



№4-2021

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Распределенные вычислительные системы
- Интеллектуальные системы
- Системы поддержки принятия решений
- Анализ данных и обработка информации
- Автоматизация проектирования и сетевые технологии

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

№ 4 (221). 2021 г.

Тематический выпуск

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

Каляев И.А. (гл. редактор); Курейчик В.В. (зам. гл. редактора); Курейчик В.М. (зам. гл. редактора); Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.; Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.; Хашемипур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чередниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Курейчик В.В.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 23.11. 2021 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 23,5. Уч.-изд. л. – 19,7.

Заказ № 8235. 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, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

А.И. Каляев ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ДИСПЕТЧЕРОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО СОЦИОИНСПИРИРОВАННОГО ПОДХОДА	6
В.А. Литвиненко, С.А. Ховансков, В.С. Хованскова ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛОЖНОГО РЕЗУЛЬТАТА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ВЫПОЛНЯЕМЫХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМОЙ.....	21
Д.Ю. Кравченко, Ю.А. Кравченко, В.В. Марков, А.Э. Саак БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ДИСПЕТЧИРОВАНИЯ В ГРИД-СИСТЕМАХ	31

РАЗДЕЛ II. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Е.М. Герасименко, В.В. Стеценко ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА ТОНАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОЯЛЬНОСТИ ПОКУПАТЕЛЕЙ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ОСНОВАННАЯ НА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ.....	42
Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ	51
С.И. Клевцов ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	61
А.Г. Клово, А.А. Илюхин, Г.В. Куповых, И.А. Ляпунова ОБОБЩЕННЫЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ВНУТРЕННИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ.....	73

РАЗДЕЛ III. СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А.А. Левченко, В.В. Таратухин, Ю.А. Кравченко МЕТОД ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МОДЕЛЕЙ ТИПОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	88
Э.В. Кулиев, М.П. Кривенко, М.М. Семенова, С.В. Игнатьева ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДСИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ БИОЛОГИЧЕСКИ ПРАВДОПОДОБНЫХ АЛГОРИТМОВ САМООРГАНИЗАЦИИ	105
Д.В. Заруба, Э.В. Кулиев, Д.Ю. Запорожец, М.М. Семенова РАЗРАБОТКА БИОЭВРИСТИК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ NP-ТРУДНЫХ И NP-СЛОЖНЫХ КОМБИНАТОРНО-ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ГРАФАХ.....	117
А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых АЛГОРИТМ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРАВЛЕНИЙ В НЕСТОХАСТИЧЕСКИХ ПРИЧИННЫХ МОДЕЛЯХ В ОТСУТСТВИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ.....	128
Е.М. Герасименко, Е.В. Нужнов РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАХОЖДЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКА В ЗАДАЧАХ ЭВАКУАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ОПЕРАТОРОВ АГРЕГИРОВАНИЯ.....	145

РАЗДЕЛ IV. АНАЛИЗ ДАННЫХ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Е.А. Максимова, Н.П. Садовникова ОЦЕНКА ИНФРАСТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СУБЪЕКТА КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	155
А.Н. Самойлов, Ю.М. Бородянский МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ	166
А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ МАТРИЦЫ СМЕЖНОСТИ ПРИЧИННЫХ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ОТСУТСТВИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ.....	174
Т.В. Шушкевич, А.А. Морозов, И.И. Турулин АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ (ОКОН) И ИХ АППРОКСИМАЦИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НА ИХ ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ РЕКУРСИВНЫХ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ	187
С.А. Боцвин, В.А. Хватков ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЛИЧНОГО СОСТАВА ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	199
С.А. Боцвин, В.А. Хватков ТРАНСФОРМАЦИЯ И АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ ПРИ СОЗДАНИИ БАЗЫ ДАННЫХ УЧАСТНИКОВ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ 1941–1945 ГОДОВ МЕМОРИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ДОРОГА ПАМЯТИ» ГЛАВНОГО ХРАМА ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ.....	209

РАЗДЕЛ V. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Д.В. Тельпухов, Т.Д. Жукова, А.Н. Щелоков, П.Д. Кретинина ПРИМЕНЕНИЕ КОДА ХЭММИНГА В ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ	220
Л.А. Гладков, М.Д. Ясир, Н.В. Гладкова ГИБРИДНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.....	231
И.В. Родыгина, И.И. Бузенков, Ю.В. Каханец КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ И АРХИТЕКТУРА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕГМЕНТОВ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ.....	243
И.В. Родыгина, А.В. Наливайко СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СЕРВЕРНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДАЖАМИ	256

CONTENT

SECTION I. DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS

A.I. Kalyaev THEORETICAL FOUNDATIONS OF CREATING SELF-ORGANIZING DISPATCHERS OF DISTRIBUTED SYSTEMS BASED ON A MULTI-AGENT SOCIO-INSPIRATIONAL APPROACH	7
V.A. Litvinenko, S.A. Khovanskov, V.S. Khovanskova ESTIMATION OF THE PROBABILITY OF DETECTING A FALSE RESULT OF DISTRIBUTED CALCULATIONS PERFORMED BY A CENTRALIZED MULTI-AGENT SYSTEM.....	22
D.Yu. Kravchenko, Yu.A. Kravchenko, V.V. Markov, A.E. Saak BIOINSPIRED METHOD FOR CLASSIFICATION OF DISTRIBUTED RESOURCES FOR DISPATCHING IN GRID-COMPUTING	32

SECTION II. INTELLIGENT SYSTEMS

E.M. Gerasimenko, V.V. Stetsenko AN INTELLIGENT SENTIMENT ANALYSIS SYSTEM FOR MEASURING CUSTOMER LOYALTY AND MAKING DECISIONS BASED ON FUZZY LOGIC	42
L.A. Gladkov, N.V. Gladkova EVOLUTIONARY DESIGN AS A TOOL FOR DEVELOPING MULTI-AGENT SYSTEMS.....	51
S.I. Klevtsov SELECTING FEATURES OF THE MODEL TRANSFORMATION CHARACTERISTICS FOR AN INTELLIGENT PHYSICAL QUANTITY SENSOR	62
A.G. Klovo, A.A. Ilyukhin, G.V. Kupovykh, I.A. Lyapunova GENERALIZED TRIGONOMETRIC SYSTEMS AND SPECTRAL TASKS WITH ADDITIONAL INTERNAL BOUNDARY CONDITIONS	74

SECTION III. DECISION SUPPORT SYSTEMS

A.A. Levchenko, V.V. Taratukhin, Yu.A. Kravchenko DECISION-MAKING METHOD FOR TYPICAL PROCESSES MODELS FORMATION FOR CLOUD-BASED ENTERPRISE SYSTEMS	89
E.V. Kuliev, M.P. Krivenko, M.M. Semenova, S.V. Ignatieva INTELLIGENT SUBSYSTEM FOR DECISION SUPPORT BASED ON BIOLOGICALLY PLAUSIBLE ALGORITHMS FOR SELF-ORGANIZATION.....	105
D.V. Zaruba, E.V. Kuliev, D.Yu. Zaporozhets, M.M. Semenova DEVELOPMENT OF BIOHEURISTICS FOR CREATING AN INTELLECTUAL SUBSYSTEM FOR MAKING EFFECTIVE DECISIONS OF NP-HARD AND NP-DIFFICULT COMBINATORY-LOGICAL PROBLEMS ON GRAPHS	117
A.N. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh ALGORITHM OF EFFECTIVE CONTROLS FOR NONSTOCHASTIC CAUSAL MODELS IN THE ABSENCE OF OBSERVABLE VARIABLES FOR SYSTEMS OF DECISION MAKING CONTROL.....	129
E.M. Gerasimenko, E.V. Nuzhnov SOLUTION OF THE MAXIMUM EVACUATION FLOW PROBLEM BASED ON HESITANT FUZZY AGGREGATION OPERATORS	145

SECTION IV. DATA ANALYSIS AND INFORMATION PROCESSING

E.A. Maksimova, N.P. Sadovnikova DESTRUCTURIZATION OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE FOR ASSESSING THE INFRASTRUCTURAL STABILITY OF THE SUBJECT OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE UNDER DESTRUCTIVE INFLUENCES	155
---	-----

A.N. Samoylov, Yu.M. Borodyansky MOBILE-CLOUD SYSTEM FOR SOLVING PHOTOGRAMMETRY TASKS IN INDUSTRY	166
A.N. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh THE ADJACENCY MATRIX RECONSTRUCTION ALGORITHM FOR CAUSAL GRAPH MODELS IN THE ABSENCE OF OBSERVABLE VARIABLES	175
T.V. Shushkevich, A.A. Morozov, I.I. Turulin ANALYSIS OF CERTAIN WEIGHT FUNCTIONS (WINDOWS) AND THEIR APPROXIMATIONS FOR IMPLEMENTATION OF CONTROLLED RECURSIVE LOW-PASS FILTERS WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE ON THEIR BASIS	188
S.A. Botsvin, V.A. Khvatkov JUSTIFICATION OF THE APPEARANCE OF A PROMISING AUTOMATED SYSTEM FOR RECORDING PERSONNEL OF THE ARMED FORCES OF THE RUSSIAN FEDERATION	200
S.A. Botsvin, V.A. Khvatkov TRANSFORMATION AND ANALYSIS OF INFORMATION WHEN CREATING A DATABASE OF PARTICIPANTS OF THE GREAT PATRIOTIC WAR 1941-1945 IN THE MEMORIAL COMPLEX «ROAD OF MEMORY» IN THE MAIN RUSSIAN ARMED FORCES CATHEDRAL ON THE BASIS OF COMPUTER METHODS OF INFORMATION PROCESSING	210
SECTION V. DESIGN AUTOMATION AND NETWORK TECHNOLOGIES	
D.V. Telpukhov, T.D. Zhukova, A.N. Schelokov, P.D. Kretinina APPLICATION OF THE HAMMING CODE IN THE PROBLEM OF INCREASING FAULT TOLERANCE OF LOGIC CIRCUITS	221
L.A. Gladkov, M.J. Yaser, N.V. Gladkova HYBRID METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF PLACEMENT OF DIGITAL COMPUTER DEVICES	231
I.V. Rodygina, I.I. Buzenkoy, Yu.V. Kakhanets CONSTRUCTION CONCEPT AND ARCHITECTURE CRITICAL INFORMATION SEGMENTS OF THE REGIONAL INFOCOMMUNICATION NETWORK.....	244
I.V. Rodygina, A.V. Nalivayko COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR DEVELOPING THE SERVER SIDE OF THE SALES MANAGEMENT SYSTEM	256

Раздел I. Распределенные вычислительные системы

УДК 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-6-21

А.И. Каляев

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ДИСПЕТЧЕРОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО СОЦИОИНСПИРИРОВАННОГО ПОДХОДА

Описаны новые принципы организации, методы и алгоритмы функционирования диспетчера Распределенной системы (РС), позволяющие распределять и перераспределять ресурсы с динамически изменяющимися параметрами между поступающими заданиями с целью минимизации времени их выполнения. Основная проблема, не позволяющая сегодня эффективно оценивать время выполнения заданий в гетерогенной РС, напрямую вытекает из распределенности системы: каждый из её элементов обладает частичной независимостью и может существенно отличаться от других, более того, в процессе работы его возможности могут изменяться, и все это существенно влияет на эффективность распределения задач между узлами РС и на время выполнения заданий. В статье предложен новый подход к организации диспетчера РС, базирующийся на применении теории мультиагентных систем и социоинспирированных (базирующихся на принятых в человеческом обществе) методов: пользователи РС размещают свои задания на специальных узлах – досках объявлений, на каждом узле РС размещается проактивный программный агент, осуществляющий постоянный мониторинг параметров своего узла и поиск на досках объявлений подходящих для решения задач. При этом агенты, участвующие в решении общего задания формируют сообщества, в которых осуществляют планирование процесса решения задания и распределение частей заданий для минимизации времени задержки их решения. В качестве критерия эффективности работы РС было решено принять значение среднего времени задержки выполнения функциональных заданий относительно требуемых моментов времени, соответственно агенты распределяют задания таким образом, чтобы минимизировать значение указанного критерия. Настоящая статья включает введение, формальную постановку задачи диспетчирования ресурсов РС, обзор существующих подходов к организации диспетчера РС, описание предлагаемого мультиагентного решения задачи диспетчирования ресурсов РС с использованием социоинспирированного подхода, алгоритм работы распределенной системы и ее элементов, описание применения социоинспирированного подхода применительно к процессу диспетчирования задач и заключение. К основным преимуществам предложенного подхода можно отнести: возможность использования достоверной и актуальной информации о специализации и текущей производительности ресурсов при диспетчировании; высокая отказоустойчивость, обусловленная отсутствием элементов РС, выход из строя которых приводит к полной потере работоспособности РС; возможность гибкого масштабирования РС (увеличения числа ресурсов), достигаемая за счет децентрализации процесса диспетчирования.

Распределенные системы; социоинспирированный подход; биоинспирированный подход; мультиагентная система; децентрализованная система.

A.I. Kalyaev

**THEORETICAL FOUNDATIONS OF CREATING SELF-ORGANIZING
DISPATCHERS OF DISTRIBUTED SYSTEMS BASED ON A MULTI-AGENT
SOCIO-INSPIRATIONAL APPROACH**

This article describes new principles of organization, methods and algorithms for the functioning of the Distributed System (DS) dispatcher, which allow allocating and reallocating resources with dynamically changing parameters between incoming tasks in order to minimize their execution time. The main problem that does not allow today to effectively estimate the execution time of tasks in a heterogeneous DS directly follows from the distribution of the system: each of its elements has partial independence and may differ significantly from others, moreover, in the process of operation, its capabilities may change, and all this is essential. affects the efficiency of distribution of tasks between DS nodes and the time it takes to complete tasks. The article proposes a new approach to organizing a DS dispatcher, based on the application of the theory of multi-agent systems and socio-inspirational (based on accepted in human society) methods: DS users place their tasks on special nodes – bulletin boards, a proactive software agent is placed on each DS node, which implements constant monitoring of the parameters of your site and search on message boards suitable for solving problems. At the same time, the agents participating in the solution of the common task form communities in which they plan the process of solving the task and the distribution of parts of the tasks to minimize the delay time for their solution. As a criterion for the effectiveness of the DS, it was decided to take the value of the average delay in the execution of functional tasks relative to the required points in time, respectively, the agents distribute tasks in such a way as to minimize the value of the specified criterion. This article includes an introduction, a formal statement of the task of scheduling DS resources, a review of existing approaches to organizing a DS dispatcher, a description of the proposed multi-agent solution to the task of scheduling DS resources using a socio-inspirational approach, an algorithm for the operation of a distributed system and its elements, a description of the application of a socio-inspirational approach in relation to the task scheduling process. and conclusion. The main advantages of the proposed approach include: the ability to use reliable and up-to-date information about the specialization and current performance of resources in dispatching; high fault tolerance due to the absence of DS elements, failure of which leads to a complete loss of DS performance; the possibility of flexible scaling of the DS (increasing the number of resources), achieved by decentralizing the dispatching process.

Distributed systems; socioinspired approach; bioinspired approach; multi-agent system; decentralized system.

Введение. Наблюдаемое в последние годы активное развитие систем передачи данных привело к возрастанию актуальности проблемы создания распределенных систем (РС), т.е. систем, состоящих из множества территориально распределённых подсистем (каждая из которых в общем случае выполняет некоторый набор индивидуальных функций) взаимодействующих друг с другом для выполнения общего функционального задания или некоторого множества заданий [1, 2]. К классу распределенных систем можно также отнести такие сложные технические объекты как атомные и тепловые станции, авиационные и корабельные комплексы, космические станции и т.п. Действительно, все они состоят из множества взаимосвязанных подсистем (ресурсов), каждая из которых имеет свою функциональную специализацию, но при все эти подсистемы используются для выполнения общего задания, выполняемого объектом. Кроме того, в настоящее время крайне актуальной является проблема группового взаимодействия роботов при решении общей задачи [3]. Группа роботов – это та же распределенная система, в которой каждый робот (ресурс) может иметь индивидуальную специализацию, но при этом их действия должны быть направлены на достижение общей групповой цели.

Основной функцией, выполняемой диспетчером РС, является распределение ресурсов, входящих в состав РС, между операциями функциональных заданий, в реальном времени их поступления [4]. В общем виде для каждого задания существует момент времени, к которому должен быть готов результат его выполнения. Основная задача диспетчера – обеспечить распределение ресурсов, позволяющее завершить выполнение всех поступающих задач за требуемое время [5], однако очевидно, что это достижимо лишь в случае наличия достаточных для этого ресурсов. В случае же нехватки ресурсов диспетчер должен делать выбор между заданиями.

Таким образом, актуальной задачей является создание диспетчера РС, позволяющего распределять и перераспределять ресурсы с динамически изменяющимися параметрами между поступающими заданиями с учетом моментов времени, к которым задания должны быть выполнены.

Исходя из сказанного выше, в качестве универсального критерия эффективности работы РС было решено принять значение среднего времени задержки выполнения функциональных заданий относительно требуемых моментов времени.

Целью настоящего исследования является разработка принципов организации, методов и алгоритмов функционирования диспетчера РС, обеспечивающего минимизацию среднего времени задержки выполнения функциональных заданий относительно требуемых моментов времени.

Основная проблема, не позволяющая сегодня эффективно оценивать время выполнения заданий в РС, напрямую вытекает из распределенности системы: каждый из её элементов обладает частичной независимостью и может существенно отличаться от других, более того, в процессе работы его возможности могут изменяться, и все это существенно влияет на эффективность распределения задач между узлами РС и на время выполнения заданий. При этом учет всех этих параметров и организация взаимодействия между узлами ложится на плечи диспетчера, а количество узлов в системе может исчисляться десятками тысяч и существенно изменяться со временем. История человечества показывает возможность взаимодействия сотен тысяч человек при выполнении общих заданий, главной особенностью, позволяющей совмещать работу такого числа исполнителей, является активность элементов: каждый человек в общем виде заинтересован в выполнении своей работы. Поэтому для достижения поставленной цели решено было в качестве основы для создаваемого диспетчера применить мультиагентный подход для организации прямого взаимодействия между элементами РС. При этом предполагается, что каждый ресурс, входящий в состав РС, должен обладать неким программным агентом, представляющим «его интересы» при реализации процедуры диспетчирования [5–10]. Агенты, представляющие различные ресурсы РС должны быть объединены с помощью некоторого информационного канала связи, посредством которого они могут взаимодействовать и «договариваться» друг с другом о выполнении тех или иных операций поступающих функциональных заданий на том или ином ресурсе РС.

Создание такого мультиагентного диспетчера требует разработку новой архитектуры диспетчера РС, а также новых методов и алгоритмов взаимодействия элементов РС.

Базируясь на приведенном выше можно дать формальную постановку задачи диспетчирования ресурсов РС.

Формальная постановка задачи диспетчирования ресурсов РС. Формально под распределенной системой (РС) в дальнейшем будем понимать систему R , включающую в свой состав N различных ресурсов R_1, R_2, \dots, R_N , каждый из которых может выполнять некоторое множество операций $O_i = \langle O_1^i, O_2^i, \dots, O_B^i \rangle$ ($i = 1, 2, \dots, N$), а множество операций O , выполняемых всей РС в целом опреде-

ляется как $O = \bigcup_{i=1}^N O_i$. При этом, будем считать, что операция O_j имеет трудоемкость $v(O_j)$, которая определяется некоторым числом элементарных действий, которые необходимо осуществить для ее выполнения, а ресурс R_i при выполнении операции O_j имеет производительность $D_i(O_j)$, определяемую количеством элементарных действий, выполняемым данным ресурсом в единицу времени. Под операцией O_j можно понимать, например, некоторую вычислительную операцию, если речь идет распределенной вычислительной системе, либо производственную операцию, если речь идет, например, о многостаночной производственной системе. Зная трудоемкость $v(O_j)$ операции O_j и производительность $D_i(O_j)$ ресурса R_i при ее выполнении, можно рассчитать время, затрачиваемое ресурсом R_i на выполнение операции O_j как

$$t_i(O_j) = \frac{v(O_j)}{D_i(O_j)}.$$

В зависимости от конкретных условий организации различные распределенные системы можно разбить на 4 класса.

1. К первому классу относятся РС, у которых все ресурсы R_1, R_2, \dots, R_N выполняют одинаковые множества операций, т.е. $O_i = O_j = O$, ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$), причем производительность всех ресурсов R_i ($i = 1, 2, \dots, N$) при выполнении одной и той же операции $O_s \in O$ также одинакова, т.е. $D_i(O_s) = D_j(O_s)$. РС такого класса будем называть гомогенными распределенными системами первого типа.

2. Ко второму классу относятся РС, ресурсы R_1, R_2, \dots, R_N которых выполняют одинаковые множества операций, т.е. $O_i = O_j = O$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$), но при этом производительность различных ресурсов $R_i \in R$ и $R_j \in R$ при выполнении одной и той же операции $O_s \in O$ различна, т.е. $D_i(O_s) \neq D_j(O_s)$. Системы данного класса будем называть гомогенными распределенными системами второго типа.

3. К третьему классу будем относить РС, у которых множества операций, выполняемых различными ресурсами, различны (т.е. каждый ресурс имеет свою функциональную специализацию) $O_i \neq O_j$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N$), хотя они могут и пересекаться, т.е. $O_i \cap O_j \neq \emptyset$. При этом производительность различных ресурсов $R_i \in R$ и $R_j \in R$ при выполнении одной и той же операции $O_s \in O$ одинаковая, т.е. $D_i(O_s) = D_j(O_s)$. Системы данного класса будем называть гетерогенными распределенными системами первого типа.

4. Наконец, к четвертому классу относятся РС, все ресурсы которых R_1, R_2, \dots, R_N выполняют различные множества операций, т.е. $O_i \neq O_j$ и $O_i \cap O_j \neq \emptyset$, причем производительность различных ресурсов $R_i \in R$ и $R_j \in R$ при выполнении одной и той же операции $O_s \in O_i$ также различна, т.е. $D_i(O_s) \neq D_j(O_s)$. РС данного класса будем называть гетерогенными распределенными системами второго типа.

Будем считать, что РС предназначена для выполнения некоторого множества функциональных заданий $Z = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_L \rangle$, которые могут поступать от различных Заказчиков в произвольные моменты времени, причем в РС может одновременно выполняться сразу несколько различных заданий из множества $Z = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_L \rangle$. При этом каждое отдельное задание $Z_l \in Z$ представляется в виде некоторого ациклического графа операций $G_l(Q_l, X_l)$ (рис. 2), вершине $q_j \in Q_l$ которого приписана некоторая операция O_j , принадлежащая множеству $O = \bigcup_{i=1}^N O_i$, а дуга $x(q_j, q_{j+1})$ устанавливает взаимосвязь между операциями, приписанным вершинам q_j и q_{j+1} , т.е. определяет, что результат операции O_j , приписанной вершине q_j , необходим для выполнения следующей операции O_{j+1} , приписанной вершине q_{j+1} .

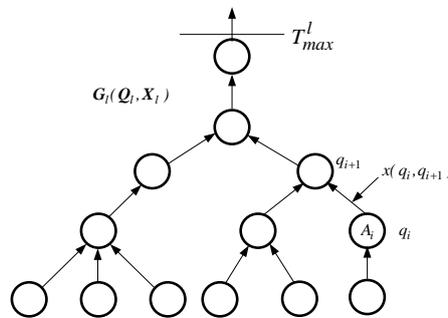


Рис. 2. Граф задания Z_l

Будем считать, что Заказчик задания $Z_l \in Z$ задает момент времени T_{max}^l (см. рис. 2), к которому он желает получить результат выполнения своего задания, что момент времени T_{max}^l должен устанавливаться таким образом, чтобы выполнялось условие $T_{max}^l \geq T_{\Pi}^l + t_{min}^l$, где T_{Π}^l момент времени поступления задания в РС, t_{min}^l - минимально возможный период времени выполнения задания Z_l .

