. В противном случае во время полета может возникнуть ряд проблем, а если погрешность превысит 2% от длины ЛА, то это может также стать причиной крушения.

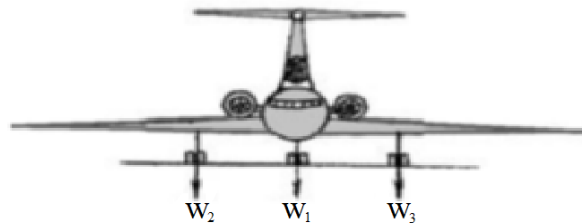


Рис. 3. Схема измерения веса ЛА и ЦТ

Для определения расположения ЦТ ЛА чаще всего используется экспериментальный метод [12], но графические, аналитические и графоаналитические методы также широко распространены.

На рис. 3 представлена схема определения общего веса с помощью системы весов, а также ЦТ посредством трех точек опоры.

В этом случае с помощью весов, расположенных под передним и задним шасси и используемых в качестве опоры, измеряется вес W_1 , W_2 , W_3 , приходящийся на каждое шасси, затем рассчитывается общий вес W ЛА, а затем ЦТ.

При использовании двух опорных точек для измерения массы расстояние ЦТ от переднего шасси рассчитывается по следующему выражению с учетом общей массы и состояния равновесия:

$$W_1 + W_2 = (M_a + M_b)g; W_1 a = W_2 b \rightarrow a = \frac{W_2 b}{W_1}. \quad (5)$$

Рассмотренные методы и средства имеют особенности, создающие ряд трудностей при практическом применении [3, 13].

Как известно, имеются многочисленные примеры электронных весов, а также мобильных электронных весов, разработанных на основе датчиков давления и тензодатчиков, позволяющих определять загрузку и центровку ЛА в стационарных условиях.

Анализ систем весов показывает, что их точность для контроля веса ЛА относительно невелика. По этой причине для определения ЦТ широко используются системы, способные измерять вес ЛА перед полетом, а также хранить, передавать и отображать информацию. Однако такие системы требуют установки в структуре ЛА специальных датчиков и радиопередатчиков [10–12].

Эти дополнительные аксессуары в конечном итоге увеличивают вес ЛА.

В последние годы ряд авторов уделяет особое внимание разработке новых методов и средств создания измерительных систем с более гибкими возможностями и характеристиками применения для определения веса ЛА.

Например, по сигналу датчика давления, установленного на цилиндре амортизатора каждого шасси, можно определить местонахождение ЦТ ЛА. При этом ЦТ ЛА рассчитывается на основе показателя ударной силы, создаваемой сжатым газом в цилиндрах, путем измерения его давления. Преимущество данного метода с точки зрения практического применения заключается в том, что измерение давления газа производится при неподвижном положении ЛА на земле, а расчет средних значений изменения давления газа в цилиндрах производится синхронно во всех амортизаторах шасси с интервалами времени в несколько десятков секунд [1, 3].



Рис. 4. Рабочее место, подготовленное в лаборатории с целью определения ЦТ БПЛА конвертопланового типа

В ходе исследований по определению степени загрузки и центра тяжести ЛА были проанализированы различные авиационные датчики, разработанные в этом направлении и описанные в [9–10]. В результате анализа было установлено, что наиболее предпочтительными являются потенциометрические и индукционные датчики марки ПС-250 и ИС-240. Эти датчики можно использовать для измерения веса ЛА с точностью не более 1%. Системы весов, разработанные на основе этих датчиков для ЛА, имеют относительно простую конструкцию и дают достоверную информацию с приводимой погрешностью не более 1% при температуре от минус 5°C до плюс 50°C.

Анализ возможностей и параметров новой бортовой системы весов, упомянутой и рассмотренной в [1–3], показывает, что все эти системы требуют специального вмешательства в конструкцию ЛА [9, 12–17] и рассчитаны на тяжеловесные ЛА. Центровку легких (например, менее 20 кг.) ЛА может выполнить методом «весы-график».