При этом значение t_{min}^l будет определяться временем выполнения наиболее трудоемкой ветви графа задания $G_l(Q_l, X_l)$, т.е.

$$t_{min}^l = \sum_{j=1}^k t(O_j) = \sum_{j=1}^k \frac{v(O_j)}{D_i(O_j)} \geq \sum_{j=1}^k \frac{v(O_j)}{D_{max}(O_j)}$$

где k – число операций в наиболее трудоемкой ветви графа-задания Z_l ;

$t(O_j)$ – время выполнения j -ой операции наиболее трудоемкой ветви графа

$G_l(Q_l, X_l)$;

$v(O_j)$ – трудоемкость операции O_j ;

$D_i(O_j)$ – производительность ресурса R_i выполняющего операцию O_j ;

$D_{max}(O_j)$ – максимальная производительность среди всех ресурсов множества

R при выполнении операции O_j .

Очевидно, что реальный момент времени T_p^l выполнения задания $Z_l \in \mathbf{Z}$ может отличаться от желаемого T_{max}^l , причем если $T_p^l < T_{max}^l$ (т.е. задание выполняется раньше установленного Заказчиком времени), то это допустимо, а если $T_p^l > T_{max}^l$ (т.е. задание выполняется позже установленного заказчиком момента времени), то это нежелательно. Поэтому распределение операции задания Z_l между ресурсами R_1, R_2, \dots, R_N системы необходимо осуществлять таким образом, чтобы величина $\Delta T^l = T_p^l - T_{max}^l$ (при условии, что $T_p^l \geq T_{max}^l$) была минимальной. Если же на РС поступает поток задания $\mathbf{Z} = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_L \rangle$, то цель работы диспетчера должна заключаться в таком распределении операций, поступающих в произвольные моменты времени заданий, чтобы минимизировать среднее время задержки выполнения всех заданий потока, т.е. обеспечить минимум величины.

$$\Delta T = \frac{\sum_{l=1}^L \Delta T^l}{L} = \frac{\sum_{l=1}^L T_p^l - T_{max}^l}{L};$$

где L – число заданий, выполненных РС.

T_p^l – момент времени поступления задания Z_l .

T_{max}^l – требуемый (установленный Заказчиком) момент времени выполнения задания Z_l ;

T_p^l – реальный момент времени завершения выполнения задания Z_l на РС.

Исходя из приведенных выше соображений задачу, решаемую диспетчером РС, можно сформулировать в следующем виде: необходимо обеспечить такое распределение операций $O_j \subseteq \mathbf{O}$ заданий $Z_l \in \mathbf{Z}$, поступающих в произвольные моменты времени и описываемых графом $G_l(Q_l, X_l)$, между ресурсами множества $\mathbf{R} = \langle R_1, R_2, \dots, R_N \rangle$, которое бы минимизировало среднее время ΔT задержки выполнения всех заданий потока $\mathbf{Z} = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_L \rangle$.

При этом необходимо обратить внимание на следующее важное обстоятельство. Период времени t^l , необходимый для выполнения очередного поступающего на РС функционального задания $Z_l \in \mathbf{Z}$, будет складываться из двух составляющих

$$t^l = t_p^l + t_B^l,$$

где t_p^l – период времени, затрачиваемый диспетчером на распределение операций задания Z_l между ресурсами РС;

t_B^l – период времени, затрачиваемый ресурсами РС, между которыми распределены операции задания Z_l , непосредственно их выполнение.

Если время t_p^l распределения будет велико, то может оказаться, что к моменту $T_{п}^{l+1}$ поступления следующего функционального задания $Z_{l+1} \in \mathbf{Z}$ диспетчер еще не успеет решить задачу распределения операций предыдущего задания Z_l . В этом случае распределение, полученное диспетчером РС для задания Z_l становится уже неактуальным и процесс распределения нужно будет начинать заново уже с учетом сразу двух поступивших заданий Z_l и Z_{l+1} , что, очевидно, еще больше увеличит время решения задачи распределения. В результате, если время решения задачи распределения операций поступающих заданий будет большим, а период поступления заданий будет относительно малым, то выполнение потока заданий $\mathbf{Z} = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_M \rangle$ на РС становится практически невозможным. Отсюда следует вывод: для того, чтобы РС обеспечивала выполнение потока заданий в реальном времени их поступления, диспетчер должен успевать решать задачу распределения операций очередного поступающего задания Z_l до момента времени $T_{п}^{l+1}$ поступления следующего задания Z_{l+1} (рис. 3).

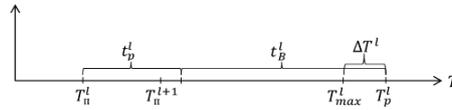


Рис. 3. Поступление очередного задания Z_{l+1} до момента завершения процедуры распределения операций предыдущего задания Z_l

Кроме того, очевидно, что от времени распределения t_p^l , зависит и время задержки ΔT^l выполнения задания Z_l , поскольку (см. рис. 3)

$$\Delta T^l = T_p^l - T_{max}^l = T_n^l + t_p^l + t_B^l - T_{max}^l,$$

где T_{max}^l – устанавливаемое Заказчиком (требуемое) время выполнения задания Z^l .

Т.е. чем больше время распределения t_p^l , тем вероятнее, что время задержки ΔT^l выполнения задания Z_l увеличится. Поэтому, для того чтобы минимизировать среднее время задержки ΔT выполнения заданий потока $\mathbf{Z} = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_l \rangle$, необходимо стараться минимизировать время решения задачи распределения операций очередного поступающего задания Z_l между ресурсами РС. Правда, попытка сокращения времени распределения может иметь и обратную сторону: чем меньше времени будет тратиться на решение задачи распределения операций задания Z_l , тем вероятнее, что получаемое при этом распределение будет менее оптимальным, что в свою очередь может приводить к увеличению времени выполнения задания t_B^l и, как следствие, к увеличению времени задержки ΔT^l . Поэтому необходимо обеспечить некоторый компромисс, т.е. диспетчер должен решать задачу распределения операций очередного задания Z_l за минимально возможное время при сохранении высокого уровня качества самого распределения [11–13].

Исходя из приведенных выше соображений рассмотрим более подробно различные подходы к построению диспетчера распределенной системы, включающей в свой состав N ресурсов R_1, R_2, \dots, R_N .

Существующие подходы к организации диспетчера РС. В простейшем случае диспетчер РС можно реализовывать по классической централизованной схеме. При этом каждый ресурс R_i ($i = 1, 2, \dots, N$), входящий в состав РС, должен обладать своим локальным устройством управления $УУ_i$, а координация их взаимодействия при выполнении функционального задания должна осуществляться с помощью центрального диспетчера. При такой организации функции центрального диспетчера заключаются в приеме очередного функционального задания Z_l , распределении его операций между отдельными ресурсами, входящими в состав РС, и организации их взаимодействия в процессе выполнения задания, в то время как локальные устройства управления отдельных ресурсов должны обеспечивать выполнение отдельных операций, назначенных им диспетчером.

К преимуществам такой схемы следует отнести простоту организации диспетчера, а также возможности использования классических методов и алгоритмов теории расписаний для решения задачи диспетчирования РС [14]. Однако, вычислительная трудоемкость задачи распределения будет экспоненциально зависеть от количества переменных (в данном случае – от числа ресурсов в РС, а также количества операций в поступающих заданиях), поэтому данная схема организации диспетчера возможна только в случае когда число N ресурсов, входящих в РС, относительно невелико, а новые функциональные задания поступают на РС достаточно редко. Кроме того, централизованная организация диспетчера РС приводит к значительному снижению отказоустойчивости системы, поскольку выход его из

строения приводит к катастрофическим последствиям для всей РС в целом. К недостаткам централизованной организации диспетчера РС следует также отнести трудности масштабирования (наращивания количества ресурсов) РС, поскольку при этом требуется кардинальная переделка алгоритмов работы диспетчера РС.

Частично указанные недостатки можно устранить за счет применения иерархической схемы организации диспетчера РС (рис. 4). При этом диспетчер РС строится в виде иерархического дерева, в котором диспетчеры нижнего уровня отвечают за организацию работы некоторого подмножества ресурсов РС, а функции диспетчера верхнего уровня заключаются в приеме функционального задания, разбиения его на подзадания. При этом, поскольку количество ресурсов, за которые «отвечает» каждый из диспетчеров нижнего уровня, а также число операций в подзадании, закрепляемым за ним диспетчером верхнего уровня, будет относительно невелико, то, соответственно, и временная сложность решаемой диспетчером нижнего уровня задачи диспетчерования также будет невелика. Это позволяет использовать при организации работы диспетчеров нижнего уровня классические методы и алгоритмы теории расписаний, реализация которых при небольшом количестве диспетчируемых ресурсов не потребуют больших вычислительных и временных затрат.

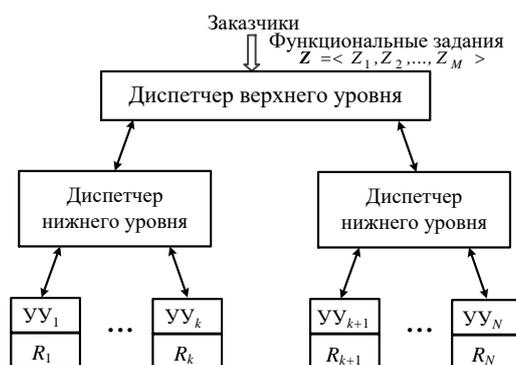
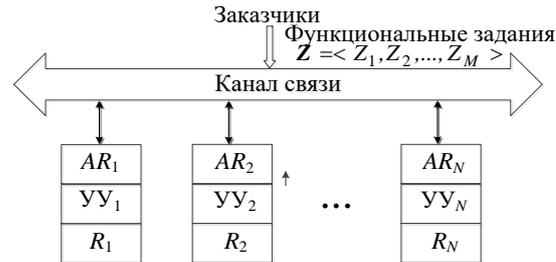


Рис. 4. РС с иерархическим диспетчером

Однако, с другой стороны, иерархическая схема организации диспетчера РС резко усложняет саму задачу диспетчерования, поскольку функциональное задание, поступающее на РС, необходимо предварительно каким-то образом разбить на подзадания, решаемые группами ресурсов, объединяемых диспетчерами нижнего уровня, а также организовать целенаправленное взаимодействие ресурсов как внутри групп, так и между группами. Также существенно усложняется проблема масштабирования количества ресурсов при модернизации РС, поскольку это потребует кардинальной переделки алгоритмов работы, как диспетчера верхнего уровня, так и диспетчеров нижнего уровня, обслуживающих эти дополнительные ресурсы. Кроме того, в системе все равно остается «узкое горло», а именно, диспетчер верхнего уровня, выход которого из строя будет приводить к катастрофическим последствиям для всей РС в целом.

Для устранения указанных недостатков предлагается воспользоваться мультиагентным подходом к диспетчерованию, предполагающим частичное решение задачи диспетчерования на всех входящих в РС узлах [15–18]. При этом возникает несколько проблем: как организовать диспетчер РС для возможности применения мультиагентного подхода и как организовать взаимодействие элементов распределенной системы.

Мультиагентное решение задачи диспетчирования ресурсов РС с использованием социоинспирированного подхода. Предположим, что каждый ресурс $R_i \in R$ обладает некоторым программным агентом AR_i , которые «умеют договариваться» друг с другом о распределении между собой операций поступающих функциональных заданий таким образом, чтобы минимизировать среднее время задержки ΔT их выполнения. Иными словами, задача диспетчирования в данном случае должна решаться в результате взаимодействия программных агентов друг с другом посредством информационного канала связи (рис. 5)



AR_i ($i = 1, 2, \dots, N$) - программный агент ресурса R_i

Рис. 5. Децентрализованная (мультиагентная) организация диспетчера РС

Однако, несмотря на очевидные преимущества, рассмотренная выше децентрализованная схема организации диспетчера практически не используется в современных РС. Это вызвано, в первую очередь, отсутствием теоретических основ мультиагентного диспетчирования ресурсов РС при выполнении потоков заданий, а также методов и алгоритмов работы программных агентов, обеспечивающих высокую скорость решения задачи диспетчирования при сохранении допустимого уровня качества распределения.

Для создания методов и алгоритмов, которые позволят применять подобный децентрализованный диспетчер предлагается воспользоваться социоинспирированным подходом – разновидностью биоинспирированного подхода, предполагающим использование методов взаимодействия, применяемый группами высоко развитых организмов при решении комплексных задач.

Действительно, в настоящее время децентрализованный подход широко распространен в социальных системах, например при выполнении группами людей сложных проектных или строительных работ, на сборочном производстве, при осуществлении боевых действий и т.п. [19] Во всех перечисленных выше социальных РС каждый ресурс системы (например станок в многостаночном производстве) обладает «своим» агентом – человеком, отвечающим за данный ресурс (станок), а распределение ресурсов при выполнении сложных заданий, включающих в своей состав множество взаимосвязанных операций, осуществляется путем взаимодействия (договоренности) агентов (людей) друг с другом о том, кто какую операцию и в какой последовательности выполняет. Такое взаимодействие в сообществе людей, направленное на выполнение сложной функционального задания, называется социальным поведением [20]. При этом, как показывает опыт эволюционного развития человеческого общества, именно навыки социального поведения дают возможность группам людей выполнять сложные задания в реальном времени их поступления, например при выполнении сложных боевых операций. Все это позволяет сделать вывод о том, что при разработке методов и алгоритмов мультиа-

гентного диспетчирования ресурсов в РС целесообразно использовать подходы, основанные на принципах социального поведения коллективов людей, задействованных в выполнении сложных функциональных заданий.

Приведем несколько примеров.

1. Игра в футбол. Футбольная команда – это пример гомогенной социальной РС с децентрализованным мультиагентным диспетчером, в которой каждый ресурс (игрок) самостоятельно принимает решение о своих текущих действиях на поле для достижения общекомандной цели.

2. Автомобильный трафик.

Автомобильный трафик – это «человеко-машинная» РС, включающая в свой состав тысячи и даже десятки тысяч ресурсов (автомобилей), каждым из которых управляет свой агент (шофер). В системе отсутствует какой-либо центральное устройство управления (если не считать дорожные знаки и светофоры), а взаимодействие агентов (шоферов) осуществляется посредством визуального информационного канала.

3. Боевые подразделения.

Боевые подразделения – это пример гетерогенных распределенных систем, включающих в свой состав множество ресурсов с различной специализацией, таких как отдельные бойцы-пехотинцы или боевые машины, управляемые экипажем. Общим функциональным заданием, стоящим перед такой РС, является нанесение максимального ущерба противнику при минимизации своих собственных потерь.

Во всех перечисленных выше социальных РС решение задачи диспетчирования ресурсов осуществляется с помощью множества агентов (людей), каждый из которых представляет свой ресурс (например, обрабатывающий станок) и решает относительно простую задачу загрузки своего ресурса операциями поступающих заданий, в то время как скоординированная работа всей РС в целом, направленная на выполнение общего функционального задания, осуществляется путем информационного взаимодействия агентов посредством некоторого канала связи. В общем случае стратегии социального поведения людей, участвующих в сообществе по выполнению некоторого общего функционального задания, могут быть различными. В идеале все агенты (люди), входящие в такое сообщество, должны четко и однозначно понимать стоящую перед сообществом функциональную задачу и стараться решить ее оптимальным образом с точки зрения всего сообщества в целом.

На базе приведенных утверждений предлагается применять следующий алгоритм работы распределенной системы и ее элементов.

Алгоритм работы распределенной системы и ее элементов. Итак, в качестве объекта дальнейшего исследования будем рассматривать распределенную систему R , состоящую из N ресурсов R_1, R_2, \dots, R_N , объединенных информационным каналом связи. При этом будем считать, что каждый ресурс R_i обладает своим локальным устройством управления $УУ_i$, обеспечивающем выполнение операций множества $O_i = \langle O_1^i, O_2^i, \dots, O_B^i \rangle$, а также некоторым программным агентом AR_i , представляющим его «интересы» в процессе диспетчирования. Кроме того, будем считать, что в произвольные моменты времени от различных Заказчиков в РС поступает поток функциональных заданий $Z = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_L \rangle$ (см. рис. 5), представляемых в виде графов $G_l(Q_l, X_l)$, причем для каждого задания Z_l Заказчик устанавливает требуемый момент времени его выполнения T_{max}^l .

Поскольку каждый ресурс, входящий в РС, обладает своим локальным устройством управления, то очевидно, задача выполнения некоторого задания $Z_l \in Z$ может быть решена в два этапа:

1. Сначала среди всего множества ресурсов R_1, R_2, \dots, R_N , входящих в РС, необходимо сформировать некоторое подмножество $R_l \subseteq R$ (в дальнейшем такое подмножество будем называть сообществом), обеспечивающее выполнение всего задания Z_l к установленному Заказчиком моменту времени T_{max}^l , и распределить операции, приписанные вершинам графа $G_l(Q_l, X_l)$ задания Z_l , между ними. При этом под распределением операций понимается закрепление операций, приписанных вершинам графа $G_l(Q_l, X_l)$ задания Z_l , за конкретными ресурсами, входящими в состав сообщества $R_l \subseteq R$, с привязкой их выполнения к определенным моментам времени (иначе говоря – построение временного графика выполнения операций задания Z_l различными ресурсами сообщества $R_l \subseteq R$).

2. После того как операции задания Z_l распределены между ресурсами сообщества $R_l \subseteq R$ последние, помощью своих локальных систем управления, обеспечивают выполнение закрепленных за ними операций по установленному временному графику.

Основную трудность при этом, очевидно, составляет задача первого этапа, а именно распределения операций графа $G_l(Q_l, X_l)$ задания Z_l между ресурсами РС с учетом их специализации и производительности. Проблеме распределения операций (сетевое планирование) посвящено достаточно большое число исследований с использованием, например, методов линейного или динамического программирования, теории расписаний и т.д. []. Поэтому, если графы $G_l(Q_l, X_l)$ ($l = 1, 2, \dots, M$) всех заданий множества Z и состав ресурсов распределенной системы R известны заранее, то с помощью известных методов, в принципе, такие расписания могут быть составлены для каждого из заданий множества $Z_l \in Z$ до начала их исполнения и просто храниться в памяти системы.

Однако, это идеализированный случай. В реальности графы операций выполняемых РС заданий $Z = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_L \rangle$ могут быть заранее неизвестны, а состав ресурсов, входящих в РС R , может динамически изменяться непредсказуемым образом (например, некоторые из них могут выходить из строя, либо изменять свою производительность). Кроме того, поскольку мы приняли, что функциональные задания от Заказчиков поступают в случайные моменты времени, то невозможно заранее предугадать, какие из заданий могут одновременно выполняться в РС. Поэтому возникает необходимость разработки таких методов и алгоритмов, которые бы обеспечивали автоматическое распределение операций потока заранее неизвестных заданий $Z_l \in Z$, поступающих в произвольные моменты времени среди множества ресурсов R_1, R_2, \dots, R_N распределенной системы R .

Выше было показано, что в качестве основы для разработки таких методов и алгоритмов целесообразно использовать принципы социального взаимодействия, используемые группой людей, участвующих в выполнении общего задания. Приведем формальное описание указанных принципов.

Соционспирированный подход к диспетчированию задач. Как мы приняли выше, за каждым ресурсом R_i ($i = 1, 2, \dots, N$), входящим в состав РС, закреплен отдельный агент AR_i , причем все агенты, представляющие различные ресурсы РС, могут общаться друг с другом посредством некоторого информационного канала связи. Будем считать, что все эти агенты заинтересованы в выполнении поставленного перед РС задания $Z_l \in Z$ к установленному Заказчиком моменту времени

T_{max}^l . Тогда каждый из агентов AR_i ($i = 1, 2, \dots, N$) в процессе распределения операций задания $Z_l \in \mathbf{Z}$ должен постараться взять «на себя» (т.е. на представляемый ими ресурс) исполнение такого подмножества вершин (ветви) графа $G_l(Q_l, X_l)$ задания $Z_l \in \mathbf{Z}$, операции которых он сможет выполнить с помощью «своего» ресурса R_i к установленному моменту времени. Осуществляя последовательный выбор различных ветвей графа задания $G_l(Q_l, X_l)$ для исполнения агенты различных ресурсов РС тем самым образуют сообщество R_l по его выполнению.

Здесь возникает один вопрос – где должен быть размещен граф $G_l(Q_l, X_l)$ задания Z_l и каким образом должен осуществляться доступ к нему агентов различных ресурсов R_1, R_2, \dots, R_N в процессе выбора для исполнения той или иной ветви графа. Очевидно, что это должно быть какое-то хранилище, к которому должны иметь доступ как агенты всех ресурсов РС, так и Заказчики заданий. В качестве такого общедоступного хранилища может быть использован некоторый пассивный узел, подключенный к информационному каналу и играющий роль «доски объявлений» (ДО) (рис. 6), на котором, с одной стороны, Заказчики могут размещать свои функциональные задания, представленные в виде графа $G_l(Q_l, X_l)$, а с другой стороны агенты всех ресурсов R_1, R_2, \dots, R_N могут иметь доступ к размещенным заданиям для участия в процедуре распределения их операций.

При этом дескриптор задания Z_l , размещаемого Заказчиком на ДО, должен содержать:

- ◆ граф $G_l(Q_l, X_l)$ задания Z_l , представленный, например, в виде матрицы инцидентности вершин;
- ◆ список вершин множества Q_l и приписанных им операций из множества O ;
- ◆ момент времени T_{max}^l , к которому Заказчик хочет получить результат выполнения задания Z_l ;
- ◆ список агентов, участвующих в сообществе R_l по выполнению задания Z_l (заметим, что в момент размещения задания на ДО этот список пуст и должен заполняться в процессе распределения).

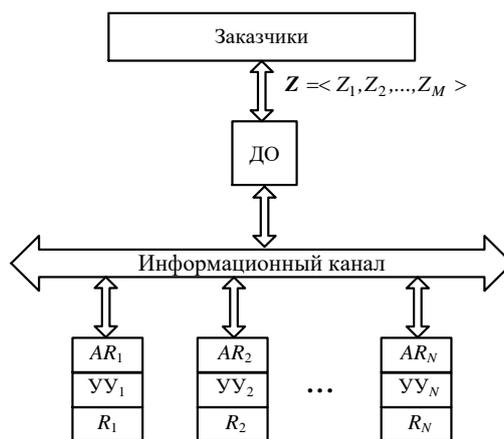


Рис. 6. Схема взаимодействия Заказчиков и агентов ресурсов РС посредством «доски объявлений»

Учитывая приведенные выше соображения работу децентрализованной РС с мультиагентным диспетчером в общем виде можно представить следующим образом:

1. Заказчик формирует свое функциональное задание $Z_l \in \mathbf{Z}$ в виде графа $G_l(Q_l, X_l)$, устанавливает момент времени T_{max}^l , к которому он желает получить результат его исполнения, и размещает дескриптор задания Z_l на ДО.

2. Агенты ресурсов R_1, R_2, \dots, R_N , входящих в состав РС, периодически опрашивают ДО в поисках работы для «своих» ресурсов. В случае обнаружения на ДО некоторого задания $Z_l \in \mathbf{Z}$ агент ресурса R_1 делает попытку войти в состав сообщества R_l по его выполнению. Для этого агент AR_1 выделяет в графе $G_l(Q_l, X_l)$ задания $Z_l \in \mathbf{Z}$ некоторую ветвь $H_1 = \langle q_1^1, q_2^1, \dots, q_k^1 \rangle$ (т.е. некоторую последовательность входящих в него операций, не закрепленных ранее за другими агентами), операции которой он может выполнить с минимальной задержкой относительно требуемого момента времени T_{k+1}^1 , приписанного ее конечной вершине q_k^1 , с помощью «своего» ресурса R_1 . Здесь следует отметить, что при размещении Заказчиком функционального задания Z_l на ДО, требуемый момент времени исполнения будет задан установлен только для конечной вершины q_k всего графа $G_l(Q_l, X_l)$, который определяется установленным Заказчиком моментом времени T_{max}^l выполнения всего задания. Если агент AR_1 обнаруживает ветвь H_1 графа $G_l(Q_l, X_l)$, удовлетворяющую данным условиям, то он вступает в сообщество R_l по выполнению задания $Z_l \in \mathbf{Z}$.

4. При этом агент AR_1 осуществляет следующие модификации графа $G_l(Q_l, X_l)$ на ДО: выбранная им для исполнения ветвь H_1 удаляется из графа задания $G_l(Q_l, X_l)$, т.е. формируется новый граф $G_l^1(Q_l^1, X_l^1) = G_l(Q_l, X_l) / H_1$, а всем вершинам этого нового графа, инцидентным вершинам удаленной ветви H_1 , агент AR_1 приписывает моменты времени, когда соответствующие им операции должны быть выполнены с тем, чтобы «вписаться» в график выполнения ветви H_1 , закрепленной за его ресурсом R_1 .

5. Далее аналогичный выбор делает агент AR_2 , представляющий ресурс R_2 – в графе $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$, оставшемся после модификации агентом AR_1 , он выбирает такую ветвь $H_2 = \langle q_1^2, q_2^2, \dots, q_r^2 \rangle$, которую с помощью «своего» ресурса R_2 он может выполнить к моменту времени, приписанному ее конечной вершине q_r^2 с минимальной задержкой (в результате модификации, произведенной агентом AR_1 , в графе $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$ может уже иметься некоторое множество вершин, которым приписаны требуемые моменты времени их исполнения). Далее в процесс распределения вступает агент AR_1 , представляющий ресурс R_3 и т.д., до тех пор, пока не будут разобраны все ветви графа задания $G_l(Q_l, X_l)$, т.е. пока он окажется, что после очередной модификации граф задания на ДО становится пустым.

6. После того, как агент AR_i выбрал для исполнения ветвь H_i он инициирует процедуру выполнения операций, приписанных вершинам этой ветви, с помощью локального устройства управления «своего» узла R_i .

Заключение. Предложенная в статье мультиагентная организация диспетчера РС имеет очевидные преимущества:

- ◆ во-первых, программный агент AR_i ресурса R_i будет иметь достоверную и полную информацию о специализации и текущей производительности «своего» ресурса при выполнении тех или иных операций, что позволяет повысить качество решения задачи диспетчирования;

- ◆ во-вторых, в процессе диспетчирования вычислительная и, соответственно, временная трудность задачи, решаемой программным агентом, существенно снижается, поскольку агент «отвечает» только за один «свой» ресурс, входящий в состав РС, что позволяет существенно снизить время решения задачи диспетчирования;

- ◆ во-третьих, система будет обладать максимальной отказоустойчивостью, поскольку в ней отсутствуют части, выход из строя которых приводит к полной потере работоспособности РС в целом;

- ◆ в-четвертых, для масштабирования РС (увеличения числа ресурсов) нет необходимости менять какие-либо алгоритмы работы диспетчеров, а достаточно просто подключить новый ресурс (обладающий соответствующим программным агентом) к общему каналу информационного обмена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шамакина А.В. Обзор технологий распределенных вычислений // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2014. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologiy-raspredeleennyh-vychisleniy> (дата обращения: 18.08.2021).
2. Смелянский Р.Л. Модель функционирования распределенных вычислительных систем // Вестник Московского университета. – 1990. – Т. 15. – Р. 3-21.
3. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника: Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы (г. Орехово-Зуево, 22-23 сентября 2011). Орехово-Зуево, 2011. – Р. С132.
4. Данеев А.В., Басыров А.Г., Мастин А.Б. Диспетчер энергосберегающего параллельного вычислительного процесса // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dispatcher-energoberegayuschego-parallelnogo-vychislitelnogo-protsessa> (дата обращения: 18.08.2021).
5. Kalyaev A.I., Kalyaev I.A. Method of multiagent scheduling of resources in cloud computing environments // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2016. – Vol. 55, No. 2. – P. 211-221. – DOI: 10.1134/S1064230716010081.
6. Иващенко А.В. и др. Мультиагентные технологии для разработки сетевых систем управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3 (116).
7. Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О. Современное состояние и перспективы промышленных применений многоагентных систем // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2017. – № 66.
8. Dechesne F., Ghorbani A., Yorke-Smith N. Introduction to the special issue on agent-based modelling for policy engineering // AI Soc. – Springer, 2015. – Vol. 30, No. 3. – P. 311-313.
9. Кулинич А.А. Модель командного поведения агентов в качественной семиотической среде. Ч. 1. Качественная среда функционирования. Основные определения и постановка задачи // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2017. – № 3. – Р. 95-105.
10. Карпов В.Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике // Управление большими системами: сборник трудов. – 2016. – № 59.
11. Kalyaev A. et al. An effective algorithm for multiagent dispatching of resources in heterogeneous cloud environments // 2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). – IEEE, 2016. – P. 1140-1142.
12. Kalyaev I.A., Kalyaev A.I., Korovin I.S. Multiagent Resource Dispatching in a Heterogeneous Cloud Environment // 2019 International Conference on Electronical, Mechanical and Materials Engineering. – Atlantis Press, 2019. – P. 79-85.

13. Kalyaev I.A., Kalyaev A.I., Korovin I.S. A Modified Method of Multiagent Resource Dispatching in a Heterogeneous Cloud Environment // 2019 International Conference on Electrical, Mechanical and Materials Engineering (ICE2ME 2019). – Atlantis Press, 2019. – P. 72-78. – DOI: 10.2991/ice2me-19.2019.17.
14. Герасимов Б.Н., Морозов В.В., Яковлева Н.Г. Системы управления: понятие, структура, исследование. – Самара СГАУ, 2002.
15. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – P. 92.
16. Легович Ю.С., Максимов Д.Ю. Выбор исполнителя в группе интеллектуальных агентов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2015. – № 56.
17. Истомин В.В. Прогнозирование поведения групп автономных интеллектуальных агентов на основе теории многоагентных систем // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т. 18, № 4.
18. Campbell A., Wu A.S. Multi-agent role allocation: issues, approaches, and multiple perspectives // Auton. Agent. Multi. Agent. Syst. – Springer, 2011. – Vol. 22, No. 2. – P. 317-355.
19. Гаазе-Ранопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. – Рипол Классик, 1987. – 150 с.
20. Conte R. et al. Sociology and social theory in agent based social simulation: A symposium // Comput. Math. Organ // Theory. – Springer, 2001. – Vol. 7, No. 3. – P. 183-205.

REFERENCES

1. Shamakina A.V. Obzor tekhnologiy raspredelennykh vychisleniy [Overview of distributed computing technologies], *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of SUSU. Series: Computational Mathematics and Computer Science], 2014, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologiy-raspredelennykh-vychisleniy> (accessed 18 August 2021).
2. Smelyanskiy R.L. Model' funktsionirovaniya raspredelennykh vychislitel'nykh sistem [Model of functioning of distributed computing systems], *Vestnik Moskovskogo universiteta* [Bulletin of the Moscow University], 1990, Vol. 15, pp. 3-21.
3. Karpov V.E. Kollektivnoe povedenie robotov. Zhelaemoe i deystvitel'noe [Collective behavior of robots. Wishful and valid], *Sovremennaya mekhatronika: Sb. nauchn. trudov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly (g. Orekhovo-Zuevo, 22-23 sentyabrya 2011)* [Modern mechatronics: Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific School (Orekhovo-Zuevo, September 22-23, 2011)]. Orekhovo-Zuevo, 2011, pp. C132.
4. Daneev A.V., Basyrov A.G., Mastin A.B. Dispatcher energosberegayushchego parallel'nogo vychislitel'nogo protsessa [Dispatcher of an energy-saving parallel computing process], *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2010, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/dispatcher-energoberegayushchego-parallelnogo-vychislitel'nogo-protssesa> (accessed 18 August 2021).
5. Kalyaev A.I., Kalyaev I.A. Method of multiagent scheduling of resources in cloud computing environments, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2016, Vol. 55, No. 2, pp. 211-221. DOI: 10.1134/S1064230716010081.
6. Ivashchenko A.V. i dr. Multiagentnye tekhnologii dlya razrabotki setentsricheskikh sistem upravleniya [Multi-agent technologies for the development of network-centric control systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 3 (116).
7. Gorodetskiy V.I., Bukhvalov O.L., Skobelev P.O. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy industrial'nykh primeneniy mnogoagentnykh sistem [The current state and prospects of industrial applications of multi-agent systems], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Managing large systems: Proceedings], 2017, No. 66.
8. Dechesne F., Ghorbani A., Yorke-Smith N. Introduction to the special issue on agent-based modelling for policy engineering, *AI Soc.* Springer, 2015, Vol. 30, No. 3, pp. 311-313.
9. Kulimich A.A. Model' komandnogo povedeniya agentov v kachestvennoy semioticheskoy srede. Ch. 1. Kachestvennaya sreda funktsionirovaniya. Osnovnye opredeleniya i postanovka zadachi [The model of team behavior of agents in a qualitative semiotic environment. Part 1. Qualitative functioning environment. Basic definitions and problem statement], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision-making], 2017, No. 3, pp. 95-105.

10. Karpov V.E. Modeli sotsial'nogo povedeniya v gruppovoy robototekhnike [Models of social behavior in group robotics], *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Management of large systems: proceedings], 2016, No. 59.
11. Kalyaev A. et al. An effective algorithm for multiagent dispatching of resources in heterogeneous cloud environments, *2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*. IEEE, 2016, pp. 1140-1142.
12. Kalyaev I.A., Kalyaev A.I., Korovin I.S. Multiagent Resource Dispatching in a Heterogeneous Cloud Environment, *2019 International Conference on Electronical, Mechanical and Materials Engineering*. Atlantis Press, 2019, pp. 79-85.
13. Kalyaev I.A., Kalyaev A.I., Korovin I.S. A Modified Method of Multiagent Resource Dispatching in a Heterogeneous Cloud Environment, *2019 International Conference on Electronical, Mechanical and Materials Engineering (ICE2ME 2019)*. Atlantis Press, 2019, pp. 72-78. DOI: 10.2991/ice2me-19.2019.17.
14. Gerasimov B.N., Morozov V.V., yakovleva N.G. Sistemy upravleniya: ponyatie, struktura, issledovanie [Management systems: concept, structure, research]. Samara SGAU, 2002.
15. Gorodetskiy V.I. Samoorganizatsiya i mnogoagentnye sistemy. I. Modeli mnogoagentnoy samoorganizatsii [Self-organization and multi-agent systems. I. Models of multi-agent self-organization], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2012, No. 2, pp. 92.
16. Legovich Yu.S., Maksimov D.Yu. Vybor ispolnitelya v gruppe intellektual'nykh agentov [Choosing a performer in a group of intelligent agents], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Managing large systems: a collection of works], 2015, No. 56.
17. Istomin V.V. Prognozirovaniye povedeniya grupp avtonomnykh intellektual'nykh agentov na osnove teorii mnogoagentnykh sistem [Predicting the behavior of groups of autonomous intelligent agents based on the theory of multi-agent systems], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2011, Vol. 18, No. 4.
18. Campbell A., Wu A.S. Multi-agent role allocation: issues, approaches, and multiple perspectives, *Auton. Agent. Multi. Agent. Syst.* Springer, 2011, Vol. 22, No. 2, pp. 317-355.
19. Gaaze-Rapoport M.G., Pospelov D.A. Ot ameby do robota: modeli povedeniya [From amoeba to robot: behavioral models]. Ripol Klassik, 1987, 150 p.
20. Conte R. et al. Sociology and social theory in agent based social simulation: A symposium // *Comput. Math. Organ. Theory*. Springer, 2001, Vol. 7, No. 3, pp. 183-205.

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

Калыев Анатолий Игоревич – Южный федеральный университет; e-mail: anatoly@kalyaev.net; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525666699; к.т.н.; зав. лабораторией.

Kalyaev Anatoly Igorevich – South Federal University; e-mail: anatoly@kalyaev.net; Taganrog, Russia; phone: +79525666699; cand. of eng. sc.; head of the laboratory.

УДК 004.056.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-21-31

В.А. Литвиненко, С.А. Ховансков, В.С. Хованскова

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛОЖНОГО РЕЗУЛЬТАТА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ВЫПОЛНЯЕМЫХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМОЙ

Рассматриваются вопросы защиты распределённых вычислений организованных на основе многоагентной системе для решения задач многовариантного моделирования. При моделировании выбор одного из многих вариантов может потребовать перебора огромного множества параметров недоступного для быстродействующей ЭВМ. Для сокращения времени решения таких задач используют распределенные вычисления. Существует множество различных подходов для организации распределенных вычислений в компьютерной сети – технология grid, metacomputing (BOINC, PVM и другие). Все они предназначены для создания централизованных систем распределенных вычислений. Распределенные вычисления органи-

зуются на основе многоагентной системы на вычислительных узлах любой компьютерной сети. При использовании в качестве вычислительной среды компьютерную сеть большого масштаба могут возникнуть угрозы безопасности распределенных вычислений. Одной из таких угроз является получение в процессе вычислений ложного результата от злоумышленников. Ложный результат может привести в процессе моделирования к принятию не оптимального, либо неправильного решения. Управляющие агенты централизованной системы распределенных вычислений, кроме управления распределенной системой, вынуждены выполнять обнаружение ложных результатов процесса вычислений. Разработана методика расчета вероятности обнаружения ложного результата в зависимости от общего количества агентов многоагентной системы и количества управляющих агентов. Приведены примеры расчета количества управляющих агентов, обеспечивающих в многоагентной системе требуемую вероятность обнаружения ложных результатов.

Распределенные вычисления; многоагентная система; защита результатов вычислений; сокращение времени решения; многовариантное моделирование.

V.A. Litvinenko, S.A. Khovanskov, V.S. Khovanskova

ESTIMATION OF THE PROBABILITY OF DETECTING A FALSE RESULT OF DISTRIBUTED CALCULATIONS PERFORMED BY A CENTRALIZED MULTI-AGENT SYSTEM

We consider the issues of protection of distributed computing organized on the basis of a multi-agent system for solving problems of multivariate modeling. When modeling, choosing one of the many options may require going through a huge set of parameters that are not available for a high-speed computer. Distributed computing is used to reduce the time needed to solve such problems. There are many different approaches for organizing distributed computing in a computer network: grid technology, metacomputing (BOINC, PVM, and others). All of them are intended for creating centralized distributed computing systems. Distributed computing is organized on the basis of a multi-agent system on the computing nodes of any computer network. When using a large-scale computer network as a computing environment, there may be security threats to distributed computing. One of these threats is getting a false result from hackers during calculations. A false result may lead to making an inappropriate or incorrect decision during the simulation process. Managing agents of a centralized distributed computing system, in addition to managing a distributed system, are forced to detect false results of the calculation process. A method has been developed for calculating the probability of detecting a false result depending on the total number of agents in a multi-agent system and the number of control agents. Examples of calculating the number of control agents that provide the required probability of detecting false results in a multi-agent system are given.

Distributed computing; multi-agent system; protection of computing results; reduction of solution time; multivariate modeling.

Введение. В настоящее время множество задач требуют выполнения большого объема вычислений за минимальное время. К ним относятся задачи моделирования. На практике задачи моделирования требуют выбора наилучших решений не по одному, а сразу по нескольким критериям (многокритериальные задачи оптимизации), которые приносят дополнительные и не всегда разрешимые трудности. Если объект и его параметры являются переменными, зависящими от времени, то в этом случае используются более сложные стратегии решения задач моделирования [1, 2, 9, 11–17].

Выбор одного из многих вариантов может потребовать перебора огромного числа параметров, недоступного даже для самой быстродействующей ЭВМ. Подсчитано, например, что при решении задачи распределения 20 критериев по 10 объектам число возможных вариантов составит 10^8 . Даже, если расчёт каждого варианта потребует всего 10 арифметических операций, то и тогда общее число расчётных операций достигнет миллиарда, что не может быть выполнено ЭВМ в приемлемые сроки.

Самым популярным решением этой проблемы в настоящее время является использование распределённых вычислений. В качестве вычислительной среды для организации распределенных вычислений используется глобальная компьютерная сеть, обладающая значительными вычислительными ресурсами. Главным недостатком использования глобальной сети являются существующие в ней угрозы информационной безопасности распределенных вычислений.

Постановка задачи. Основными задачами, решаемыми авторами было:

- ◆ создать методику, позволяющую оценить; уровень безопасности создаваемой вычислительной системы
- ◆ использовать в качестве вычислительных центров для решения конкретных вычислительных процессов узлы обычной масштабируемой компьютерной сети;
- ◆ распределенные вычисления организуются на основе централизованной многоагентной системы.

В то же время, создаваемая система должна быть работоспособной при любом наборе компьютеров, как по количеству, так и по производительности, обладать высокой живучестью – не терять работоспособность и выполнять решение за отведённые под задачу временные ресурсы при динамическом изменении используемой вычислительной среды [3, 5].

В качестве наиболее перспективного пути организации распределённых вычислений в компьютерной сети было выбрано использование централизованной многоагентной системы [4, 6, 18–23].

Под многоагентной системой понимается множество агентов, каждый из которых представляет программный модуль, размещенный на отдельном компьютере. Все агенты функционально делятся на 2 группы, в которых агенты каждой группы работают по одному и тому же алгоритму. Агенты первой группы выполняют управление своими компьютерами, и работа каждого не зависит от других компьютеров группы. Агент организует выполнение вычислительной нагрузки на своём компьютере, инициирует обмен данными с агентами второй группы управления, выполняет обработку полученной от них информации и на её основе принимает решения.

Для реализации и защиты распределенных вычислений в компьютерной сети агенты управления выполняют алгоритм, который позволяет организовать распределенную вычислительную систему на основе узлов любой компьютерной сети, взаимодействовать с агентами своей группы, собрать и обработать результаты работы агентов первой группы.

При организации распределенных вычислений в компьютерной сети большого масштаба велика вероятность нарушения безопасности вычислений со стороны злоумышленников [7, 8, 10]. Наиболее актуальным нарушением является включение в многоагентную систему одного или нескольких компьютеров с целью нарушения безопасности распределенных вычислений путем подмены результатов вычислений, полученных ими на ложные.

Методика расчёта вероятности обнаружения ложного результата в централизованной многоагентной системе. Отличительными чертами централизованной многоагентной системы является то, что помимо агентов, выполняющих заданную вычислительную нагрузку, есть управляющие агенты, которые распределяют нагрузку между агентами, расширяют многоагентную систему и следят за правильностью вычислений. Слежение за правильностью вычислений выполняется путем повторения вычисления какого-либо задания, которое было выполнено одним из управляемых агентов. Количество управляющих агентов в централизованной многоагентной системе может быть от одного до нескольких. Они получают результаты от агентов, выполняющих вычисления, и выборочно проверяют правильность их решения. Недостатком многоагентной системы явля-

ется то, что все результаты решений управляющие агенты проверить не могут, поскольку количество управляющих агентов намного меньше агентов, выполняющих вычисления [9].

Рассчитаем на конкретном примере вероятность обнаружения ложного результата для централизованной многоагентной системы. Расчёт выполним для многоагентной системы, состоящей из тысячи агентов, выполняющих вычисления, и одного управляющего агента. Допустим, что среди множества агентов, составляющих многоагентную систему, есть злоумышленники, каждый из которых передаёт ложные результаты вычислений. Управляющий агент из результатов, полученных от агентов, выбирает некоторые и проверяет их правильность путем повторения вычислений. Проверяемые результаты выбираются случайным образом, поскольку управляющий агент, обладая ограниченными вычислительными ресурсами, точно не знает, какой из агентов является злоумышленником.

Вероятность P_{olr} обнаружения одного ложного результата в централизованной многоагентной системе, который постоянно формирует злоумышленник, определяется по формуле Бернулли. Формула Бернулли позволяет определять вероятность появления определенного события при независимых условиях. Это говорит о том, что появление события в эксперименте не зависит от появления или не появления того же события в ранее проведенных или последующих испытаниях.

$$P_n(m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} \times p^m \times (1-p)^{n-m}, \quad (1)$$

где m – количество раз наступление события; p – вероятность, что событие произойдет; n – количество повторений эксперимента.

Для нашего случая количество повторений эксперимента n – это средняя вычислительная нагрузка kr на каждого агента. Она зависит от общего объёма вычислительной нагрузки W и количества агентов N в многоагентной системе M . Нагрузка kr рассчитывается по формуле:

$$n = kr = \frac{W}{N}, \quad (2)$$

где N – количество агентов в многоагентной системе M ; W – общий объём вычислительной нагрузки.

Вероятность наступления события в одном эксперименте определяется количеством агентов многоагентной системы:

$$p = \frac{1}{N}. \quad (3)$$

Для расчёта вероятности обнаружения ложного результата подставив в формулу (1) данные из формул (2) и (3) получим выражение (4).

$$P_{olr} = \frac{\left(\frac{W}{N}\right)!}{m! \times \left(\frac{W}{N} - m\right)!} \times \left(\frac{1}{N}\right)^m \times \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{\frac{W}{N} - m}, \quad (4)$$

где m – количество обнаруженных ложных результатов.

Поскольку злоумышленник может формировать ложные результаты для всей своей вычислительной нагрузки, то вероятность формирования им ложного результата $ko = 1$. Если вероятность формирования ложного результата $ko = 0,5$, это означает, что он формирует ложные результаты только для половины своей вычислительной нагрузки.

В соответствии со структурой многоагентной системы, для расчёта вероятности обнаружения ложного результата используется формула (5), отражающая зависимость вероятности от количества управляющих агентов и вероятности формирования ложных результатов злоумышленником:

$$p = \frac{b}{N} \times ko; \quad (5)$$

ko – вероятность формирования ложных результатов злоумышленником;
 b – количество управляющих агентов.

Подставим в формулу (4) вместо вероятности p , рассчитываемой по формуле (3), значение p , рассчитываемое по формуле (5):

$$P_{otr} = \frac{\left(\frac{W}{N}\right)!}{m! \times \left(\frac{W}{N} - m\right)!} \times \left(\frac{b}{N} \times ko\right)^m \times \left(1 - \frac{b}{N} \times ko\right)^{\frac{W}{N} - m}. \quad (6)$$

Построим графики вероятности обнаружения управляющим агентом ($b = 1$) хотя бы одного ложного результата ($m=1$) из передаваемых злоумышленником. Вероятности формирования ложных результатов злоумышленником $ko = 1$, $ko = 0.8$ и $ko = 0.6$ (рис. 1).

Расчёт выполнен для централизованной многоагентной системы с одним управляющим агентом. Количество заданий большеобъемной задачи $W=10000$ при различном количестве агентов N многоагентной системы от 100 до 1000. При анализе полученных графиков видно, что вероятность обнаружения хотя бы одного ложного результата управляющим агентом снижается с увеличением количества агентов системы. При количестве агентов $N=1000$ вероятность обнаружения хотя бы одного ложного результата составляет $P_{otr} = 0,005$. А при $N \rightarrow \infty$ вероятность $P_{otr} \rightarrow 0$. Это связано с тем, что при масштабировании многоагентной системы объем получаемых управляющим агентом результатов возрастает, и он оказывается не в состоянии за время выполнения распределенных вычислений проверить все результаты, передаваемые ему агентами многоагентной системы M .