Методология измерений, проводимых с целью определения центра тяжести БПЛА конвертопланового типа

Инструменты

Лабораторный стол, измеритель балансировки, четыре весов, измеритель длины (*метр*).

Подготовка к работе

- ◆ Берутся 4 цифровых весов марки «B05» с однопроцентной точностью;
- ◆ Точность измерения весов определяется измерением веса эталонного груза;
- ◆ Берется лабораторный стол, и обеспечивается горизонтальность его поверхности. Для этого используется инструмент «уровнемер»;
- ◆ 4 опоры конвертоплана из углеродной трубки заменяются опорами из алюминиевой трубки, на концы которых на одном уровне закреплены упругие стальные пружины;
- ◆ Весы с измерительными поверхностями на одном уровне располагают на столе таким образом, чтобы при размещении БПЛА на весах каждая его опора приходилась на середину измерительных поверхностей весов;
- ◆ Проверяется полная комплектность БПЛА, а также крепление его элементов и агрегатов.

Проведение эксперимента (рис. 4)

- ◆ БПЛА ставят на весы, разместив его опоры посередине измерительных поверхностей;
- ◆ Отмечают показания весов, размещенных под 1-ой и 3-ей опорами (m_1, m_3);
- ◆ Отмечают показания весов, размещенных под 2-ой и 4-ой опорами (m_2, m_4);
- ◆ Точки соединения опор БПЛА с рычагами (точки опоры): расстояние L между 1-ой с 3-ей и 2-ой с 4-ой опорами измеряют по диагонали измерителем длины: $L = a + b$ (рис. 5);
- ◆ По полученным экспериментальным значениям веса, координаты центра тяжести БПЛА по обеим осям рассчитывается по формуле (определяется место) [18–22]:

$$b = \frac{L \cdot m_1}{m_3 + m_1} \quad (6)$$

- ◆ При получении различных центров тяжести по обеим осям по правилу параллелограмма строится их промежуточная точка (ПТ);
- ◆ Если промежуточная точка попадает вправо или влево от центральной оси, то путем смещения грузов производят повторные измерения, и по исходной формуле расчеты производят заново;
- ◆ Измерения повторяются до тех пор, пока центр тяжести не окажется на центральной оси;
- ◆ Для проверки точности результатов измерений испытания повторялись 10–15 раз в различное время.

Результаты измерений. Согласно методологии, плоскость лабораторного стола с помощью уровня была приведена в горизонтальное положение, и были проведены погрешности измерения цифровых измерительных весов по результатам измерения груза массой 1 кг в качестве эталонного груза. Измерения повторялись 100 раз с поочередным изменением положения весов по часовой стрелке. По причине получения различных центров тяжести по обеим осям ЛА, и выпадения промежуточной точки за пределы центральной оси (вправо или влево, вперед-назад) по результатам измерений, были проведены повторные измерения путем смещения груза в соответствующем направлении для обеспечения центрирования при измерениях (*таблица 1*). По полученным окончательным результатам были построены схемы ЦТ в программе «AutoCAD-2020» по правилу параллелограмма на основе вычисленных значений координат точек пересечения диагоналей.

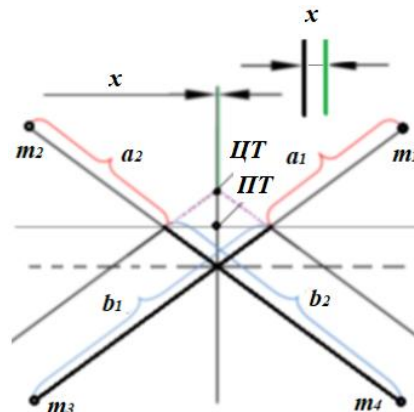


Рис. 5. Схема определения ЦТ БПЛА согласно экспериментальным значениям веса по правилу параллелограмма

На основании построенных диаграмм с помощью программы был получен итоговый график со среднеквадратической ошибкой отклонения ЛА от оси симметрии, равной $\sigma=0,047$ см (рис. 5).