На снижение вероятности обнаружения ложных результатов также влияет снижение вероятности формирования ложных результатов злоумышленником, поскольку в этом случае общее количество ложных результатов в многоагентной системе уменьшается, что приводит к снижению вероятности обнаружения ложных результатов управляющим агентом.

Аналогично рассчитывается вероятность обнаружения управляющим агентом хотя бы двух ложных результатов при одном злоумышленнике, аналогично трех и четырех (P_{otr2} , P_{otr3} , P_{otr4}). В формулу (4) подставляем $m=2,3,4$.

Вероятности P_{otr2} , P_{otr3} , P_{otr4} обнаружения управляющим агентом ложных результатов при одном злоумышленнике и $ko = 1$ показаны на рис. 2.

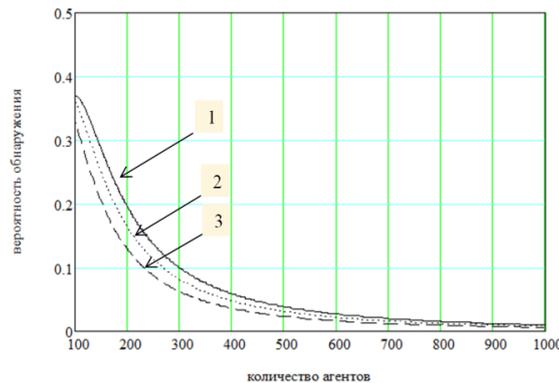


Рис. 1. Вероятности обнаружения хотя бы одного ложного результата в централизованной многоагентной системе, которые формируются злоумышленником с вероятностями: 1) $ko=1$; 2) $ko=0.8$; 3) $ko=0.6$

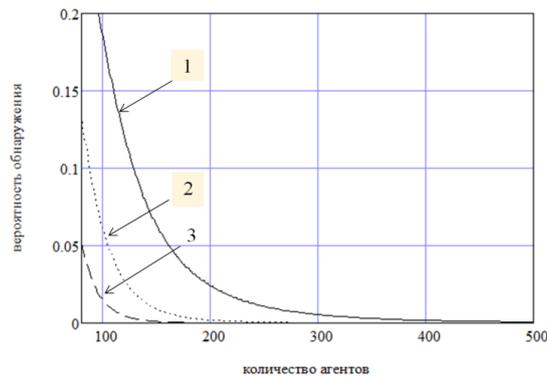


Рис. 2. Вероятности обнаружения: 1) для 2; 2) для 3 и 3) для 4 ложных результатов в централизованной многоагентной системе из тех которые формируются злоумышленником с вероятностями $k_0 = 1$.

Сравнив графики на рисунках (см. рис. 1, 2), можно сделать вывод, что в централизованной многоагентной системе вероятность обнаружения нескольких ложных результатов снижается с увеличением количества ложных результатов, которые должен обнаружить управляющий агент.

Используя формулу (4), рассчитаем вероятность найти хотя бы один ложный результат управляющим агентом в централизованной многоагентной системе при разном количестве злоумышленников – одним; двумя; тремя.

$$P_{otr} = \frac{\left(\frac{W}{N}\right)!}{m! \times \left(\frac{W}{N} - m\right)!} \times \left(\frac{z}{N}\right)^m \times \left(1 - \frac{z}{N}\right)^{\frac{W}{N} - m}, \quad (7)$$

где z – количество злоумышленников.

Результаты расчётов вероятности обнаружения ложных результатов по формуле (7) приведены на рис. 3.

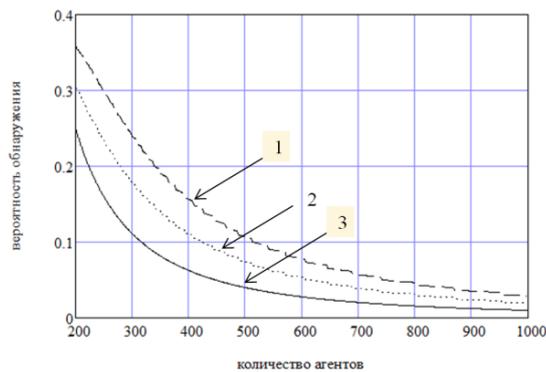


Рис. 3. Вероятности обнаружения хотя бы одного ложного результата в централизованной многоагентной системе, который формируется злоумышленниками: 1) тремя; 2) двумя; 3) одним

Увеличение количества злоумышленников в многоагентной системе приводит к увеличению вероятности обнаружения, хотя бы одного ложного результата, в многоагентной системе управляющим агентом. Это связано с тем, что доля лож-

ных результатов в общем объеме вычислений увеличивается, однако при увеличении количества агентов вероятность обнаружения, хотя бы одного ложного результата, стремится к 0 аналогично случаю, показанному на рисунке (см. рис. 1).

Теперь рассмотрим вероятность обнаружения ложных результатов в централизованной многоагентной системе, имеющей несколько управляющих агентов. Рассчитаем вероятность при 1, 2, 3 и 4 управляющих агентах.

Формула расчёта вероятности обнаружения хотя бы одного ложного результата при нескольких управляющих агентах, исходя из (4), будет иметь вид:

$$P_{otr} = \frac{\left(\frac{W \times U}{N}\right)}{m! \times \left(\frac{W \times U}{N} - m\right)} \times \left(\frac{1}{N}\right)^m \times \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{\frac{W \times U}{N} - m}, \quad (8)$$

где U – количество управляющих агентов в многоагентной системе M .

Значение вероятностей обнаружения ложного результата нескольких управляющих агентов, рассчитанных по формуле (8), приведены на рис. 4.

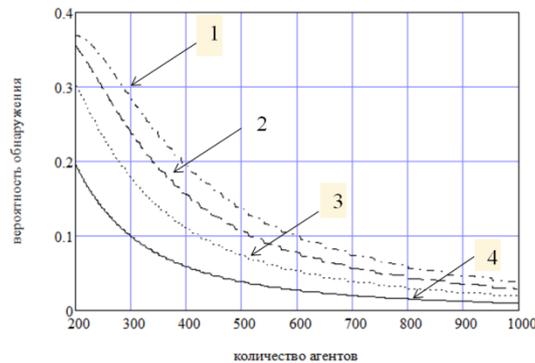


Рис. 4. Вероятности обнаружения, хотя бы одного ложного результата, в централизованной многоагентной системе с управляющими агентами: 1) четырьмя; 2) тремя; 3) двумя; 4) одним

Из этого графика (см. рис. 4) видно, что вероятность обнаружения, хотя бы одного ложного результата, повышается с увеличением количества управляющих агентов. Это значит, что при достаточном количестве управляющих агентов вероятность обнаружения ложных результатов можно повысить до приемлемого значения.

Заключение. Такой метод оценки позволяет оценить вероятность обнаружения ложных результатов, передаваемых злоумышленниками агентам второй группы многоагентной системы. Задавая уровень защиты от ложного результата в виде вероятности обнаружения этой угрозы и количество используемых агентов первой группы обнаружения ложного результата и зная количество агентов первой группы можно, используя предлагаемую методику, рассчитать оптимальное количество агентов второй группы, способное обеспечивать требуемый уровень защиты.

Необходимо отметить, что увеличение количества агентов второй группы приводит к снижению уровня безопасности организуемой централизованной системы распределенных вычислений. При атаке на одного из управляющих агентов произойдет нарушение работы организованных им распределенных вычислений. А это значит, что с точки зрения обеспечения «живучести» распределенных вычислений, увеличение количества управляющих агентов приведет к повышению уязвимости системы от атаки типа «отказ в обслуживании». Это является основным недостатком централизованной многоагентной системы.

Помимо этого, увеличение количества управляющих агентов может привести к снижению эффективности применения многоагентной системы для организации распределенных вычислений, поскольку потребуется усложнение алгоритма взаимодействия управляющих агентов между собой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобашев Д.Г., Ховансков С.А. Организация распределенных вычислений в иерархической вычислительной структуре // Теория и практика современной науки. – 2016. – № 6-1 (12). – С. 748-750.
2. Литвиненко В.А., Ховансков С.А., Хованскова В.С., Литвиненко Е.В. Применение параметрической адаптации в алгоритмах построения ортогонального дерева Штейнера // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2016. – № 4 (28). – С. 9-16.
3. Ховансков С.А., Румянцев К.Е., Хованскова В.С. Алгоритм программного модуля децентрализованной системы управления для создания безопасных распределенных вычислений в неустойчивой вычислительной среде // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 12 (149). – С. 247-253.
4. Madkour A.M., Eassa F.E., Ali A.M., Qayyum N.U. Mobile-Agent-Based Systems Against Malicious Hosts // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 29 (2). – P. 287-297.
5. Muñoz A., Pablo A., Maña. A Multiagent Systems Protection // Advances in Software Engineering. – 2011. – Article ID 281517. – 9 p. – DOI: 10.1155/2011/281517.
6. Xudong G., Yiling Ya., Yinyuan Y. POM-a mobile model against malicious hosts // Proceedings of High Performance Computing in the Asia-Pacific Region. – 2000. – Vol. 2. – P. 1165-1166.
7. Литвиненко В.А., Ховансков С.А., Хованскова В.С. Алгоритм организации безопасных распределенных вычислений на основе многоагентной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 10 (183). – С. 146-158.
8. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Защита от атак на повышение привилегий // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 1. – С. 36-42.
9. Литвиненко В.А., Ховансков С.А., Хованскова В.С. Оценка сокращения времени построения связывающих деревьев цепей с помощью распределённой вычислительной системы // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2016. – № 4 (28). – С. 34-42.
10. Капустян С.Г., Мельник Э.В. Технология организации отказоустойчивого функционирования распределенных информационно-управляющих систем сложных технических объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2010. – № 4 (70). – С. 33-41.
11. Чернышев Ю.О., Литвиненко В.А., Ховансков С.А., Литвиненко Е.В. Методы управления точностью решения экстремальных задач на графах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 84-91.
12. Чернышев Ю.О., Венцов Н.Н. К вопросу о построении деревьев Штейнера с различной шириной ветвей для связывания элементов трехмерных СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 4 (93). – С. 72-76.
13. Варенцов П.Е., Матвеева Е.В., Глозитейн А.М., Малашкевич И.А. Имитационное моделирование неравномерного входящего трафика для исследования эффективности коммутационных структур // Россия в пространстве глобальных трансформаций: в фокусе наук о человеке, обществе, природе и технике: Матер. международной междисциплинарной научной конференции. Составитель, ответственный и научный редактор сборника В.П. Шалаев. – 2016. – С. 357-358.
14. Котенко В.В. Эффективность виртуального помехоустойчивого кодирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 9 (182). – С. 15-26.
15. Klochko A., Zhila V. Solving problems of distribution network tracing: example of gas distribution using the search optimization methodology // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 692. – P. 615-624.
16. Курейчик В.В., Тимашков Д.И. Имитационная модель оценки уровня компетентности на основе сетей Петри // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 226-231.

17. Лебедев Б.К., Воронин Е.И. Генетический алгоритм распределения соединений по слоям при многослойной глобальной трассировке СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 14-21.
18. Норкин О.Р., Федоров И.Д. Мультиагентность в распределённых вычислениях // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2016): Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Южный федеральный университет; Редакционная коллегия: Финаев В.И., Косенко Е.Ю., Шестова Е.А., – 2016. – С. 261-265.
19. Библев Д.В., Федоров И.Д. Мультиагентные интеллектуальные системы и обработка web-информации // XIX Всероссийская студенческая научно-практическая конференция Нижневартского государственного университета: Сб. статей. – 2017. – С. 184-186.
20. Kotenko V.V., Polyakov A.I. Virtual immediate coding // International Journal of Engineering and Technology(UAE). – 2018. – Vol. 7, No. 3.13 Special Issue 13. – P. 14-16.
21. Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю., Запорожец Ю.Ю. Подсистема распределенного решения оптимизационных задач // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 57-68.
22. Распопов С.В., Василенко Р.И. Подход к управлению ресурсами распределенной вычислительной системы // Информационные системы и технологии: фундаментальные и прикладные исследования: Сб. статей I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов. – 2016. – С. 26-29.
23. Конолов С.Г., Левчегов О.Н. Использование распределенных вычислений для моделирования процессов регионального развития в динамически-изменяемой среде // Устойчивое и инновационное развитие регионов России в условиях глобальных трансформаций: Матер. международной научно-практической конференции. Липецкий филиал Финансового университета при Правительстве РФ. – 2015. – С. 170-175.

REFERENCES

1. Lobashev D.G., Khovanskov S.A. Organizatsiya raspredelennykh vychisleniy v ierarkhicheskoy vychislitel'noy strukture [Organization of distributed computing in a hierarchical computing structure], *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and practice of modern science], 2016, No. 6-1 (12), pp. 748-750.
2. Litvinenko V.A., Khovanskov S.A., Khovanskova V.S., Litvinenko E.V. Primenenie parametricheskoy adaptatsii v algoritmakh postroeniya ortogonal'nogo dereva Shteynera [Application of parametric adaptation in algorithms for constructing an orthogonal Steiner tree], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Computer science, computer engineering and engineering education], 2016, No. 4 (28), pp. 9-16.
3. Khovanskov S.A., Rumyantsev K.E., Khovanskova V.S. Algoritm programmnoy modulya detsentralizovannoy sistemy upravleniya dlya sozdaniya bezopasnykh raspredelennykh vychisleniy v neustoychivoy vychislitel'noy srede [Algorithm of the software module of a decentralized control system for creating secure distributed computing in an unstable computing environment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 12 (149), pp. 247-253.
4. Madkour A.M., Eassa F.E., Ali A.M., Qayyum N.U. Mobile-Agent-Based Systems Against Malicious Hosts, *World Applied Sciences Journal*, 2014, Vol. 29 (2), pp. 287-297.
5. Muñoz A., Pablo A., Maña. A Multiagent Systems Protection, *Advances in Software Engineering*, 2011, Article ID 281517, 9 p. DOI: 10.1155/2011/281517.
6. Xudong G., Yiling Ya., Yinyuan Y. POM-a mobile model against malicious hosts, *Proceedings of High Performance Computing in the Asia-Pacific Region*, 2000, Vol. 2, pp. 1165-1166.
7. Litvinenko V.A., Khovanskov S.A., Khovanskova V.S. Algoritm organizatsii bezopasnykh raspredelennykh vychisleniy na osnove mnogoagentnoy sistemy [Algorithm for organizing secure distributed computing based on a multi-agent system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 10 (183), pp. 146-158.
8. Shcheglov K.A., Shcheglov A.Yu. Zashchita ot atak na povyshenie privilegii [Protection from privilege escalation attacks], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2015, No. 1, pp. 36-42.
9. Litvinenko V.A., Khovanskov S.A., Khovanskova V.S. Otsenka sokrashcheniya vremeni postroeniya svyazyvayushchikh derev'ev tsepey s pomoshch'yu raspredelennoy vychislitel'noy sistemy [Estimation of time reduction in the construction of linking chain trees using a distributed computing system], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, computer engineering and engineering education], 2016, No. 4 (28), pp. 34-42.

10. Kapustyan S.G., Mel'nik E.V. Tekhnologiya organizatsii otkazoustoychivogo funktsionirovaniya raspredelennykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov [Technology of organization of fault-tolerant functioning of distributed information and control systems of complex technical objects], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information technologies], 2010, No. 4 (70), pp. 33-41.
11. Chernyshev Yu.O., Litvinenko V.A., Khovanskov S.A. Litvinenko E.V. Metody upravleniya tochnost'yu resheniya ekstremal'nykh zadach na grafakh [Methods for controlling the accuracy of solving extreme problems on graphs], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 84-91.
12. Chernyshev YU.O., Ventsov N.N. K voprosu o postroenii dere'vev SHteynera s razlichnoy shirinoy vetvey dlya svyazyvaniya elementov trekhmernykh SBIS [On the construction of Steiner trees with different branch widths for linking elements of three-dimensional VLSI], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 4 (93), pp. 72-76.
13. Varentsov P.E., Matveeva E.V., Glozhteyn A.M., Malashkevich I.A. Imitatsionnoe modelirovanie neravnomernogo vkhodyashchego trafika dlya issledovaniya effektivnosti kommutatsionnykh struktur [Simulation modeling of uneven incoming traffic for the study of the effectiveness of com-mutational structures], *Rossiya v prostranstve global'nykh transformatsiy: v fokuse nauk o cheloveke, obshchestve, prirode i tekhnike: Mater. mezhdunarodnoy mezhdistsiplinarnoy nauchnoy konferentsii. Sostavitel', otvetstvennyy i nauchnyy redaktor sbornika V.P. Shalaev* [Russia in the space of global transformations: in the focus of the sciences of man, society, nature and technology: Proceedings of the International interdisciplinary scientific conference. The compiler, responsible and scientific editor of the collection V.P. Shalaev], 2016, pp. 357-358.
14. Kotenko V.V. Effektivnost' virtual'nogo pomexoustoychivogo kodirovaniya [The effectiveness of virtual noise-resistant coding], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 9 (182), pp. 15-26.
15. Klochko A., Zhila V. Solving problems of distribution network tracing: example of gas distribution using the search optimization methodology, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, Vol. 692, pp. 615-624.
16. Kureychik V.V., Timashkov D.I. Imitatsionnaya model' otsenki urovnya kompetentnosti na osnove setey Petri [Simulation model for assessing the level of competence based on Petri nets], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 226-231.
17. Lebedev B.K., Voronin E.I. Geneticheskii algoritm raspredeleniya soedineniy po sloyam pri mnogoslonoynoy global'noy trassirovke SBIS *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 14-21.
18. Norkin O.R., Fedorov I.D. Mul'tiagentnost' v raspredelennykh vychisleniyakh [Multiagency in distributed computing], *Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie (ITSAU-2016): Cb. trudov KhIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. Yuzhnyy federal'nyy universitet; Redaktsionnaya kollegiya: Finaev V.I., Kosenko E.Yu., Shestova E.A.* [Information Technologies, System Analysis and Management (ITSAU-2016): Proceedings of the XIV All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students. Southern Federal University; Editorial Board: Finaev V.I., Kosenko E.Yu., Shestova E.A.], 2016, pp. 261-265.
19. Biblev D.V., Fedorov I.D. Mul'tiagentnye intellektual'nye sistemy i obrabotka web-informatsii [Multi-agent intelligent systems and web-information processing], *XIX Vserossiyskaya studencheskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta. sbornik statey* [XIX All-Russian Student scientific and practical conference of Nizhnevartovsk State University. collection of articles], 2017, pp. 184-186.
24. Kotenko V.V., Polyakov A.I. Virtual immediate coding, *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 2018, Vol. 7, No. 3.13 Special Issue 13, pp. 14-16.
20. Kotenko V.V., Polyakov A.I. Virtual immediate coding, *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 2018, Vol. 7, No. 3.13 Special Issue 13, pp. 14-16.
21. Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu., Zaporozhets Yu.Yu. Podsystema raspredelennogo resheniya optimizatsionnykh zadach [Subsystem of distributed solution of optimization problems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2 (204), pp. 57-68.

22. *Raspopov S.V., Vasilenko R.I. Podkhod k upravleniyu resursami raspredelennoy vychislitel'noy sistemy [An approach to resource management of a distributed computing system], Informatsionnye sistemy i tekhnologii: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: Sb. statey I Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrantov i studentov [Information systems and technologies: fundamental and applied research: Collection of articles of the I All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates, Undergraduates and Students], 2016, pp. 26-29.*
23. *Konoplev S.G., Levchegov O.N. Ispol'zovanie raspredelennykh vychisleniy dlya modelirovaniya protsessov regional'nogo razvitiya v dinamicheski-izmenyaemoy srede [The use of distributed computing for modeling regional development processes in a dynamically changing environment], Ustoychivoe i innovatsionnoe razvitiye regionov Rossii v usloviyakh global'nykh transformatsiy: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Lipetskiy filial Finansovogo universiteta pri Pravitel'stve RF [Sustainable and innovative development of Russian regions in the context of global transformations: Materials of the international scientific and practical conference. Lipetsk branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation], 2015, pp. 170-175.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.О. Чернышев.

Литвиненко Василий Афанасьевич – Южный федеральный университет; e-mail: litv_va@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Ховансков Сергей Андреевич – e-mail: sah59@mail.ru; тел.: 88634676616; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; доцент.

Хованскова Вера Сергеевна – e-mail: bepok2010@gmail.com; тел.: 88634676616; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; аспирантка.

Litvinenko Vasily Avanasjevich – Southern Federal University;; e-mail: litv_va@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

Khovanskov Sergey Andreevich –e-mail: sah59@mail.ru; phone: +78634676616; the department of information security of telecommunication systems, associate professor.

Khovanskova Vera Sergeevna – e-mail: bepok2010@gmail.com; phone: +78634676616; the department of information security of telecommunication systems; postgraduate student.

УДК 004.272

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-31-41

Д.Ю. Кравченко, Ю.А. Кравченко, В.В. Марков, А.Э. Саак
БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ
ДЛЯ ДИСПЕТЧИРОВАНИЯ В ГРИД-СИСТЕМАХ*

Статья посвящена решению задачи диспетчирования распределенных вычислительных ресурсов на основе их классификации методом биоинспирированного поиска для повышения эффективности функционирования грид-систем. Актуальность задачи обоснована значительным ростом востребованности парадигмы распределенных вычислений в условиях информационного переполнения и неопределенности. В статье рассмотрены проблемы диспетчирования гетерогенных вычислительных ресурсов при решении сложных профессиональных и научных задач, поступающих в различные моменты времени, на основе классификации по значимым признакам соответствия и готовности ресурса. Проведен сравнительный обзор существующих аналогов. Сформулирована постановка решаемой задачи в

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 20-01-00148 и 19-07-00099.

контексте выбранной тематики исследования. Обоснована стратегия выбора биоинспирированного моделирования для решения поставленной задачи. Проанализированы аспекты эффективности применения различных децентрализованных биоинспирированных методов. Предложено решать задачу диспетчирования вычислительных ресурсов на основе определения соответствия ресурса необходимому классу. Классификация проводится на основе применения биоинспирированного метода оптимизации, построенного на основе алгоритма поиска косяком рыб. Использование популяционного биоинспирированного метода позволяет обеспечить беспрецедентный параллелизм получения альтернативных решений и оптимизировать распределение имеющихся вычислительных ресурсов в зависимости от наборов значимых признаков. Объектом исследования являются процессы классификации данных, включающие в себя упорядоченные последовательности действий, направленных на распределение вычислительных ресурсов по классам решаемых задач. Предметом исследования являются биоинспирированные методы решения задачи классификации данных в грид-системах. Для оценки эффективности предложенного метода разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент с разным количеством сформированных классов вычислительных ресурсов. Каждый вычислительный ресурс имеет определенный набор атрибутов, являющийся вектором его признаков. Косинусная мера сходства вектора признаков ресурса и вектора признаков определенного класса является критерием классификации. Для повышения качества процесса диспетчирования задача классификации вычислительных ресурсов решена для множества вариантов организации потоков сложных решаемых задач в грид-системах. Полученные количественные оценки демонстрируют экономию времени при решении задач диспетчирования распределенных вычислительных ресурсов на основе их классификации методом биоинспирированного поиска не менее 7%. Временная сложность в рассмотренных примерах составила $O(n^2)$. Описанные исследования имеют высокий уровень теоретической и практической значимости и напрямую связаны с решением классических задач искусственного интеллекта.

Диспетчирование; параллельные вычисления; grid-системы; распределенные вычислительные ресурсы; биоинспирированный поиск; популяционные методы; децентрализованный поиск.

D.Yu. Kravchenko, Yu.A. Kravchenko, V.V. Markov, A.E. Saak

BIOINSPIRED METHOD FOR CLASSIFICATION OF DISTRIBUTED RESOURCES FOR DISPATCHING IN GRID-COMPUTING

The article is devoted to solving the problem of scheduling distributed computing resources based on their classification by the bioinspired search method to improve the efficiency of grid-computing functioning. The relevance of the problem is justified by a significant increase in the demand for the paradigm of distributed computing in conditions of information overflow and uncertainty. The article deals with the problems of scheduling heterogeneous computing resources when solving complex professional and scientific problems arriving at different points in time, based on the classification according to significant signs of resource compliance and readiness. A comparative review of existing analogues is carried out. The formulation of the problem to be solved in the context of the selected research topic is formulated. The strategy of choosing bioinspired modeling for solving the problem has been substantiated. The aspects of various decentralized bioinspired methods effectiveness of the use are analyzed. It is proposed to solve the problem of scheduling computational resources based on determining the correspondence of the resource to the required class. The classification is carried out on the basis of the bioinspired optimization method application, built on the basis of the Fish School Search algorithm. The use of the population bioinspired method allows us to provide unprecedented parallelism in obtaining alternative solutions and to optimize the distribution of available computing resources depending on the sets of significant features. The object of the research is the processes of data classification, which include ordered sequences of actions aimed at the distribution of computing resources by classes of problems to be solved. The subject of the research is bioinspired methods for solving the problem of data classification in grid-computing. To evaluate the effectiveness of the proposed method, a software application was developed and a computational experiment was carried out

with a different number of computing resources generated classes. Each computing resource has a certain set of attributes, which is a vector of its features. The cosine measure of the similarity between a resource attributes vector and a certain class attributes vector is a classification criterion. To improve the quality of the dispatching process, the task of classifying computing resources is solved for a variety of options for organizing the flows of complex tasks to be solved in grid-computing. The obtained quantitative estimates demonstrate the time savings in solving the problems of scheduling distributed computing resources based on their classification by the bioinspired search method at least 7 %. The time complexity in the considered examples was $O(n^2)$. The described studies have a high level of theoretical and practical significance and are directly related to the solution of artificial intelligence classical problems.

Dispatching; parallel computing; grid-computing; distributed computing resources; bioinspired search; population methods; decentralized search.

Введение. В настоящее время проблема эффективного диспетчирования с оптимизацией распределения используемых вычислительных ресурсов до конца не решена. Не предложен формальный аппарат среды диспетчирования, который позволит выявить закономерности распределения ресурсов, провести их классификацию и предложить эффективные методы решения данных задач, обеспечивающие параллелизм выполнения и оптимальное использование вычислительных ресурсов. Разработка такого формального аппарата является актуальной задачей.

От эффективности метода распределения вычислительных ресурсов зависит надежность и быстродействие всей грид-системы в целом. Например, неоптимальное распределение вычислительных ресурсов всегда влечет за собой риск выхода информационного процесса из активной фазы вычислений и перевода в состояние ожидания на неопределенное время. Такое событие, называемое «отстранением», является следствием возникновения ошибок в оперативном диспетчировании распределенных вычислительных ресурсов. Группировка гетерогенных вычислительных ресурсов постоянно меняет свой количественный и качественный состав. Когда информационные процессы используют несколько вычислительных ресурсов, возможны следующие нежелательные последствия [1–7]:

1. Неопределенная по времени взаимная блокировка нескольких информационных процессов, каждый из которых ждет появления свободных вычислительных ресурсов. Избыточное число запросов на некоторые классы гетерогенных вычислительных ресурсов приводит к ухудшению качества системы в целом;

2. «Живая» блокировка представляет собой явление, когда один информационный процесс получил доступ какому-либо вычислительному ресурсу, но из-за отсутствия других ресурсов находится в режиме ожидания, тем самым переводя в режим ожидания другие информационные процессы, стоящие в очереди на получение доступа к данному ресурсу.

Учитывая наличие изменений состава гетерогенных вычислительных ресурсов в динамике, решение задачи предварительной классификации ресурсов по ряду значимых для текущих информационных процессов признаков повысит эффективность процедур диспетчирования в грид-системах [8–10]. В данной статье при разработке метода классификации распределенных вычислительных ресурсов для диспетчирования в грид-системах предлагается использовать биоинспирированный алгоритм поиска косяком рыб, имеющий ряд преимуществ перед другими методами классификации, например, перед такими как – наивный Байесовский классификатор или метод k -средних. Среди основных преимуществ биоинспирированных алгоритмов отмечается децентрализованная схема параллельного поиска решений и наличие процедур диверсификации пространства решений для выхода из локальных оптимумов.

1. Постановка задачи. Представим постановку задачи классификации для диспетчирования в грид-системах на основе применения признакового описания распределяемых вычислительных ресурсов в векторном виде.

Предположим, что имеется N вычислительных ресурсов, каждый из которых представлен M признаками. Признаки пронумерованы счетчиком m ($m = 1, \dots, M$), а ресурсы счетчиком n ($n = 1, \dots, N$). Имеется K наименований классов решаемых грид-системой задач, к которым необходимо отнести распределяемые ресурсы. Каждый класс так же как и ресурс задан M признаками. Признаки классов пронумерованы счетчиком m ($m = 1, \dots, M$) соответственно, а классы – счетчиком k ($k = 1, \dots, K$). Для ресурса с номером n обозначено через $x_{m,n}$ – значение признака m , а через $y_{m,k}$ – значение целевого признака m для класса k . Тогда постановка задачи классификации распределенных вычислительных ресурсов будет выглядеть следующим образом. Рассмотрим ресурс \vec{X}_n и класс решаемых задач \vec{Y}_k :

$$\vec{X}_n = (x_{1,n}, x_{2,n}, \dots, x_{M,n}); \quad (1)$$

$$\vec{Y}_k = (y_{1,k}, y_{2,k}, \dots, y_{M,k}). \quad (2)$$

Скалярное произведение векторов и косинус угла θ между ними связаны следующим соотношением:

$$(\vec{X}_n, \vec{Y}_k) = \|\vec{X}_n\| \cdot \|\vec{Y}_k\| \cdot \cos(\angle(\vec{X}_n, \vec{Y}_k)); \quad (3)$$

$$\|\vec{X}_n\| = \sqrt{x_{1,n}^2 + x_{2,n}^2 + \dots + x_{M,n}^2}; \quad (4)$$

$$\|\vec{Y}_k\| = \sqrt{y_{1,k}^2 + y_{2,k}^2 + \dots + y_{M,k}^2}. \quad (5)$$

Расстояние между рассматриваемым ресурсом и классом задач определяется следующим выражением:

$$\|\vec{X}_n - \vec{Y}_k\| = \sqrt{(x_{1,n} - y_{1,k})^2 + (x_{2,n} - y_{2,k})^2 + \dots + (x_{M,n} - y_{M,k})^2}. \quad (6)$$

Введено пороговое значение Δ максимального расстояния, превышение которого исключает возможность использования ресурса \vec{X}_n для решения задач класса \vec{Y}_k . Для представленного случая оптимизационная задача классификации примет следующий вид:

$$Y^* = \arg \min_k \|\vec{X}_n - \vec{Y}_k\|; \quad (7)$$

$$\begin{cases} \|\vec{X}_n - \vec{Y}^*\| \leq \Delta, Y^* - \text{определен для } \vec{X}_n \\ \text{otherwise, } \vec{X}_n - \text{не классифицирован} \end{cases} \quad (8)$$

Предложенная постановка задачи задает целевую функцию, минимизация которой позволяет уменьшить число случаев блокировки гетерогенных вычислительных ресурсов, благодаря проведению предварительной классификации для построения классов применяемых ресурсов, наиболее соответствующих определенных типам решаемых информационными процессами задач.

2. Разработка метода классификации вычислительных ресурсов на основе алгоритма биоинспирированной оптимизации. Для нахождения минимального расстояния между ресурсом и классом решаемых задач используется косинусная мера сходства. Поиск квазиоптимального решения предложено проводить с помощью метаэвристического алгоритма поиска косяком рыб [11].

В алгоритме поиска косяком рыб каждая особь является реактивным агентом, обладающим собственной памятью, где хранится информация о его весе и лучшем положении или текущем векторе решений в поисковом пространстве, т.е. области допустимых решений. Данная особенность разработанного алгоритма позволяет

отказаться от необходимости искать и фиксировать глобально лучшие решения. Разработанный алгоритм поиска косяком рыб соответствует следующим правилам [11, 12]:

- ◆ этапами алгоритма являются операторы кормления и плавания, которые применяются ко всей популяции;
- ◆ процесс кормления в алгоритме моделирует решение задачи оптимизации с целевой функцией $f(x)$. Вес рыбы ω_i рассчитывается как разница между значениями целевой функции на текущем и предыдущем шаге. Алгоритм предусматривает, что у каждой отдельной рыбы вес ограничивается свободным параметром ω_{max} и оценивается один раз в каждом цикле алгоритма;
- ◆ этап плавания представляет собой процесс миграции агентов с шагом $\gamma(t)$, что является взвешенной суммой индивидуальных перемещений, направленных на подражание коллективному движению рыб. Процесс плавания управляется кормлением и состоит из последовательных процессов индивидуального, коллективно-инстинктивного и коллективно-волевого движения.

Схема индивидуального перемещения рыбы представлена на рис. 1. Рыба показана окружностью, и чем больше радиус окружности, тем более подходящим является местоположение рыбы. На этом рисунке рыба X_i ищет наиболее подходящее местоположение в своем рое и случайным образом с равномерным распределением выбирает координаты одной из соседних особей. Следующей позицией этой рыбы, если произошло улучшение значения целевой функции, будет точка в 2D-квадратном пространстве назначения, где центром этого пространства является выбранное местоположение, выделенное на рис. 1 «жирным» контуром. После вычисления местоположения Y сначала проверяются все его параметры, чтобы проверить, находится ли оно в области поиска. Если какой-либо из параметров находится вне этой области, он будет установлен в ее границах. После изменения несоответствующих параметров Y будет оценено значение пригодности данного местоположения, и если новое положение ближе к целевой функции, чем исходное, агент переместится в положение Y_i , в противном случае агент-рыба продолжит индивидуальный поиск.

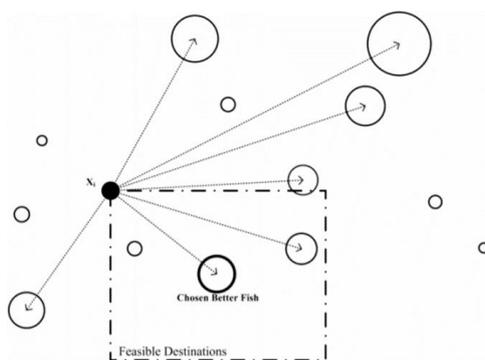


Рис. 1. Схема индивидуального перемещения агента

Для минимизации функции потерь при построении матрицы отношений ресурсов и классов и определения прогноза оценки распределения используется среднеквадратичная ошибка обучения – Root Mean Square Error (RSME) [11–13].

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{x,y} |(\hat{r}_{x,y} - r_{x,y})^2|}, \quad (9)$$

где $\widehat{r}_{x,y}$ и $r_{x,y}$ – прогнозируемые и наблюдаемые оценки распределения ресурсов X по классам Y соответственно, k – число контрольных точек. Прогнозируемое значение определяется следующим образом:

$$\widehat{r}_{x,y} = X_i^T Y_j \text{ и } \widehat{r}_{x,y} = \langle X_i, Y_j \rangle \quad (10)$$

Размер популяции поисковых агентов S и их позиции $q_i(x, y) \in X \times Y$ задаются случайным образом. Начальное значение веса агента ω_i задается согласно следующей формуле:

$$\omega_{i,j} = 1 + \eta |r_{x,y} - \widehat{r}_{x,y}|, \quad (11)$$

где η – коэффициент сглаживания.

Соседняя позиция q'_i рассчитывается с учетом вероятности распределения ρ на интервале $[-1, 1]$ как:

$$q'_i(t) = q_i(t) + \rho \cdot h_{ind}(t). \quad (12)$$

Индивидуальное плавание создает новую позицию для дальнейшего исследования. Вычисление шага миграции производится согласно следующей формуле:

$$h_{ind}(t+1) = h_{ind}(t) - \frac{(h_i - h_f)}{t_{max}}, \quad (13)$$

где h_{ind} – шаг перемещения, который является равномерно распределенной величиной в интервале $[h_i=0; h_f]$, $h_f = t_{max}$, максимальному номеру итерации алгоритма.

Оператор кормления обновляет вес агента ω_i на каждой итерации. Изменение веса рассчитывается на основе значения пригодности с учетом изменений значений целевой функции текущей и соседней позиций $\Delta f_i(t)$ согласно:

$$\Delta f_i(t) = f[q'_i(t)] - f[q_i(t)]. \quad (14)$$

Расчет веса в новом положении происходит по следующей формуле:

$$\omega_i(t+1) = \frac{\omega_i(t) + \Delta f_i(t)}{\max[\Delta f(t)]}. \quad (15)$$

С точки зрения оптимизации на данном этапе проверяется, находится ли точка в области допустимых значений и лучше ли в этой точке значение целевой функции [11–13]. Коллективно-инстинктивное плавание реализуется после завершения индивидуальных перемещений всеми агентами. Смещение движения определяется по формуле, представленной ниже:

$$\gamma(t) = \frac{\sum_{i=1}^S \Delta q_i(t) \Delta f_i(t)}{\sum_{i=1}^S \Delta f_i(t)}, \quad (16)$$

где $\Delta q_i(t) = q'_i(t) - q_i(t)$ – это индивидуальное движение рыбы в течение одной итерации. Данное уравнение показывает, что шаг миграции максимально зависит от влияния наиболее эффективных агентов в косяке, которые имеют успешные индивидуальные перемещения. После выполнения миграции позиции косяка обновляются согласно $q'_i(t+1) = q_i(t) + \gamma(t)$.

Далее для корректировки позиции рыб выполняется коллективно-волевое плавание. На этом этапе происходит смещение всех агентов в направлении текущего центра тяжести популяции $B(t)$. Если стая рыб набирает вес, т.е. происходит успех поиска, тогда все агенты смещаются в $B(t)$, а если теряет вес, тогда – в противоположном от центра тяжести направлении. Данный центр тяжести вычисляется по следующей формуле:

$$B(t) = \frac{\sum_{i=1}^S \Delta q_i(t) \omega_i(t)}{\sum_{i=1}^S \omega_i(t)}. \quad (17)$$

Коллективно-волевое движение выполняется по формуле:

$$q'_i(t + 1) = q_i(t) \pm V_{vol} \text{rand}[0, 1] \cdot (q_i(t) - B(t)), \quad (18)$$

где V_{vol} определяет размер шага перемещений агентов и является случайной величиной.

Когда проанализированы все агенты, вычисляется значение RSME, к каждому из агентов применяется новое вычисленное местоположение с заданной вероятностью и происходит расчет целевой функции. Условием окончания работы алгоритма является свободный параметр количества итераций t .

Разработанный авторами метод классификации распределенных вычислительных ресурсов для диспетчирования в грид-системах реализует предложенный алгоритм в структуре информационных процессов, предложенной в [7] и проиллюстрированной на рис. 2.

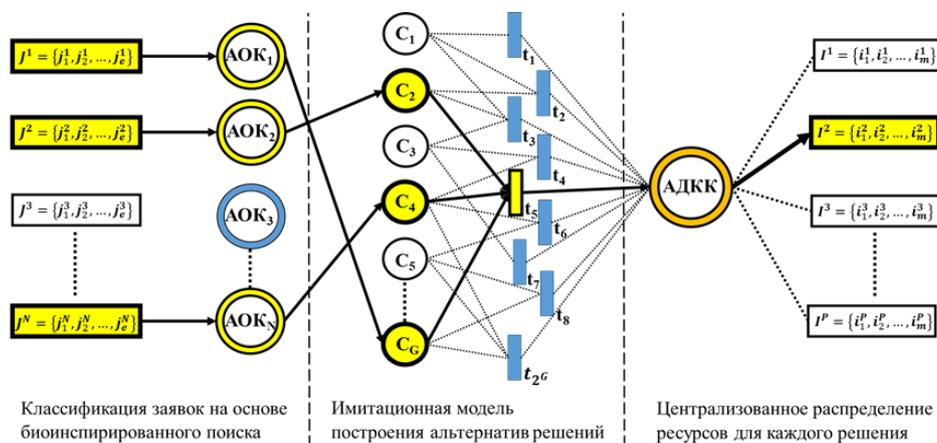


Рис. 2. Структура информационных потоков в грид-системе

В данной работе использован целенаправленный тип интеллектуальных агентов. Коалиция агентов моделирует процесс рассуждений референтной группы в процессе решения задачи классификации потоков параллельных заявок при диспетчеризации в грид-системах. В исследовании решена задача создания классификаторов в виде агентов с заданными условными атрибутами.

Заданы два типа агентов: для организации распределенной классификации входных потоков заявок использованы агенты обучения классификатора (АОК); для централизованного распределения вычислительных ресурсов между альтернативными наборами заявок – агент-диспетчер комбинирования классификатора (АДКК).

Задача диспетчирования решена на основе комплексного применения коалиции интеллектуальных агентов и событийной имитационной модели. Использована комбинированная распределенно-централизованная схема поиска решений при диспетчеризации [14-20], что позволило уменьшить размерность задачи. Классификация поступающих на вход заявок проводится на основе применения модифицированного биоинспирированного метода оптимизации поиском кукушки.

3. Экспериментальные исследования. Для подтверждения эффективности разработанного метода классификации распределенных вычислительных ресурсов для диспетчирования в грид-системах было доработано программное приложение, описанное в [7], которое включало в себя функции поэтапного решения задач классификации входных заявок на основе модифицированного биоинспирирован-

ного метода оптимизации поиском кукушки и централизованного распределения вычислительных ресурсов на основе применения генетического алгоритма, описанного в [14]. В новой версии программного приложения вместо генетического алгоритма для распределения вычислительных ресурсов использован разработанный метод диспетчирования на основе классификации алгоритмом косяка рыб. В качестве значений атрибутов применены показатели, полученные для проведения прошлого вычислительного эксперимента. Сравнение проведено на основе оценки результатов применения методов роя частиц, генетического алгоритма и предложенного авторами метода классификации ресурсов.

В результате проведенных комплексных исследований получена временная сложность предложенного метода (рис. 3). Временная сложность в рассмотренном примере составила в худшем случае $O(n^2)$, где n – количество анализируемых методом входных данных, которым в данном случае является число входных заявок (задач).

Экспериментальные исследования разработанного метода проводились на вычислительной системе с производительностью порядка 10^9 (гигафлопс) операций в секунду. В этом случае, например, при $n = 50000$ вершин, время выполнения алгоритма не превысит 2,5 секунды, при $n = 200000$ вершин – 40 секунд, при $n = 500000$ вершин – 250 секунд, что наглядно иллюстрирует представленная на рис. 3 полученная зависимость времени выполнения предложенного метода от числа входных вершин.

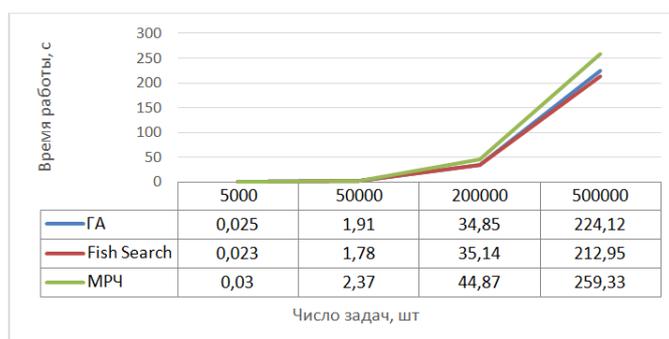


Рис. 3. Временная сложность в зависимости от числа входных вершин

Исследование скорости работы метода классификации распределенных вычислительных ресурсов для диспетчирования в грид-системах, разработанного на основе алгоритма поиска косяком рыб, проводилось в сравнении с генетическим алгоритмом, применяющим модифицированные генетические операторы кроссинговера и мутации, предложенным в [14], и каноническим методом роя частиц (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение времени работы методов

Размерность задачи (количество задач, шт)	Метод на основе поиска косяком рыб (время работы, с)	Генетический алгоритм (время работы, с)	Метод роя частиц (время работы, с)
50000	1.78	1.91	2.37
200000	35.14	38.54	44.87
500000	212.95	229.18	259.33

Из анализа приведенных графика временной сложности и таблицы сравнения времени работы методов видно, что предложенный метод показал лучший результат по сравнению с генетическим алгоритмом и каноническим методом роя частиц. Отметим, что при относительно небольших размерностях задачи (от 50000 до 200000 вершин) время работы оцениваемых методов соизмеримо: от 1,78–35,14 секунды в предлагаемой модификации алгоритма поиска косяком рыб, до 1,91–38,54 и 2,37–44,87 секунды соответственно для генетического алгоритма и метода роя частиц. Наибольший прирост скорости предложенные процедуры распределения вычислительных ресурсов при диспетчировании входных информационных потоков позволили достичь при решении задач с размерностью не менее 500000 входных заявок. Из табл. 1 видно, что в этом случае, если принять за 100 % время работы наиболее медленного роевого метода, тогда генетический алгоритм затратил на решение этой же задачи менее 89 % времени от максимального, а предложенный биоинспирированный метод на основе поиска косяком рыб – менее 82 %. Эффективность предложенного биоинспирированного метода повышена за счет улучшения способа определения траектории передвижения агента в пространстве поиска, позволяющего обеспечить не только достаточное число итераций локального поиска, но также создать необходимые условия для выхода из локальных оптимумов [21–24].

Заключение. В данной работе представлена разработка метода классификации распределенных вычислительных ресурсов для диспетчирования в грид-системах. Задача диспетчирования решена на основе комплексного применения коалиции интеллектуальных агентов и событийной имитационной модели. Использована комбинированная распределенно-централизованная схема поиска решений при диспетчировании, что позволило уменьшить размерность задачи. Предложено решать задачу диспетчирования вычислительных ресурсов на основе определения соответствия ресурса необходимому классу. Классификация проводится на основе применения биоинспирированного метода оптимизации, построенного на основе алгоритма поиска косяком рыб. Использование популяционного биоинспирированного метода позволяет обеспечить беспрецедентный параллелизм получения альтернативных решений и оптимизировать распределение имеющихся вычислительных ресурсов в зависимости от наборов значимых признаков.

Для оценки эффективности предложенного метода разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент с разным количеством поступающих на вход заявок. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность разработки в сравнении с генетическим алгоритмом и каноническим методом роя частиц. Каждый вычислительный ресурс имеет определенный набор атрибутов, являющийся вектором его признаков. Косинусная мера сходства вектора признаков ресурса и вектора признаков определенного класса является критерием классификации. Для повышения качества процесса диспетчирования задача классификации вычислительных ресурсов решена для множества вариантов организации потоков сложных решаемых задач в грид-системах.