Таблица 1

Параметры, полученные в результате экспериментальных измерений и отчетов на их основе

Номер исследования	I	II	III	IV	V	VI	VII	Σ
Параметры								
m_1 (г)	1887	1900	1900	1893	1897	1900	1896	1896
m_2 (г)	1897	1885	1885	1891	1887	1885	1889	1888
m_3 (г)	1081	1079	1080	1079	1081	1088	1081	1081
m_4 (г)	1094	1082	1082	1086	1083	1078	1085	1084
b_1 (см)	46.489	46.617	46.533	46.504	46.496	46.463	46.467	46.510
b_2 (см)	46.280	46.402	46.425	46.395	46.414	46.420	46.423	46.394
x_i (см)	0.137	0.173	0.087	0.087	0.066	0.035	0.035	0,00885
σ	0,047							

x_i – случайные значения наклона;

Σ – средние числовые значения величин

Вывод. Координаты ЦТ БПЛА конвертопланового типа были рассчитаны по осям, соединяющим точки опор по диагонали, на основании значений веса, измеренных с помощью электронных весов, размещенных под опорами. С помощью измеренных и рассчитанных значений ЦТ БПЛА был изображен графически в программе «AutoCAD-2020». По причине получения различных координат ЦТ по обеим осям для нахождения ЦТ была построена промежуточная точка по правилу параллелограмма. На основе проведенной оптимизации с использованием среднеквадратического смещения было установлено, что ошибка среднеквадратического отклонения промежуточной точки от центральной оси составляет: $\sigma=0,047$ см. Это свидетельствует о том, что составные элементы БПЛА были распределены с достаточно высокой точностью по весу при проектировании.

При проведении дополнительных инженерных или проектных работ на ЛА с установленным ЦТ целесообразно повторно измерить расстояние между опорами и приходящийся на опоры вес, а также пересчитать и уточнить координаты ЦТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пашиев А.М., Гасанов А.Р., Набиев Р.Н., Искендеров И.А.* Структурная модель системы бесконтактного определения веса и центра тяжести воздушных судов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – С. 156-167.
2. *Askerov C., Nabiyev R., İsgandarov İ.* Цифровой измеритель загруженности // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri. – 2002. – Vol. 2. – Səh. 104-111.
3. *Набиев Р.Н.* Анализ методов измерения загруженности и центровки летательных аппаратов в Аэропортах // Elmi Məcmuələr. – 2005. – Cild 7, № 1. Səh. 74-78.
4. *Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И.* Конструктивное оформление беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. – № 6. – С. 3-13. – DOI: 10.25791/aviakosmos. 6.2022. 1274.
5. *Nabiyev R.N., Abdullayev A.A.* Structural emplacement and layout of elements of the developed convertiplane type unmanned aerial vehicle // Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Concepts for the development of society's scientific potential. Prague, Czech Republic, 19-20.05.2022. – P. 325-330. – DOI: 10.51582/interconf. 19-20.05.2022.041.
6. *Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А.* Исследование основных аэродинамических параметров планера беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. – № 4. – С. 17-33. – DOI: 10.25791/aviakosmos. 4.2022.1274.
7. *Nabiyev R.N., Garayev G.I., Abdullayev A.A.* Conceptual functional design of hybrid energy source of unmanned convertiplane // IOP Conference Series: Conference Scopos. Materials Science and Engineering. – 2020. – 862. – 022043. – DOI: 10.1088/ 1757-899X/862/2/022043.
8. “Skywalker X8”. Assembly manual. – January 2013. – 35 p. – www.raygrauberger.com (дата обращения: 17.07.2022).
9. *Искендеров И.А.* Аналитико-имитационная модель системы бесконтактного определения массы и центра тяжести самолётов // Измерительная техника. – 2021. – № 12. – С. 35-41. – <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-35-41>.
10. *Пашиев А.М., Гасанов А.Р., Искендеров И.А., Агаев Э.А.* Способ бесконтактного определения степени загруженности и центровки воздушных судов / Патент-изобретение, İ2016 0003. Промышленная собственность. Офиц. бюлл. комит. по стандартиз., метрологии и патентам. Азербайджанская Республика. – 2016. – № 5. – С. 51. – URL: http://patent.copat.gov.az/_files/Ixtira_2016_05.pdf (дата обращения: 28.07.2022).
11. Руководство по центровке и загрузке самолетов ГА СССР. РЦЗ-83. Часть 1 и 2. – М., 1983. – 83 с. (168 с).
12. *Марченко Д.* Центровка воздушного судна: мировая практика, актуальные проблемы, перспективы развития. – URL: <http://www.ato.ru/content/centrovka-vozdushnogo-sudna-mirovaya-praktika-ktualnye-problemy-perspektivy-razvitiya>. – 2013 (дата обращения: 29.08.2022).
13. National Aerospace Laboratory NLR-TP-2007-153. Analysis of aircraft weight and balance related safety. – URL: <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/1149.pdf>. EASS, 12- 14.03. – 2007 (дата обращения: 09.09.2022).
14. *Nabiyev R.N., Abdullayev A.A.* Results of measurements carried out for the purpose of determining the center of gravity of a convertiplane-type UAV // Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Current issues and prospects for the Development of Scientific Research». Orleans, France. (October 19-20, 2022). Scientific Collection «InterConf+». – 2022. – No. 26 (129). – P. 197-202. – DOI: 10.51582/interconf.19-20.10.2022.021.
15. *Черепашук Г.А., Потыльчак А.П., Борзенкова А.В.* Повышение точности взвешивания и центровки летательных аппаратов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 1. – С. 66-72.