Полученные количественные оценки демонстрируют экономию времени при решении задач диспетчирования распределенных вычислительных ресурсов на основе их классификации методом биоинспирированного поиска не менее 7 %. Временная сложность в рассмотренных примерах составила $O(n^2)$. Описанные исследования имеют высокий уровень теоретической и практической значимости и напрямую связаны с решением классических задач искусственного интеллекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Magoulès F. (ed.). Fundamentals of grid computing: theory, algorithms and technologies, *Numerical analysis and scientific computing*. – CRC Press, UK, 2010
3. Patel S. Survey Report of Job Scheduler on Grids, *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, 2013, No. 2 (4), pp. 115-125.
4. Li M., Baker M. The grid: core technologies. – John Wiley & Sons Ltd, England, 2005.
5. Saak A.E., Kureichik V.V., Kravchenko Y.A. Scheduling quality of precise form sets which consist of tasks of circular type in GRID systems, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1015 (4).
6. Saak A.E., Kureichik V.V., Lezhebokov A.A. Scheduling of parabolic-type tasks arrays in GRID systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, pp. 292-298.
7. Saak A., Kureichik V., Kravchenko Y. To scheduling quality of sets of precise form which consist of tasks of circular and hyperbolic type in grid systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, pp. 157-166.
8. Saak A.E., Kureichik V.V., Kuliev E.V. Ring algorithms for scheduling in grid systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, pp. 201-209.
9. Kravchenko Y.A., Kravchenko D.Y., Kursitys I.O. Architecture and method of integrating information and knowledge on the basis of the ontological structure, *Advances in Intelligent Systems and Computing. 1st International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, and Education, AIMEE 2017*. Moscow: 2018, Vol. 658, pp. 93-103.
10. Kravchenko Y.A., Kureichik V.V. Knowledge management based on multi-agent simulation in informational systems, *Conference proceedings. 8th IEEE International Conference "Application of Information and Communication Technologies – AICT 2014". 15-17 October 2014, Astana, Kazakhstan*, pp. 264-267.
11. Monteiro R.P., Verçosa L.F.V., Bastos-Filho C.J. A. Improving the Performance of the Fish School Search Algorithm, *International Journal of Swarm Intelligence Research (IJSIR)*, 2018, No. 9 (4), pp. 21-46.
12. Lima Neto F.B.D., Lacerda M.G. Weight based fish school search, *IEEE International Conference Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2014, pp. 270-277.
13. Bastos-Filho C.J.A., Lima-Neto F.B., Lins Sousa M.F.C., Pontes M.R. On the influence of the swimming operators in the fish school search algorithm, *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, 2009, pp. 5012-5017.
14. Kravchenko Y.A., Bova V.V., Kursitys I.O. The development of genetic algorithm for semantic similarity estimation in terms of knowledge management problems, *Artificial Intelligence Perspectives in Intelligent Systems. Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017)*, Vol. 1. Springer, 2017, pp. 84-93.
15. Soliman O.S. and Adly A. Bio-inspired algorithm for classification association rules, *8th International Conference on Informatics and Systems (INFOS), Cairo, 2012*, pp. 154-160.
16. Bova V., Zaporozhets D., and Kureichik V. Integration and processing of problem-oriented knowledge based on evolutionary procedures, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, Vol. 450, pp. 239-249.
17. Semenova A.V. and Kureichik V.M. Ensemble of classifiers for ontology enrichment, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1015, Issue 3, article id. 032123.
18. Kureychik V.M. Overview and problem state of ontology models development, *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2015 - Proceedings 9*, 2015, pp. 558-564.
19. Semenova A.V. and Kureychik V.M. Application of swarm intelligence for domain ontology alignment, *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'16)*, 2016, Vol. 1, pp. 261-270.
20. Bova V., Kureichik V. and Zaruba D. Heuristic approach to model of corporate knowledge construction in information and analytical systems, *2016 IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Baku, 2016*, pp. 1-5.
21. Kureichik V., Zaporozhets D., and Zaruba D. Generation of bioinspired search procedures for optimization problems, *Application of Information and Communication Technologies, AICT 2016 - Conference Proceedings*, 2016. Vol. 10.

22. Pulyavina N., Taratukhin V. The Future of Project-Based Learning for Engineering and Management Students: Towards an Advanced Design Thinking Approach, *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2018, No. 125.
23. Becker J., Pulyavina N., Taratukhin V. Next-Gen Design Thinking. Using Project-Based and Game-Oriented Approaches to Support Creativity and Innovation, *Proceedings of the 1st International Conference of Information Systems and Design*, 2020.
24. Bova V.V., Nuzhnov E.V., Kureichik V.V. The combined method of semantic similarity estimation of problem oriented knowledge on the basis of evolutionary procedures, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, Vol. 573, pp. 74-83.

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

Кравченко Даниил Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: kravchenkodaniil122@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; студент.

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

Марков Владимир Васильевич – e-mail: vvmarkov@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Саак Андрей Эрнестович – e-mail: aesaak@sfedu.ru; тел.: 88634393373; кафедра государственного и муниципального управления; зав. кафедрой.

Kravchenko Daniil Yurievich – Southern Federal University; e-mail: kravchenkodaniil122@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; student.

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

Markov Vladimir Vasilievich – e-mail: vvmarkov@sfedu.ru; the department of computer aided design; associate professor.

Saak Andrey Ernestovich – e-mail: aesaak@sfedu.ru; phone: +78634393373; the department of state and municipal management, head of department.

Раздел II. Интеллектуальные системы

УДК 0004.912

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-42-50

Е.М. Герасименко, В.В. Стеценко

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА ТОНАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОЯЛЬНОСТИ ПОКУПАТЕЛЕЙ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ОСНОВАННАЯ НА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ

*Представлен интеллектуальный подход к измерению лояльности клиентов к конкретному продукту, основанный на анализе комментариев. Общий анализ тональности в твитах и сообщениях проводится довольно часто, однако ориентированный на задачи анализ мнений пользователей и измерение уровня их лояльности является новой идеей. Сложность в проведении ориентированного на задачу анализа тональности сообщений заключается в измерении лояльности клиента к конкретному продукту на основе мнения клиентов об этом самом продукте. Полученные данные об уровне лояльности клиента к продукту смогут помочь новому клиенту принять решение о конкретном товаре, учитывая его различные особенности и отзывы предыдущих клиентов. В качестве набора данных был использован большой массив данных, состоящих из онлайн-отзывов клиентов с Amazon.com. Набор исходных данных представляет собой совокупность отзывов, из которых предлагаемый подход формирует агрегированную оценку мнений, далее используется модель нечеткой логики для измерения лояльности клиента к продукту. В предложенном подходе входной текст сначала обрабатывается с помощью таких методов как токенизация, удаления стоп-слов, лемматизация, затем происходит маркировка частей речи и осуществляется анализ полярности отзывов, затем, к полученным агрегированным оценкам применяются методы нечеткой логики, чтобы определить степень лояльности клиентов к продукту. В этой работе использовались различные библиотеки с открытыми API, такие как SentiWordNet, Stanford CoreNLP и т.д. Используемый подход фокусируется на выявлении тональности обзоров, которые могут быть положительными, отрицательными и нейтральными. В нашем исследовании мы использовали треугольную функцию принадлежности, также известную как *trimf*, потому что она поддерживает три переменные и создает связь между ними. Реализация подхода обеспечивает высокую точность определения лояльности к продуктам электронной коммерции, которая превосходит предыдущие подходы, а применение нечеткой логики позволило значительно повысить значения таких показателей как точность, полнота и F-мера.*

Анализ тональности; нечеткая логика; принятие решений; лояльность клиентов.

Е.М. Gerasimenko, V.V. Stetsenko

AN INTELLIGENT SENTIMENT ANALYSIS SYSTEM FOR MEASURING CUSTOMER LOYALTY AND MAKING DECISIONS BASED ON FUZZY LOGIC

This paper presents an intelligent approach of measuring customer loyalty to a specific product based on the analysis of comments. General sentiment analysis in tweets and messages is quite common, but task-oriented analysis of user opinions and measuring their level of loyalty is a new idea. The tricky part of doing task-oriented sentiment analysis lies in measuring customer loyalty to a particular product based on how customers feel about that product itself. The resulting data on the level of customer loyalty to the product can help a new customer to make a decision on a specific product, taking into account its various characteristics and feedback from previous cus-

tomers. The dataset was a large dataset of online customer testimonials from Amazon.com. The set of initial data is a set of reviews, from which the proposed approach forms an aggregated assessment of opinions, then a fuzzy logic model is used to measure customer loyalty to the product. In the proposed approach, the input text is first processed using such methods as tokenization, removal of stop words, lemmatization, then the parts of speech are marked and the polarity of the reviews is analyzed, then fuzzy logic methods are applied to the obtained aggregated estimates to determine the degree of customer loyalty to the product. This work used various open API libraries such as SentiWordNet, Stanford CoreNLP, etc. The approach used focuses on identifying the sentiment of reviews, which can be positive, negative and neutral. In our study, we used a triangular membership function, also known as trimf, because it supports three variables and creates a relationship between them. The implementation of the approach ensures high accuracy in determining loyalty to e-commerce products, which is superior to previous approaches, and the use of fuzzy logic has significantly increased the values of such indicators as precision, recall, and F-measure.

Sentiment analysis; fuzzy logic; decision making; customer's loyalty.

Введение Широкое использование интернета произвело революцию в нашей жизни благодаря появлению множества различных услуг, облегчающих жизнь, таких как онлайн-покупки, онлайн-курсы, онлайн-банкинг и многое другое. За последнее десятилетие электронная коммерция (процесс покупки и продажи товаров через Интернет) растет день ото дня и превратилась в будущее покупок. Законодателями моды в современной электронной коммерции являются Amazon, E-Bay, Ali Baba Express и многие другие. AMAZON.com – один из крупнейших интернет-магазинов розничной торговли. В последнее время насчитывается около 244 миллионов учетных записей активных покупателей, 200 миллионов активных продуктов и 2,2 миллиарда продаж за последние 12 месяцев (в среднем 6 миллионов продаж в день). Покупки онлайн значительно облегчают процесс клиентам и предприятиям. Однако, проблема, с которой сталкиваются пользователи электронной коммерции, – это необходимость в более совершенной и улучшенной платформе сравнения и выбора товаров и цен. [1] Если такая платформа доступна, она может сэкономить время, деньги и энергию клиента и может помочь в покупке более качественных продуктов, отвечающих определенным требованиям. Большим источником знаний являются отзывы клиентов о товарах на сайтах социальных сетей и электронной коммерции, которые могут эффективно воздействовать на принятие решений новыми клиентами [2–6].

Самый простой и широко используемый метод измерения удовлетворенности потребителя состоит в том, чтобы понять его чувства или мнения, которые выражаются в форме комментариев [7–9]. Важнейший способ понять их чувства, настроение и мнения или узнать, что они пытаются сделать, – это оценить их отзывы и комментарии о товаре и услугах [10]. Отслеживание мнений, чувств, ответов и настроений клиентов известно, как анализ мнений и анализ тональности [11]. Тип анализа текста, целью которого является выявление мнения и полярности обзоров, называется тональным анализом. Это вид анализа текста, который имеет дело с широким аспектом обработки естественного языка, вычислительной семантики и интеллектуального анализа текста [12].

Мнения, высказанные на сайтах социальных сетей, очень эффективны для процесса принятия решений в деловых организациях. Организации используют эти посты для извлечения мнений людей и проведения анализа настроений. Анализ тональности позволяет определить тональность текста как положительную, отрицательную или нейтральную.

Общий анализ тональности в твитах и сообщениях проводится довольно часто, однако ориентированный на задачи анализ мнений пользователей и измерение уровня их уверенности является новой идеей. Сложность в проведении ориентированного на задачу анализа тональности сообщений заключается в измерении лояльности клиента к конкретному продукту на основе мнения клиентов об этом самом продукте.

В предложенном подходе мы определяем отношение пользователей, анализируя их комментарии. Мы можем рассматривать их как положительные, нейтральные или отрицательные. Мы измеряем «PN-полярность» субъективных терминов, то есть распознаем, является текст, в котором выражаются мнения и эмоции, позитивным или негативным. С помощью библиотеки Stanford CoreNLP представленный подход легко понимает, что люди пытаются выразить своими словами. Чтобы определить тональность и полярность входного текста, [13] используется библиотека SentiWordNet для измерения уровня вовлеченности клиента в продукт. Для измерения лояльности клиентов на основе оценки тональности, рассчитанной на основе отзывов, применяется метод нечеткой логики. Нечеткая логика – это процесс рассуждения, который очень похож на рассуждение человека [14]. Этот подход копирует процесс принятия решения человеком, включая все вариации между цифровыми значениями ДА и НЕТ. Стандартная логика, которую компьютер может легко понять, состоит в том, чтобы принимать конкретный ввод и выдавать определенный вывод как ИСТИНА или ЛОЖЬ, или 1 или 0, что равняется человеческому ДА или НЕТ. Нечеткая логика работает на уровнях возможностей ввода для достижения определенного результата и также называется многозначной логикой, которая имеет дело только с истинными значениями. Значения истинности варьируются от всех значений в диапазоне от 0 до 1. Оно не распространяется только на истинные и ложные значения, такие как булева алгебра.

Методология. Разработанный подход предназначен для анализа тональности отзывов и измерения отношения пользователей относительно их комментариев к конкретному продукту. На рис. 1 представлена базовая структура архитектуры анализа тональности.

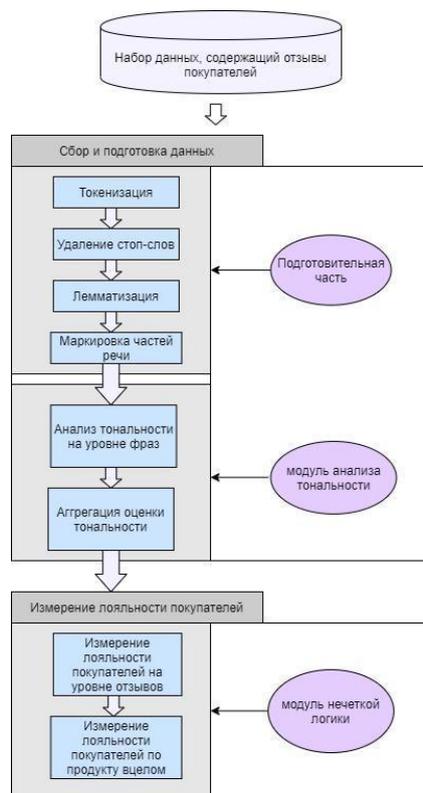


Рис. 1. Базовая структура архитектуры анализа тональности

Процесс начинается со сбора отзывов, комментариев, сообщений и твитов пользователей, относящихся к конкретному продукту, из различных источников, таких как социальные сети, торговые сайты и т.д. В представленном подходе был собран набор данных, состоящий из 500 отзывов с AMAZON. В этом исследовании собраны мнения клиентов и отзывы о продуктах Apple (таких как Apple iPhone 6 и iPhone 7).

Токенизация. Каждый отзыв из набора данных обрабатывается индивидуально. Предварительная обработка рецензий начинается с фазы токенизации, которая разделяет фрагмент рецензии на небольшие единицы, такие как токены. Типичный процесс токенизации может определять знаки препинания и создавать токены текста. Токен может быть чем угодно, предложением, словом или символом и т. д. Мы использовали StanfordCoreNLP PTB Tokenizer, который на самом деле является способом токенизации английского письма PENN TREEBANK, и разбивает рецензии на предложения, чтобы упростить сам файл.

Удаление стоп-слов. Набор бессмысленных или не относящихся к делу слов в тексте может серьезно повлиять на точность вывода. Следовательно, удаление таких стоп-слов из входного текста является важной фазой в анализе тональности текста. В собранных пользовательских обзорах стоп-словом может быть число, предлог или имя человека, название продукта и т.д. Каждый отзыв после процесса токенизации проходит этап удаления стоп-слов. Используемый подход использует библиотеку CoreNLP [15], которая помогает идентифицировать список стоп-слов.

Лемматизация. Лемматизация – процесс, который использует словарь и морфологический анализ, чтобы в итоге привести слово к его канонической форме – лемме, что позволяет достичь более точных результатов в анализе тональности [16]. Во многих текстовых документах используются разные формы слова, например, мобильный телефон, мобильные телефоны, мобильники, которые относятся к «мобильный».

Маркировка частей речи (PoS). После фазы лемматизации в тексте отзыва проводится маркировка частей речи для определения лексической позиции и значения конкретного слова в предложении. Лексическая позиция и значение помогают определить влияние слова в предложении. Используемый подход выполняет маркировку частей речи с помощью Stanford POS tagger, который является частью библиотеки Stanford CoreNLP [17]. На этом этапе PoS tagger маркирует каждое слово в тексте обзора, например:

- ◆ Вход: This phone has best features e.g., screen, sound system, etc.
- ◆ Выход: [This/DT] [phone/NN] [has/VBZ] [best/JJS] [features/NNS] [e.g./VBG] [screen/NN] [./,] [sound/JJ] [system/NN] [./,] [etc./FW] [./]

Анализ полярности отзывов. Измерение полярности отзыва клиента является ключевым этапом в используемом подходе. В предложенном подходе для определения показателя полярности каждого слова в обзоре пользователя используется библиотека SentiWordNet 3.0.0 [18]. Показатели полярности каждого слова в предложении суммируются и в итоге получается общий уровень полярности предложения. Табл. 1 показывает выходные данные процесса PoS, а табл. 2 показывает обработанный пример.

Таблица 1

Результат маркировки частей речи

POS_ID	POS_наименование	POS_аббревиатура	SentiWordNet_аббревиатура
1	Noun (существительное)	NN	N
2	Adjective (прилагательное)	JJ	A
3	Verb (глагол)	VB	V
4	Adverb (наречие)	RB	R
5	Noun plural (существительное мн.ч.)	NNS	N
6	Adjective Superlative (прилагательное в превосходной степени сравнения)	JJS	A
7	Verbs (глаголы (мн.ч.))	VBZ	V

Таблица 2

Методология применяемая в тональном анализе

1	Оригинальное предложение	iPhone 6 is one of the good models of Apple phone.
2	Предложение после удаления стоп-слов	IPhone 6 + one + good + models + Apple phone.
3	Предложение после маркировки частей речи с использованием Stanford POS tagger	IPhone/NNP 6/CD is/VBZ one/CD of/IN the/DT good/JJ models/NNS of/IN Apple/NNP phone/NN./.
4	Предложение после лемматизации	IPhone 6 + one + good + model + Apple phone.
5	Предложение с применением SentiWordNet	IPhone#n 6#n one#n good#a model#n Apple#n phone#n.
		IPhone#n ==> SentiWordNet Score: 0.0
		one#n ==> SentiWordNet Score: 0.0
		good#a ==> SentiWordNet Score: 0.634
6	Разметка веса токенов в предложении	model#n ==> SentiWordNet Score: 0.0
		Apple#n ==> SentiWordNet Score: 0.0
		phone#n ==> SentiWordNet Score: 0.0
		review#n==>SentiWordNet Score: 0.053
7	Суммарная оценка	0.343
8	Оценка предложения	Положительная
	Положительная	34,35%
	Отрицательная	0,0%
	Нейтральная	5,0%

Первая строка отображает ввод простого отзыва в форме предложения, затем удаляются стоп-слова на втором шаге. На третьем этапе мы применяем лемматизацию к этому обзору. На четвертом используем маркировку Stanford Parts-of-Speech. После применения POS-маркировки мы используем маркировку SentiWordNet, которая присваивает балл каждому слову в зависимости от его веса в предложении. Здесь мы применили ограничения и произвели расчет только оценки прилагательных в данных

отзывах. Мы ориентировались только на отзывы, основанные на прилагательных, потому что прилагательное – это качественное слово или слово, которое описывает существительное, которое явно отражает настроения, стоящие за отзывами.

Далее мы рассчитываем оценку слов в предложении, но в тексте мы используем только оценку прилагательных слов. На седьмом этапе все баллы суммируются определения суммы всех слов сентиментальности в данном предложении.

Восьмой этап включает наиболее важную особенность тонального анализа - определение типа тональности предложения. Тип предложения отзыва показывает, считается ли отзыв положительным, нейтральным или отрицательным. Тип предложения данного отзыва является положительным, получен с помощью словаря SentiWordNet. В последних трех строках код вычисляет, насколько обзор является положительным, нейтральным или отрицательным, и конечный результат показывает, что он положительный, потому что он имеет самый высокий процент положительных оценок.

Применение нечеткой логики. Для определения лояльности клиентов к продукту мы использовали систему нечеткой логики.

Фаззификация. Первым шагом в используемых системах нечеткой логики является распознавание входных и выходных переменных. В этом процессе четкие входные данные преобразуются в нечеткое множество функциями принадлежности [19]. Входные переменные системы нечеткой логики представлены в нечетких множествах с использованием лингвистических терминов, функций принадлежности и лингвистических переменных.

Преобразование четких входных значений в нечеткие значения выполняется с использованием функций членства, и этот метод преобразования известен как фаззификация. Каждая функция принадлежности отображает особенность лингвистической переменной, которая размыта. Поскольку мы применяем этот подход к функции принадлежности к лингвистическим переменным в нашем исследовании, мы принимаем «Оценку мнения» и «Лояльность клиентов» в качестве входных переменных, которые могут быть «Pos»(Положительный), «Neu»(Нейтральный), «Neg»(Отрицательный), и функцию принадлежности к лингвистической переменной «Лояльность клиентов» – это «Pseudo(Псевдо)», «Latent (Скрытая)» и «True(Истинная)». Мы описали нечеткий набор следующим соотношением (1):

$$A = \mu_1 K(x_1) + \mu_2 K(x_2) + \mu_n K(x_n). \quad (1)$$

В уравнении (1) нечеткое множество $K(x_i)$ называется ядром фаззификации, μ_A является постоянной величиной, а x_A преобразуется в нечеткое множество $K(x_i)$.

Мы принимаем оценку анализа мнений в качестве входной лингвистической переменной, а лояльность клиентов – в качестве выходной лингвистической переменной, которая состоит из лингвистических терминов: «Истинная лояльность», «Псевдо лояльность» и «Скрытая лояльность»

В нашем исследовании мы используем треугольную функцию принадлежности, также известную как trimf . Мы используем именно эту функцию принадлежности, потому что она поддерживает три переменные и создает связь между ними. Эти переменные являются положительными (a), отрицательными (b), нейтральными (m). (Уравнение (2)).

$$\text{Triangular}(x; a, b, m) = \begin{cases} x < a & 0 \\ a \leq x \leq m & \frac{(x-a)}{(m-a)} \\ m \leq x \leq b & \frac{(b-x)}{(b-m)} \\ m \leq x & 0 \end{cases} \quad (2)$$

где a , b и m представляют координаты x для треугольника, x представляет четкое значение из изолированной переменной нечеткой вселенной дискурса. Мы разделили оценку настроения на три вида:

- ◆ положительная;
- ◆ нейтральная;
- ◆ отрицательная.

В «Псевдо лояльности» значение в trimf лежит в пределах $0,0 < x < 0,30$, потому что потребитель не уверен, совершит ли он покупку товара данной марки в будущем. Это называется низкой лояльностью.

При «скрытой лояльности» значение в trimf лежит в пределах $0,30 \leq x < 0,70$, потому что потребитель предпочитает не покупать что-либо какой-либо марки, но если он соберется покупать, он всегда будет покупать одну марку. Это - средняя лояльность.

В «Истинной лояльности» значение в trimf лежит в пределах $0,70 \leq x \leq 1,0$, потому что потребитель лоялен только к продукту данной марки. Товары данной марки заслуживают доверия и покупатели всегда советуют их своей семье, друзьям и родственникам. Они никогда не переключатся с этого бренда. Это – высокая лояльность.

Правила нечеткой логики. Основой любой системы нечеткой логики являются ее правила. Используя эти правила, мы можем легко описать контролируемый результат и сделать вывод. Это простые правила Если-ТО. Предположим, у нас есть переменная x , включенная в задачу (которая является нашей оценкой настроения), поэтому выход лояльности имеет свою собственную функцию членства, которая является низкой, средней и высокой, например, когда мы применяем правила (показанные в табл. 3), это даст:

- ◆ Если x низкий, то лояльность низкая.
- ◆ Если x средний, то лояльность средняя.
- ◆ Если x высокий, то лояльность высокая.

Таблица 3

Нечеткие правила расчета лояльности клиентов

№	Правило
1	Если оценка тональности отрицательная, то уровень «Лояльности клиента» – «псевдо»
2	Если оценка тональности нейтральная, то уровень «Лояльности клиента» – «скрытый»
3	Если оценка тональности высокая, то уровень «Лояльности клиента» – «истинный»

Дефазификация – это метод, который генерирует количественные результаты в четкой логике, которая достигается с помощью нечетких множеств и функций принадлежности с последовательными степенями. Это метод, который переводит нечеткое множество в четкое множество, используя набор правил, которые преобразуют ряд переменных в нечеткий результат, дает вычисляемые результаты, которые содержат нечеткие множества и функции принадлежности и выполняет отображение вывода нечетких множеств в четкие значения.

Мы преобразуем нечеткий выходной сигнал в четкий выходной сигнал, который формируется с помощью шагов системы нечеткого вывода, а функцию членства в лояльности клиентов принимается как выходной сигнал [20].

Вот некоторые правила дефазификации, где « x » обозначает оценку настроения, а « u » обозначает тип лояльности:

если $(0,0 \leq x < 0,30)$, то $y =$ «псевдо лояльность»
 если $(0,30 \leq x < 0,70)$, то $y =$ «скрытая лояльность»,
 если $(0,70 \leq x \leq 1,0)$, тогда $y =$ «истинная лояльность»

Эксперимент и результаты. Результаты получены с использованием алгоритма SentiWordNet и нечеткой логики. Мы собрали 500 комментариев для двух разных продуктов Apple. После формирования набора данных, мы применили к нему предварительную обработку, проанализировали, разбили на токены и провели лемматизацию. В результате предложения разбились на 3 типа: положительные, отрицательные и нейтральные. Результаты оценки измерялись с помощью программного обеспечения SentiWordNet 3.0. Применялся подход определения тональности на уровне предложений. Был получен следующий результат: 320 положительных, 105 – нейтральных, а 75 – отрицательных отзывов. Предложенный подход показал хорошую эффективность, поскольку точность нашего подхода составила 89,32 %, полнота – 80,36 %, а F-мера – 83,69 %, что превосходит результаты, полученные в работах [1.2], в которых точность не превысила 87,5 %, полнота – 65 %, F-мера – 70,3 % .

Ограничением представленного метода является то, что он обрабатывает только грамматически правильный и не содержащий орфографических ошибок текст на английском языке.

Заключение. В данной работе рассматривается важная проблема измерения лояльности покупателей к конкретному продукту. Очень часто проводят анализ тональности твитов и публикаций, однако целенаправленный анализ настроений пользователей в отзывах о продукте с целью выявления ключевых функций, понравившихся пользователям, и уровня их лояльности является новой идеей. Для классификации типов лояльности была применена нечеткая логика, что позволило значительно повысить значения таких показателей как точность, полнота и F-мера. В будущем эта работа может быть расширена за счет рассмотрения обоих типов предложений, то есть субъективных и объективных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gräbner D., Zanker M., Fliedl G., Fuchs M. Classification of customer reviews based on sentiment analysis, *Proceedings of the 19th Conference on Information and Communication Technologies in Tourism (ENTER), Helsingborg, Sweden, 24–27 January 2012*, pp. 460-470.
2. Bagheri A., Saraee M., De Jong, F. Care more about customers: Unsupervised domain-independent aspect detection for sentiment analysis of customer reviews, *Knowl.-Based Syst.*, 2013, Vol. 52, pp. 201-213.
3. Wilson T., Wiebe J., Hoffmann P. Recognizing contextual polarity in phrase-level sentiment analysis, *Proceedings of the Conference on Human Language Technology and Empirical Methods in Natural Language Processing, Vancouver, BC, Canada, 6–8 October 2005*, pp. 347-354.
4. Hu M., Liu B. Mining and summarizing customer reviews, *Proceedings of the Tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Seattle, WA, USA, 22–25 August 2014*, pp. 168-177.
5. Neri F., Aliprandi C., Capecci F., Cuadros M., By T. Sentiment analysis on social media, *Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM), Istanbul, Turkey, 26–29 August 2012*, pp. 919-926.
6. He W., Zha S., Li L. Social media competitive analysis and text mining: A case study in the pizza industry, *Int. J. Inf. Manag.*, 2013, Vol. 33, pp. 464-472.
7. Chandrashekar M., Rotte K., Tax S.S., Grewal R. Satisfaction strength and customer loyalty, *J. Mark. Res.*, 2007, 44, pp. 153-163.
8. Kang D.; Park Y. Review-based measurement of customer satisfaction in mobile service: Sentiment analysis and VIKOR approach, *Expert Syst. Appl.*, 2014, 41, pp. 1041-1050.
9. Chamlerwat W., Bhattarakosol P., Rungkasiri T., Haruechaiyasak C. Discovering Consumer Insight from Twitter via Sentiment Analysis, *J. UCS*, 2012, 18, pp. 973-992.

10. *Bauman K., Liu B., Tuzhilin A.* Recommending Items with Conditions Enhancing User Experiences Based on Sentiment Analysis of Reviews, *Proceedings of the CBRecSys@ RecSys; CEUR Workshop 2016, Boston, MA, USA, 16 September 2016*, Vol. 1677, pp. 19-22.
11. *Dubey A., Gupta A., Raturi N., Saxena P.* Item-Based Collaborative Filtering Using Sentiment Analysis of User Reviews, *Proceedings of the International Conference on Application of Computing and Communication Technologies, Delhi, India, 9 March 2018*, pp. 77-87.
12. Artificial Intelligence Fuzzy Logic Systems. Available online: https://www.tutorialspoint.com/artificial_intelligence/artificial_intelligence_fuzzy_logic_systems.htm (accessed on 02.06.2021).
13. SentiWordNet. n.d. Available online: <https://sentiwordnet.isti.cnr.it/> (accessed on 12 February 2020).
14. *Zadeh L.A.* Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. *Fuzzy Sets Syst.*, 1997, 90, pp. 111-127.
15. *Manning C., Surdeanu M., Bauer J., Finkel J., Bethard S., McClosky D.* The Stanford CoreNLP natural language processing toolkit, *Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations, Baltimore, MD, USA, 23–24 June 2014*, pp. 55-60.
16. *Barbosa L., Feng J.* Robust sentiment detection on twitter from biased and noisy data. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Computational Linguistics, Beijing, China, 36–44 August 2010*.
17. *Manning C., Surdeanu M., Bauer J., Finkel J., Bethard S., McClosky D.* The Stanford CoreNLP natural language processing toolkit, *Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations, Baltimore, MD, USA, 23–24 June 2014*, pp. 55-60.
18. *Baccianella S., Esuli A., Sebastiani F.* Sentiwordnet 3.0: An enhanced lexical resource for sentiment analysis and opinion mining, *Lrec 2010*, 10, pp. 2200–2204.
19. *Herrera-Viedma E.* Fuzzy sets and fuzzy logic in multi-criteria decision making. The 50th anniversary of Prof. Lotfi Zadeh's theory, Introduction, *Technol. Econ. Dev. Econ.*, 2015, 21, pp. 677-683.
20. *Indhuja, K.; Reghu, P.C.* Fuzzy Logic Based Sentiment Analysis of Product Review Documents, *Proceedings of the 1st International Conference on Computational Systems and Communications, Trivandrum, India, 17–18 December 2014*, pp. 18-22.

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

Герасименко Евгения Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматизированного проектирования; к.т.н.. доцент.

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

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

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

Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова**ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ***

Статья посвящена обсуждению проблем построения эволюционирующих мультиагентных систем. Рассмотрены возможные методологии проектирования мультиагентных систем. Отмечена актуальность разработки новых принципов построения мультиагентных систем на основе методов эволюционного проектирования. Выделены соответствия между терминами теории агентов и теории эволюции. Отмечена перспективность использования гибридных подходов к проектированию мультиагентных систем. Рассмотрены принципы построения и возможности использования нечетких генетических алгоритмов при проектировании мультиагентных систем. Отмечено, что основные модели методы теории эволюционного моделирования, могут успешно применяться при проектировании мультиагентных систем. Предложена эволюционирующей многоагентной системы. Описана процедура формирования новых агентов в процессе эволюции. Определен набор параметров, позволяющих оценить состояние каждого агента в популяции. Для оценки текущего состояния агента и возможностей его взаимодействия с другими агентами предложено использовать ресурсные параметры. Приведено определения агентства и семьи, минимальных элементов эволюционирующей мультиагентной системы. Предложена эволюционная стратегия построения модели эволюционирующей мультиагентной системы. Описаны процедуры выполнения оригинальных эволюционных операторов для обработки популяции агентов. На основе предложенной методики была разработана программная система поддержки эволюционного проектирования агентов и мультиагентных систем. В настоящее время проводятся вычислительные эксперименты для исследования предложенной модели проектирования многоагентных систем, оценки эффективности различных операторов и схем формирования агентов-потомков, необходимые условия выживания.

Мультиагентная система; агент; ресурс агент; агентство; эволюционное проектирование; эволюционные операторы; методология проектирования; гибридные методы.

L.A. Gladkov, N.V. Gladkova**EVOLUTIONARY DESIGN AS A TOOL FOR DEVELOPING MULTI-AGENT SYSTEMS**

The article is devoted to the discussion of the problems of constructing evolving multi-agent systems. Possible methodologies for designing multi-agent systems are considered. The relevance of developing new principles for constructing multi-agent systems based on evolutionary design methods is noted. The correspondences between the terms of the theory of agents and the theory of evolution are highlighted. The prospects of using hybrid approaches to the design of multi-agent systems are noted. The principles of construction and the possibility of using fuzzy genetic algorithms in the design of multi-agent systems are considered. It is suggested that the models and methods of the theory of evolutionary modeling can be successfully applied in the design of multi-agent systems. An evolving multi-agent system is proposed. The procedure for the formation of new agents in the process of evolution is described. The set of parameters for assessing the state of each agent in the population has been determined. The resource parameters are proposed to be used to assess the current state of the agent and the possibilities of its interaction with other agents. The definitions of an agency and a family, the minimum elements of an evolving multi-agent system are given. An evolutionary strategy for constructing a model of an evolving multi-agent system is proposed. The procedures for the execution of the original evolutionary operators for processing the population of agents are described. Based on the proposed methodology, a software system for supporting the evolutionary design of agents and multi-agent systems was developed.

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00715.

At present, computational experiments are being carried out to study the proposed design model for multi-agent systems, as well as to evaluate the effectiveness of various operators and schemes for the formation of descendant agents, the necessary conditions for survival.

Multi-agent system; agent; resource agent; agency; evolutionary design; evolutionary operators; design methodology; hybrid methods.

Введение. В современных информационных системах существует несколько различных групп методов и подходов к созданию искусственных агентов и много-агентных систем (МАС), например, методологии восходящего либо нисходящего проектирования. Большинство из известных методологий требуют предварительного задания функций и типов агентов и строятся базе имеющихся коммуникационных протоколов. В таких конструкциях нет места для использования новых научных трендов, таких как механизмы самоорганизации, модели эволюции, принципы кооперации агентов в МАС [1–5].

Поэтому актуальной задачей является разработка новых принципов функционирования и создание новых методологий и подходов к проектированию агентов и МАС на базе биоинспирированных методов, принципов «искусственной жизни», моделей и подходов эволюционного проектирования [6]. Под термином «эволюционное проектирование» (ЭП) искусственной (технической) системы мы будем понимать целенаправленное использование различных моделей и принципов биологической эволюции на всех стадиях разработки системы. Данный подход относится к междисциплинарным и находится на стыке теории проектирования и теории самоорганизации. Наличие в системе элементов самоорганизации предполагает существование механизмов, позволяющих осуществлять взаимодействие (кооперацию) различных агентов в рамках многоагентной системы, также при этом предполагается, что агенты обладают свойствами позволяющими им адаптироваться к изменению внешней среды и развиваться, приобретать новые характеристики в процессе эволюции [7, 8].

Если внимательно присмотреться к фундаментальным принципам построения многоагентных систем и эволюционного моделирования, то можно заметить некоторые достаточно очевидные аналогии. Например, можно установить такой набор соответствий между терминами, используемыми в эволюционных алгоритмах и терминами теории многоагентных систем: «индивид» – «агент», «хромосома» – «свойства агента», «семья» – «агентство», «популяция» – эволюционирующая многоагентная система (ЭМАС) [1, 9].

При этом подобный подход можно обнаружить в трудах одного из создателей теории генетических алгоритмов Д. Холланда [10]. Он определял агента как искусственный организм, развивающийся в популяции себе подобных, стремящийся обучаться и адаптироваться к внешней среде. Такая интерпретация понятия агента вполне соответствует известным моделям эволюции, например по Дарвину (изменение свойств агентов в процессе эволюции, борьба за существование, естественный отбор) и, в то же время, удовлетворяет основным постулатам моделей «искусственной жизни» (наличие механизмов самовоспроизведения, самосохранения, саморегуляции агентов) [11, 12].

Если говорить о задаче проектирования, то можно сказать, что в процессе проектирования происходит преобразование абстрактных моделей высокого уровня в модели более низкого уровня, но при этом достаточно простые для практической реализации. Так вначале процесса проектирования разрабатывается модель агента, формируются роли и типы агентов, их иерархия. Затем строится модель услуг (сервисов) и модель контактов.

Агентно-ориентированный анализ может обеспечить понимание того, каким образом происходит взаимодействие агентов и в чем заключается задача каждого отдельного члена сообщества [13, 14].

Одним из очевидных примеров построения многоагентных систем, являются биоинспирированные модели и алгоритмы, например муравьиные или пчелиные колонии, рой светлячков и т.д. Муравьи (пчелы) являются естественными реактивными агентами, каждый из которых является достаточно примитивным и способен лишь на выполнение элементарных действий, являющихся реакцией на изменение окружающей обстановки [15, 16]. Но если рассматривать совместные действия муравьиной или пчелиной колонии, то мы видим, что возникает сложную систему коллективного поведения и взаимодействия, так называемый «роевой интеллект» (Swarm Intelligence) [17, 18].

Гибридные подходы к проектированию агентов и мультиагентных систем. В последнее время становится очевидным, что применение однородных методов для решения сложных проблем не позволяет решать стоящие задачи повышения эффективности разрабатываемых систем. В то же время, гибридизация, комбинирование разнородных подходов зачастую позволяет нивелировать недостатки, присущие каждому из используемых методов в отдельности. Гибридные (гетерогенные) системы состоят из различных элементов, объединенных решения поставленных задач [19, 20]. При этом в случае интеграции разнородных технологий возможно возникновение «синергетического эффекта» более высокого порядка, чем при объединении различных моделей в рамках одной технологии.

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.

Одним из распространенных типов гибридных систем являются нечеткие генетические (эволюционные) алгоритмы (НГА) [21, 22]. Нечеткий генетический алгоритм включает в себя следующие основные модули: модель нечеткого кодирования (декодирования); нечеткие генетические операторы; модуль нечетких правил.

Известно несколько способов кодирования решения:

- а) битовая строка – четкая информация.
- б) нечеткое кодирование – нечеткая информация 1-го типа (каждый ген характеризуется числом из интервала $[0,1]$).
- в) интервальное нечеткое кодирование – нечеткая информация 2-го типа (ген – это подинтервалы из интервала $[0,1]$);
- г) лингвистическое нечеткое кодирование (каждый ген есть нечеткое множество со своей функцией принадлежности).

Первый способ, считающийся классическим, был предложен Холландом. В этом случае каждый ген представляет собой двоичную строку из нулей и единиц. При кодировании производится перевод значений генов в их двоичное представление. Для декодирования необходима обратная операция.

При наличии достаточного количества достоинств, данное кодирование имеет и серьезные недостатки, в том числе:

- ◆ возможность появления запрещенных комбинаций;
- ◆ необходимость перевода параметров из целого представления в двоичное при кодировании решений и обратно при декодировании;
- ◆ большая сложность при работе с пространствами большой размерности и при необходимости получения решения большой точности и т.д.

Поэтому для наших целей более удобно использовать нечеткое кодирование с применением нечеткой информации 1-го типа. Использование в нечетких генетических алгоритмах нечеткого кодирования требует использования новых, отличных от классических, ориентированных на битовую строку, операторов генерации новых потомков. Нечеткие эволюционные (генетические) операторы могут строиться с использованием нечеткой логики.

Оператор мутации совместно с кроссинговером обеспечивает разнообразие в популяции. Классическая битовая мутация не подходит для НГА. Используем модификацию оператора мутации: $x^* = x \pm \Delta$, где $x \in [0, 1]$, а $\Delta \in [0, 0.1]$.

Нечеткий оператор кроссинговера (скрещивания) может выполняться на основе логических операций, например, таких как конъюнкция и дизъюнкция. Обобщенные нечеткие операции конъюнкции и дизъюнкции называются треугольными нормами (логическое «И») и конормами (логическое «ИЛИ»). Треугольные нормы T и конормы S – это бинарные операции в теории нечетких множеств, обладающие свойствами ограниченности, монотонности, коммутативности и ассоциативности.

Эволюционная модель получения агентов. Предлагаемая модель выступает в качестве инструмента эволюционного проектирования и предназначена получения агентов-потомков в результате различных механизмов взаимодействия агентов-родителей. При этом имеется некая популяция индивидов (агентов), которую можно назвать эволюционирующей многоагентной системой (ЭМАС). Формирование новых агентов происходит в процессе эволюции рассматриваемой популяции. Пусть имеется некоторая популяция агентов $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, где a_i – i -й агент, имеющий определенный набор свойств (параметров) (p_1, \dots, p_m) . Часть свойств агент получает по наследству, а другая часть приобретает в течение жизни агента. Набор параметров, передаваемых по наследству, будем обозначать (p_{a1}, \dots, p_{am}) , набор параметров, приобретаемых в течение жизни агента – (p_{b1}, \dots, p_{bm}) . Совокупность параметров (p_{a1}, \dots, p_{am}) образует генотип агента, который содержит информацию о состоянии самого агента и возможностях его взаимодействия с другими агентами. Для оценки текущего состояния агента и возможностей его взаимодействия с другими агентами (формирования потомка) будем использовать ресурсные параметры, такие как общий ресурс агента $RES(a_i)$ и ресурс, необходимый для рождения потомка $RES(a_{ij})$. При этом очевидно, что величина ресурса, необходимого для рождения потомка не может превышать общей величины имеющегося ресурса $RES(a_{ij}) < RES(a_i)$. В свою очередь, фенотип агента связан с набором (p_{b1}, \dots, p_{bm}) и определяется на основе различных правил в процессе взаимодействия с окружающей средой.

Предположим, что текущая популяция насчитывает G поколений, объединение в единое подмножество двух последовательных поколений популяции приводит к созданию агентства. В каждом поколении можно выделить группы взаимосвязанных индивидов: агенты – родители (*parents*) a_{pi} и агенты – потомки (*descendants*) a_{dj} , которые образуют семью (частный случай агентства). В результате объединения трех поколений агентов (или пары последовательных агентств) возникает минимальная единица (элементарное состояние) ЭМАС.

Каждый агент в агентстве имеет свой генотип и фенотип. Каждая пара родителей порождает, по меньшей мере, одного потомка в результате выполнения одного из множества эволюционных операторов [22–25]

$$a_{pi} \times a_{pj} \rightarrow a_{dk},$$

где $a_{pi} \times a_{pj}$ – взаимодействие пары агентов-родителей; a_{dk} – агент-потомок. Среди множества эволюционных операторов важнейшими являются операторы «создания начальной популяции», «мутации», «скрещивания», «отбора-селекции».

В основу модели положена эволюционная стратегия, включающая механизмы: воспроизведение, скрещивание и мутации. Схема реализации предлагаемой стратегии приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема алгоритма эволюции

1. *Создание начальной популяции.* Случайным образом создается начальная популяция агентов (особей) размером N .

2 – 3. *Блоки пополнения и расходования ресурсов.* В качестве механизма реализации функций пополнения и расходования ресурсов используется оператор мутации. Необходимо заметить, что оператор мутации применяется к определенному (фиксированному) гену, определяющему величину общего ресурса агента. Схема представлена на рис. 2.

Блок «*Выбора i -й особи в популяции*». Выбирается очередная особь в популяции с индексом i , который изменяется в пределах от 1 до N . Таким образом, перебираются все особи в популяции.

Блок «*Генерация вероятности получения дополнительного ресурса i -й особью*». Определяется вероятность получения i -й особью дополнительного ресурса. Для этого случайным образом генерируется число в интервале $(0, 1)$. В случае, если это число больше заданного значения вероятности ($P > P_{or}$) выполняется переход к следующему блоку.

Блок «*Генерация размера дополнительного ресурса и изменение ресурса особи*». Определяем размер приращения ресурса, для этого случайным образом выбирается число на интервале $(0, 1)$ – размер дополнительно ресурса много меньше общего ресурса агента. После чего общий ресурс особи увеличивается на величину сгенерированного дополнительного ресурса.

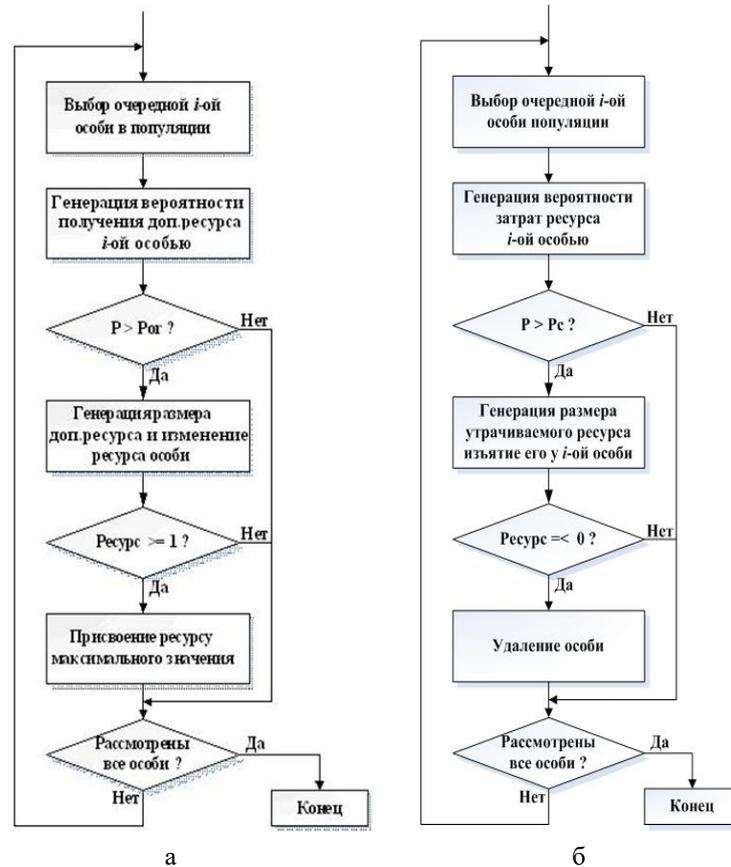


Рис. 2. Схема блоков расходования (а) и пополнения (б) ресурсов

Блоки «Ресурс ≥ 1 ?», «Присвоение ресурсу максимального значения». Эти два блока отвечают за проверку переполнения агента ресурсами. Ресурс особи в ходе приобретения дополнительного ресурса не может превышать максимально допустимое значение равное 1.

Блок «Рассмотрены все особи?» Проверяется выполнение условия окончания: Если просмотрены все особи от 1 до N, то переходим к следующему этапу алгоритма.

Расходование ресурсов осуществляется аналогично. Предполагается, что ресурс может быть потрачен на совершение различных действий. Так же как и в блоке пополнения, величина расходуемого ресурса выбирается случайным образом на интервале (0, 1). Если агент текущая величина ресурса снижается до 0, то он удаляется из популяции, т.е. “умирает”. Схема работы блока представлена на рис. 2,б.

4. Проверка условия окончания. Если текущее значение становится больше заданного значения G_{max} , процесс моделирования прерывается.