16. Aircraft Weight and Balance Handbook. FAA-H-8083-1A", 2007, Washington D.C. U.S. Government Printing Office. – P. 23. – URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-1.pdf (дата обращения: 30.08.2022).
17. Загорский В.А., Киселев Д.Ю., Санчатов В.И. Испытания воздушных судов: электрон. учеб пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – 75 с.
18. Реутов А.А., Аверченков В.И., Рытов М.Ю., Федоров В.П. Имитационное моделирование релейных систем регулирования скорости и конвейера // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2019. – № 2. – С. 76-90. – <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-2-76-90> (дата обращения: 17.07.2022).
19. Петров В.В., Шкавера К.Н. Исследование точности измерения расстояний лазерной рулеткой «DISTO PRO» фирмы «LEICA» // Записки Горного института. – 2004. – Т. 156. – С. 232-234.
20. Локтев Д.А. Методы и моделирование измерительной системы контроля объектов транспорта по их изображениям: дисс. ... д-ра тех. наук. – М.: МИИТ, 2020.
21. Osadchiy S., Tymoshenko G. Methods for determining the weight and the center of gravity of UAV // 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). – DOI: 10.1109/APUAVD.2017.8308794.
22. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И. Разработка концептуальной функциональной схемы беспилотного конвертоплана с гибридным источником энергии // Авиакосмическое приборостроение. – 2021. – № 5. – С. 03-18. – DOI: 10.25791/aviakosmos.5.2021.1217.

REFERENCES

1. Pashaev A.M., Gasanov A.R., Nabiev R.N., Iskenderov I.A. Strukturnaya model' sistemy beskontaktnogo opredeleniya vesa i tsentra tyazhesti vozdukhnykh sudov [Structural model of a system for contactless determination of the weight and center of gravity of aircraft], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, pp. 156-167.
2. Askerov C., Nabiyev R., İsgandarov İ. TSifrovoy izmeritel' zagruzhennosti [Digital load meter], *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri* [Scientific Works of the National Aviation Academy], 2002, Vol. 2, pp. 104-111.
3. Nabiev R.N. Analiz metodov izmereniya zagruzhennosti i tsentrovki letatel'nykh apparatov v Aeroportakh [Analysis of methods for measuring the workload and centering of aircraft at Airports], *Elmi Məcmualər* [Scientific Collections]. 2005, Vol. 7, No. 1, pp. 74-78.
4. Nabiev R.N., Abdullaev A.A., Garaev G.I. Konstruktivnoe oformlenie bespilotnogo letatel'nogo apparata konvertoplanovogo tipa [Constructive design of an unmanned aerial vehicle of a tiltrotor type], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2022, No. 6, pp. 3-13. DOI: 10.25791/aviakosmos. 6.2022. 1274.
5. Nabiyev R.N., Abdullaev A.A. Structural emplacement and layout of elements of the developed convertiplane type unmanned aerial vehicle, *Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Concepts for the development of society's scientific potential. Prague, Czech Republic, 19-20.05.2022*, pp. 325-330. DOI: 10.51582/interconf. 19-20.05.2022.041.
6. Nabiev R.N., Abdullaev A.A. Issledovanie osnovnykh aerodinamicheskikh parametrov planera bespilotnogo letatel'nogo apparata konvertoplanovogo tipa [Investigation of the main aerodynamic parameters of the airframe of an unmanned aerial vehicle of a tiltrotor type], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2022, No. 4, pp. 17-33. DOI: 10.25791/aviakosmos. 4.2022.1274.
7. Nabiyev R.N., Garayev G.I., Abdullaev A.A. Conceptual functional design of hybrid energy source of unmanned convertiplane, *IOP Conference Series: Conference Scopis. Materials Science and Engineering*, 2020, 862, 022043. DOI: 10.1088/ 1757-899X/862/2/022043.
8. "Skywalker X8". Assembly manual, January 2013, 35 p. Available at: www.raygraberger.com (accessed 17 July 2022).
9. Iskenderov I.A. Analitiko-imitatsionnaya model' sistemy beskontaktnogo opredeleniya massy i tsentra tyazhesti samoletov [Analytical and simulation model of a system for contactless determination of the mass and center of gravity of aircraft], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2021, No. 12, pp. 35-41. Available at: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-35-41>.

10. Pashaev A.M., Gasanov A.R., Iskenderov I.A., Agaev E.A. Sposob beskontaktnogo opredeleniya stepeni zagruzhennosti i tsentrovki vozdukhnykh sudov [A method for contactless determination of the degree of congestion and alignment of aircraft], Patent-invention, I2016 0003. Official Bulletin of the Committee on Standardization, Metrology and Patents. The Republic of Azerbaijan, 2016, No. 5, pp. 51. Available at: http://patent.copat.gov.az/files/Ixtira_2016_05.pdf (accessed 17 July 2022).
11. Rukovodstvo po tsentrovke i zagruzke samoletov GA SSSR. RTSZ-83 [Guidance on centering and loading aircraft of the USSR GA. RCZ-83]. Part' 1 and 2. Moscow, 1983, 83 p. (168 s).
12. Marchenko D. Tsentrovka vozdukhnoy sudna: mirovaya praktika, aktual'nye problemy, perspektivy razvitiya [Aircraft alignment: world practice, current problems, development prospects]. Available at: <http://www.ato.ru/content/centrovka-vozdukhnoy-sudna-mirovaya-praktika-aktualnye-problemy-perspektivy-razvitiya>, 2013 (accessed 29 August 2022).
13. National Aerospace Laboratory NLR-TP-2007-153. Analysis of aircraft weight and balance related safety. Available at: <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/1149.pdf>. EASS, 12- 14.03, 2007 (accessed 09 September 2022).
14. Nabiyeu R.N., Abdullayev A.A. Results of measurements carried out for the purpose of determining the center of gravity of a convertiplane-type UAV, *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Current issues and prospects for the Development of Scientific Research»*. Orleans, France. (October 19-20, 2022). Scientific Collection «InterConf+», 2022, No. 26 (129), pp. 197-202. DOI: 10.51582/interconf.19-20.10.2022.021.
15. Cherepashchuk G.A., Potyl'chak A.P., Borzenkova A.V. Povyshenie tochnosti vzveshivaniya i tsentrovki letatel'nykh apparatov [Improving the accuracy of weighing and centering of aircraft], *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace engineering and technology], 2014, No. 1, pp. 66-72.
16. Aircraft Weight and Balance Handbook. FAA-H-8083-1A", 2007, Washington D.C. U.S. Government Printing Office, pp. 23. Available at: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-1.pdf (accessed 30 August 2022).
17. Zagorskiy V.A., Kiselev D.Yu., Sanchutov V.I. Ispytaniya vozdukhnykh sudov: elektron. ucheb posobie [Aircraft testing: electron. textbook]. Samara: Izd-vo SGAU, 2014, 75 p.
18. Reutov A.A., Averchenkov V.I., Rytov M.Yu., Fedorov V.P. Imitatsionnoe modelirovanie releynykh sistem regulirovaniya skorosti i konveyera [Simulation of relay systems for speed control and conveyor], *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University], 2019, No. 2, pp. 76-90. Available at: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-2-76-90> (accessed 17 July 2022).
19. Petrov V.V., Shkavera K.N. Issledovanie tochnosti izmereniya rasstoyaniy lazernoy ruletkoy «DISTO PRO» firmy «LEICA» [The study of the accuracy of measuring distances with a laser tape measure "DISTO PRO" of the company "LEICA"], *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2004, Vol. 156, pp. 232-234.
20. Loktev D.A. Metody i modelirovanie izmeritel'noy sistemy kontrolya ob"ektov transporta po ikh izobrazheniyam: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Methods and modeling of the measuring system for monitoring transport objects by their images: dr. of eng. sc. diss.]. Moscow, 2020.
21. Osadchiy S., Tymoshenko G. Methods for determining the weight and the center of gravity of UAV, *2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. DOI: 10.1109/APUAVD. 2017.8308794.
22. Nabiev R.N., Abdullaev A.A., Garaev G.I. Razrabotka kontseptual'noy funktsional'noy skhemy bespilotnogo konvertoplana s gibridnym istochnikom energii [Development of a conceptual functional scheme of an unmanned tiltrotor with a hybrid energy source], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2021, No. 5, pp. 03-18. DOI: 10.25791/aviakosmos.5.2021.1217.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Х.Г. Асадов.

Набиев Расим Насиб оглу – Национальная академия авиации Азербайджана; e-mail: nabiyevrasim@gmail.com; г. Баку, Азербайджан; тел.: +994557547646; начальник отдела авиационной электроники; д.т.н.; профессор.

Абдуллаев Анар Ариф оглу – e-mail: anarcafarov09@mail.ru; тел.: +994777564875; докторант отдела авиационной электроники; к.ф.-м.н.

Гараев Гадир Исахан оглу – e-mail: qedir71@mail.ru; тел.: +994703218115; научный сотрудник отдела авиационной электроники; к.т.н.

Аббасов Вусал Араслы оглу – e-mail: vusal9820@gmail.com; тел.: +994707292258; младший научный сотрудник отдела авиационной электроники; аспирант.

Nabiyev Rasim Nasib – National Aviation Academy of Azerbaijan; e-mail: nabiyevrasim@gmail.com; Baku, Azerbaijan; phone: +994557547646; head of Aviation Electronics department; dr. of eng. sc.; professor.

Abdullayev Anar Arif – e-mail: anarcafarov09@mail.ru; phone: +994777564875; doctorate of Aviation Electronics department; cand. of phis.-math. sc.

Qarayev Qadir Isaxan – e-mail: qedir71@mail.ru; phone: +994703218115. scientific researcher employee of the Aviation Electronics department; cand. of eng. sc.

Abbasov Vusal Arasli – e-mail: vusal9820@gmail.com; phone: +994707292258; junior researcher of Aviation Electronics department; postgraduate student.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылки на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.