5. Блок скрещивания особей популяции. Реализует скрещивание особей в популяции. Схема алгоритма скрещивания изображена на рис. 3.

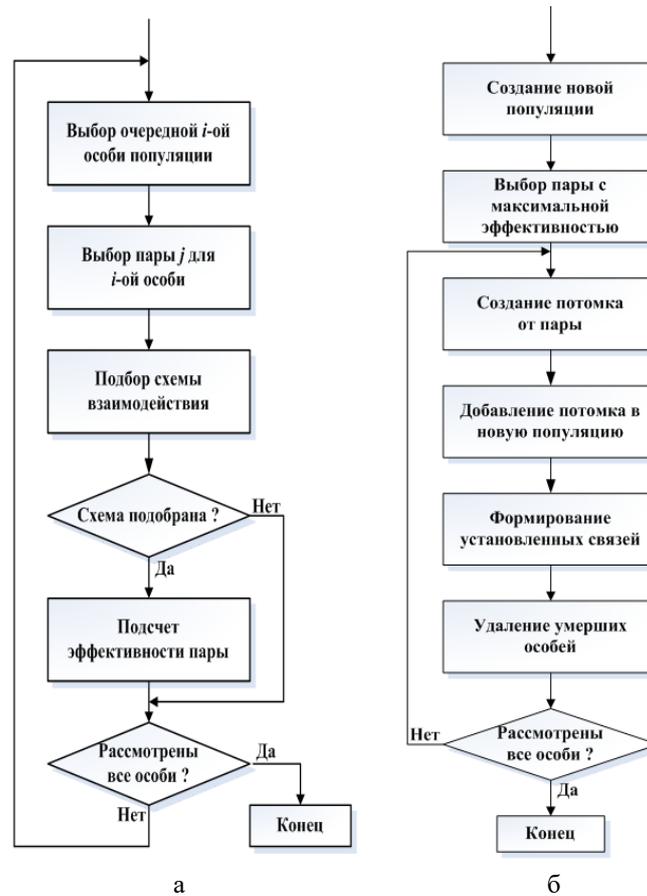


Рис. 3. Схема операторов скрещивания (а) и воспроизведения (б)

Блок «Выбор i -й особи в популяции». Выбирается очередная особь в популяции с индексом i , который изменяется в пределах от 1 до N . Таким образом, перебираются все особи в популяции.

Блок «Выбор пары j для i -й особи». Для очередной i -й особи случайным образом выбирается пара j .

Блок «Подбор схемы взаимодействия». В этом блоке осуществляется анализ генотипов выбранных особей, проверяется, удовлетворяют ли генотипы условиям срабатывания для схемы.

Блок «Схема подобрана?». Осуществляется проверка, была ли на предыдущем блоке подобрана схема взаимодействия, т.е. нашлась ли такая система условий, которой удовлетворяют генотипы выбранных агентов. В случае, если схему подобрать удалось, подсчитывается эффективность пары.

Блок «Рассмотрены все особи?» Проверяется выполнение условия окончания: Если просмотрены все особи от 1 до N , то переходим к следующему этапу алгоритма.

б. Операция воспроизведения. В этом блоке происходит формирование потомка, реализуется воспроизведение особей и формирование новой популяции. Потомок создается от пары обладающей максимальной эффективностью. Схема алгоритма воспроизведения приведена на рис. 3,б.

Блок «Создание новой популяции». Создается новая популяция особей, которая будет состоять из жизнеспособных особей текущей популяции и потомков. Номер поколения G для новой популяции увеличивается на единицу по сравнению с номером текущего поколения.

Блок «Выбор пары с максимальной эффективностью». Среди всех пар, для которых были подсчитаны эффективности, а, следовательно, были подобраны подходящие схемы взаимодействия, осуществляется выбор пары с максимальной эффективностью.

Блок «Создание потомка от пары». После выбора пары с максимальной эффективностью, создается потомок данной пары. В качестве оператора скрещивания используется схема, условиям срабатывания которой удовлетворяет данная пара.

Блок «Добавление потомка в популяцию». Созданный потомок добавляется в популяцию под номером $L+1$, где L текущее число особей в популяции.

Блок «Формирование установленных связей». Как уже отмечалось выше, мы отдельно рассматриваем связи на уровне генотипов агентов, и отдельно связи, установившиеся в результате взаимодействия агентов (фенотипические связи). После того, как новый агент добавлен в популяцию, необходимо сформировать связи между агентами, участвовавшими во взаимодействии, определить какие именно связи устанавливаются исходя из конкретной схемы взаимодействия.

Блок «Удаление умерших особей». В блоке проводится удаление особей из популяции, исчерпавших свой внутренний ресурс. Рассматриваются все особи от 1 до N .

Блок «Рассмотрены все особи?» Проверяет условие окончания блока.

В результате использования установленных схем взаимодействия (они же эволюционные операторы, операторы скрещивания), сопровождающихся порождением новых членов популяции, формируется множество различных структур S : $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_j\}$.

Описание некой синтезированной структуры S_i представляется как:

$$S_i = \{C_i, R_i\},$$

где C_i – множество компонентов структуры (агентов ее формирующих); R_i – множество связей между компонентами структуры.

Заключение. Общая методика эволюционного проектирования искусственных агентов и многоагентных систем построена. При ее разработке использованы понятия генотипа и фенотипа агентов: генотип связывается с наследованием ресурса агентов-родителей, а фенотип с условиями (правилами) их взаимодействия.

На основе предложенной методики была разработана программная система поддержки эволюционного проектирования агентов и МАС. Система реализована на языке высокого уровня C++ в интегрированной среде разработки C++Builder. В настоящее время проводятся вычислительные эксперименты для исследования предложенной модели проектирования многоагентных систем, оценки эффективности различных операторов и схем формирования агентов-потомков, необходимые условия выживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. – М.: Эдиториал УРСС, 2002.
2. Тарасов В.Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 55-63.
3. Тарасов В.Б. Восходящее и нисходящее проектирование многоагентных систем // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. – Самара: Самарский научный центр РАН, 1999. – С. 268-274.
4. Russel S.J., Norvig P. Artificial Intelligence. A modern Approach. – Prentice Hall, 2003.

5. *Luger G.F.* Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving. – 6th ed. – Addison Wesley, Boston MA, 2009.
6. *Тарасов В.Б., Голубин А.В.* Эволюционное проектирование: на границе между проектированием и самоорганизацией // Известия ТРТУ. – 2006. – № 8 (63). – С. 77-82.
7. *Wooldridge M.* An Introduction to Multi-Agent Systems. – 2nd ed. – New York: John Wiley and Sons, 2009.
8. *Wooldridge M., Jennings N.* Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey // Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages / ed. by M. Wooldridge, N. Jennings. – Berlin: Springer Verlag, 1995.
9. *Brooks R.* Intelligence Without Representation // Artificial Intelligence. – 1991. – Vol. 47. – P. 139-159.
10. *Holland J.H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems. – Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
11. *Редько В.Г.* Моделирование когнитивной эволюции. На пути к теории эволюционного происхождения мышления. – М.: Изд-во УРСС, 2015.
12. *Langton C.* (Ed.). Artificial Life. – New York: Addison-Wesley, 1988.
13. *Wooldridge M., Jennings N.R., Kinny D.* The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. – Vol. 3. – P. 285-312.
14. *Shoham Y.* Agent Oriented Programming // Artificial Intelligence. – 1993. – Vol. 60, No. 1. – P. 51-92.
15. *Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V.* Distributed Optimization by Ant Colonies // Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, Paris, France, F. Varela and P. Bourguin (Eds.). – Elsevier Publishing, 1991. – P. 134-142.
16. *Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V.* The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. Tech.Rep.IRIDIA/94-28, Université Libre de Bruxelles, Belgium, 1996.
17. *Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G.* Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. – New York: Oxford University Press, 1999.
18. *Гладков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009.
19. *Пранчивили И.В.* Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: СИНТЕГ, 2000.
20. *Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С.* Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
21. *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. Vol. 875. – Springer, Cham, 2020. – P. 246-257.
22. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gromov S.A.* Hybrid models of solving optimization tasks on the basis of integrating evolutionary design and multiagent technologies // Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 985. Artificial Intelligence Methods on Intelligent Algorithms. Proceeding of 8th Computer Science On-line Conference CSOC 2019. Vol. 2. – Springer Nature Switzerland AG 2019. – P. 381-391.
23. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Dmitrienko, N.A.* Integrated Model for Constructing Evolving Multi-Agent Subsystems // Proceedings of International Russian Automation Conference “RusAutoCon 2019”.
24. *Гладков Л.А., Гладкова Н.В.* Эволюционное проектирование как инструмент разработки многоагентных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 4 (206). – С. 26-37.
25. *Гладков Л.А., Гладкова Н.В.* Эволюционирующие многоагентные системы и эволюционное проектирование // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (214). – С. 48-59.

REFERENCES

1. *Tarasov B.B.* Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam [From multi-agent systems to intelligent organizations]. Moscow: Editorial URSS, 2002.
2. *Tarasov B.B.* Agenty, mnogoagentnye sistemy, virtual'nye soobshchestva: strategicheskoe napravlenie v informatike i iskusstvennom intellekte [Agents, multi-agent systems, virtual communities: strategic direction in computer science and artificial intelligence], *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence News], 1998, No. 2, pp. 55-63.

3. Tarasov B.B. Voskhodyashchee i niskhodyashchee proektirovanie mnogoagentnykh sistem [Ascending and descending design of multi-agent systems], *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh* [Problems of control and modeling in complex systems]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 1999, pp. 268-274.
4. Russel S.J., Norvig P. Artificial Intelligence. A modern Approach. Prentice Hall, 2003.
5. Luger G.F. Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving. 6th ed. Addison Wesley, Boston MA, 2009.
6. Tarasov B.B., Golubin A.V. Evolyutsionnoe proektirovanie: na granitse mezhdru proektirovaniem i samoorganizatsiyey [Evolutionary design: on the border between design and self-organization], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 8 (63), pp. 77-82.
7. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 2009.
8. Wooldridge M., Jennings N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey, *Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages*, ed. by M. Wooldridge, N. Jennings. Berlin: Springer Verlag, 1995.
9. Brooks R. Intelligence Without Representation, *Artificial Intelligence*, 1991, Vol. 47, pp. 139-159.
10. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
11. 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.
12. Langton C. (Ed.). Artificial Life. New York: Addison-Wesley, 1988.
13. Wooldridge M., Jennings N.R., Kinny D. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, Vol. 3, pp. 285-312.
14. Shoham Y. Agent Oriented Programming, *Artificial Intelligence*, 1993, Vol. 60, No. 1, pp. 51-92.
15. Colormi A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies, *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, Paris, France*, F. Varela and P. Bourginie (Eds.). Elsevier Publishing, 1991, pp. 134-142.
16. Colormi A., Dorigo M., Maniezzo V. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. Tech.Rep.IRIDIA/94-28, Université Libre de Bruxelles, Belgium, 1996.
17. Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. New York: Oxford University Press, 1999.
18. Gladkov L.A., Kureychik V.M., Kureychik V.V., Sorokoletov P.V. Bioinspirirovannyye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009.
19. Prangishvili I.V. Sistemnyy podkhod i obshchesistmenyye zakonomernosti [A systematic approach and system-wide patterns]. Moscow: SINTEG, 2000.
20. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Nechetkie modeli i seti [Fuzzy models and networks]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007.
21. 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*. Vol. 875. Springer, Cham, 2020, pp. 246-257.
22. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gromov S.A. Hybrid models of solving optimization tasks on the basis of integrating evolutionary design and multiagent technologies, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 985. *Artificial Intelligence Methods on Intelligent Algorithms. Proceeding of 8th Computer Science On-line Conference CSOC 2019*. Vol. 2. Springer Nature Switzerland AG 2019, pp. 381-391.
23. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Dmitrienko, N.A. Integrated Model for Constructing Evolving Multi-Agent Subsystems, *Proceedings of International Russian Automation Conference "RusAutoCon 2019"*.
24. Gladkov L.A., Gladkova N.V. Evolyutsionnoe proektirovanie kak instrument razrabotki mnogoagentnykh sistem [Evolutionary design as a tool for the development of multi-agent systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 4 (206), pp. 26-37.
25. Gladkov L.A., Gladkova N.V. Evolyutsioniruyushchie mnogoagentnyye sistemy i evolyutsionnoe proektirovanie [Evolving multi-agent systems and evolutionary design], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (214), pp. 48-59.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., профессор **В.Б. Тарасов**

Гладков Леонид Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371625; кафедра САПР; доцент.

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

Gladkov Leonid Anatol'evich – Southern Federal University; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371625; the department of CAD; associate professor.

Gladkova Nadezhda Viktorovna – e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; phone: +78634393260; the department of CAD; senior teacher.

УДК 681.2.089

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-61-73

С.И. Клевцов

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Рассматриваются вопросы выбора вида и параметров модели характеристики преобразования интеллектуального датчика физических величин на примере датчика давления. Характеристика преобразования интеллектуального датчика представляет собой математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для вычисления физической величины на основе электрических сигналов, которые поступают с измерительных каналов датчика. Модель характеристики преобразования должна быть адаптирована к конфигурации функции преобразования чувствительного элемента датчика и особенностям поведения этой функции при воздействии внешних дестабилизирующих факторов. В работе рассмотрены различные модели характеристики преобразования, определены особенности их применения, достоинства и недостатки, достижимые уровни погрешности аппроксимации реальной характеристики, которые влияют на конечную точность измерений интеллектуального датчика. Интеллектуальные датчики используются для задач измерения физических величин в различных технических системах и требования к точности измерений в реальных задачах различны. Точность измерений в значительной степени определяется степенью аппроксимации реальной характеристики датчика ее математической моделью. Чем сложнее модель, тем, как правило, сложнее ее реализовать в датчике и тем выше стоимость измерений. Поэтому важно управлять погрешностью аппроксимации характеристики преобразования, чтобы эффективно использовать датчик. Для управления погрешностью аппроксимации характеристики преобразования интеллектуального датчика давления предложено воспользоваться методом мульти сегментной пространственной аппроксимации, а в качестве сегментов использовать модели линейных или нелинейных пространственных элементов. Определены основные математические выражения, схема управления погрешностью. Представлены результаты моделирования, которые показывают возможность и преимущества использования метода для формирования пространственных моделей характеристики преобразования, которые адаптивны к изменениям реальной функции преобразования датчика, учитывают влияние внешних факторов на результаты измерений. Кроме того, метод позволяет модифицировать текущую модель пространственной аппроксимации, изменяя типы локальных пространственных элементов и таким образом, управлять погрешностью измерений.

Модель; интеллектуальный датчик; характеристика преобразования; погрешность; аппроксимация.

S.I. Klevtsov

SELECTING FEATURES OF THE MODEL TRANSFORMATION CHARACTERISTICS FOR AN INTELLIGENT PHYSICAL QUANTITY SENSOR

The paper discusses the issues of choosing the type and parameters of the model of the transformation characteristic of an intelligent sensor of physical quantities using the example of a pressure sensor. The transformation characteristic of an intelligent sensor is a mathematical, algorithmic and software for calculating a physical quantity based on electrical signals that come from the measuring channels of the sensor. The model of the conversion characteristic should be adapted to the configuration of the conversion function of the sensor's sensitive element and the behavior of this function under the influence of external destabilizing factors. The paper considers various models of the conversion characteristics, identifies the features of their application, advantages and disadvantages, attainable levels of approximation error of the real characteristic, which affect the final measurement accuracy of the smart sensor. Smart sensors are used for measuring physical quantities in various technical systems and the requirements for measurement accuracy in real-life tasks are different. The measurement accuracy is largely determined by the degree of approximation of the real characteristics of the sensor by its mathematical model. The more complex the model, the more difficult it is to implement in the sensor, and the higher the measurement cost. Therefore, it is important to control the conversion characteristic approximation error in order to use the sensor efficiently. To control the approximation error of the transformation characteristic of an intelligent pressure sensor, it is proposed to use the method of multi-segment spatial approximation, and use models of linear or nonlinear spatial elements as segments. The basic mathematical expressions, the error control scheme are determined. The results of modeling are presented, which show the possibility and advantages of using the method for the formation of spatial models of the transformation characteristics, which are adaptive to changes in the real transformation function of the sensor, take into account the influence of external factors on the measurement results. In addition, the method allows you to modify the current spatial approximation model by changing the types of local spatial elements and, thus, to control the measurement error.

Model; intelligent sensor; transformation characteristic; error; approximation.

Введение. Одной из важных задач разработки методов обработки результатов измерений в интеллектуальных датчиках является повышение точности и достоверности определения значений физических величин. Точность измерений во многих случаях определяет надежность и безопасность работы различных технических объектов. В интеллектуальном датчике используется модель характеристики преобразования, которая адаптирована к конфигурации функции преобразования чувствительного элемента датчика и особенностям поведения этой функции при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

Известно, что для аналогового датчика необходима линеаризация характеристики преобразования, которая достигается конструктивными и схемотехническими методами [1, 2]. Интеллектуальный датчик использует для определения характеристику преобразования, представленную в виде математических выражений и алгоритмов их реализации. Модель характеристики преобразования должна повторять форму реальной характеристики [3, 4]. Точность аппроксимации определяется требованиями задач, решаемых датчиком.

Таким образом, при построении модели характеристики преобразования интеллектуального датчика медленно меняющихся физических величин, например, давления, решается задачи формирования ее аппроксимации, которая должна соответствовать заданным требованиям. Выделим основные требования: заданная точность в диапазонах изменения физического сигнала и внешних факторов и допустимый уровень сложности вычислений. Требования к сложности вычислений связаны с возможностью реализации измерений в реальном времени с высокой скоростью, часто, в фоновом режиме.

Погрешность измерения физической величины интеллектуальным датчиком в значительной степени определяется выбором модели характеристики преобразования и, соответственно, погрешностью аппроксимации этой характеристики [5, 6]. Требования к точности измерений, в свою очередь, формируются исходя из анализа задач, которые решаются с использованием измеренных значений. Достижение высокой точности вычислений часто связано со сложными и ресурсоемкими моделями и алгоритмами и во многих случаях не нужно для решения поставленной задачи. Поэтому, при выборе модели характеристики преобразования датчика следует исходить из соображений достижения уровня достаточной точности вычислений значений физической величины.

Модели характеристики преобразования датчика физических величин.

Для обработки сигналов физических величин в интеллектуальных датчиках, таких как датчики давления, используются различные модели характеристик преобразования, которые базируются на пространственном представлении функции преобразования чувствительного элемента [1–10]. В этих моделях используется единое представления характеристики для всей области изменения полезного сигнала и внешних факторов.

Для градуировки датчика широко применяется простая кусочно-линейная аппроксимация характеристики датчика [1, 2, 6, 8]. Использование этой модели оправдано при незначительной нелинейности функции преобразования чувствительного элемента и невысоких требованиях к точности измерений.

Количество идентификационных точек, используемых для аппроксимации, зависит от требуемой точности. Для обеспечения приведенной относительной погрешности измерения давления не выше 0,5 % в работе [2] был выбран массив, содержащий 51 идентификационную точку области определения характеристики преобразования. Число калибровочных точек по оси давления (P) выбрано равным 17, а по оси температур (T) составляет три точки. В качестве калибровочной ординаты выбран код 12-разрядного АЦП. Выбор точек массива и запись в память контроллера осуществлялись на этапе калибровки датчика, а схема расчета давления состояла из нескольких шагов.

В результате использования модели кусочно-линейной аппроксимации удалось уменьшить погрешность, связанную с нелинейностью функции преобразования с 5 % до 0,05 %, а температурную погрешность с 2,5 % до 0,1 % (на каждые 10°C).

Однако, при проведении измерений в диапазоне температур от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ и используя результаты калибровки при $T_{\text{ср}}=20^{\circ}\text{C}$ получим только температурную составляющую погрешности на границах указанного диапазона порядка 0,6%. Тем не менее, его использование целесообразно и оправдано, когда к датчику не предъявляются высокие требования по точности.

В работе [9] модель характеристики преобразования представляет собой набор плоскостей, построенных на основе пересекающихся в пространстве $P \times U_P \times U_T$ прямых.

Пусть функция $P=P(U_P, U_T)$ имеет область определения $D(U_P, U_T)$: $U_P \in [U_{P1}, U_{P2}]$, $U_T \in [U_{T1}, U_{T2}]$. Разобьем область определения по оси OU_P на k равных частей и по оси OU_T на l равных частей. Получим $k \times l$ прямоугольных участков.

Будем приближать поверхность модели характеристики преобразования плоскостями на каждом участке $D_{n,m}$. Зафиксируем на участке $D_{n,m}$ средние значения переменных $U_{\text{ср},n}$ и $U_{\text{ср},m}$

$$U_{\text{ср},n} = U_{P1,n} + (U_{P2,n} - U_{P1,n})/2,$$

$$U_{\text{ср},m} = U_{T1,m} + (U_{T2,m} - U_{T1,m})/2,$$

где $U_{P1,n}$, $U_{P2,n}$, $U_{T1,m}$, $U_{T2,m}$ – границы участка $D_{n,m}$.

Выражения $P_{1,n,m} = P_{1,n,m}(U_{Pcp,n}, U_T)$ и $P_{2,n,m} = P_{2,n,m}(U_P, U_{Tcp,m})$ определяют взаимно перпендикулярные плоскости в пространстве $P \times U_P \times U_T$, каждая из которых также перпендикулярна плоскости $P=0$.

Используя экспериментальные данные, определяющие зависимость $P=P(U_P, U_T)$, где значения $U_P, U_T \in D_{n,m}$, методом наименьших квадратов получим уравнения двух прямых $P'_{1,n,m}(U_T) \in P_{1,n,m}$ и $P'_{2,n,m}(U_P) \in P_{2,n,m}$.

Эти прямые принадлежат перпендикулярным плоскостям и являются скрещивающимися. Плоскости $P_{1,n,m}$ и $P_{2,n,m}$ пересекаются по прямой, перпендикулярной плоскости $P=0$, а сама прямая пересекает эту плоскость в точке с координатами $(U_{Pcp,n}, U_{Tcp,m})$.

Для построения пересекающихся прямых $P''_{1,n,m}(U_T)$ и $P''_{2,n,m}(U_P)$ необходимо скрещивающиеся прямые сблизить на расстояние $\delta P = |P'_{1,n,m}(U_{Tcp,m}) - P'_{2,n,m}(U_{Pcp,m})|$, как показано на рис. 1.

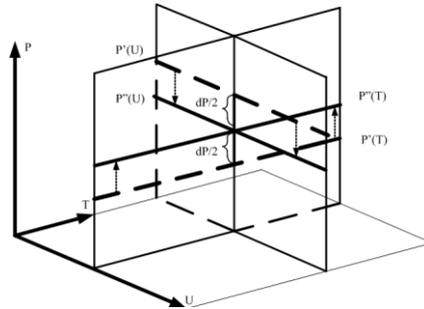


Рис. 1. Схема формирования пересекающихся прямых

Построение плоскости по двум пересекающимся прямым $P''_{1,n,m}(U_T)$ и $P''_{2,n,m}(U_P)$ осуществляется методами линейной алгебры. Таким образом, при аппроксимации указанным способом формируется система плоскостей, покрывающая всю поверхность характеристики датчика. Следует отметить, что на границах областей D_{mn} области определения $U_P \times U_T$ построенные плоскости, практически не соприкасаются. Это приводит к дополнительной ошибке аппроксимации, которую необходимо учитывать при использовании данного метода вычисления давления.

Модифицированный алгоритм линеаризации характеристики преобразования и температурной компенсации при вычислении давления предложен в работе [8].

В основе алгоритма лежит определение зависимости кода выходного параметра $P_{код}$, характеризующего сигнал давления, от кода температуры $T_{код}$ на прямоугольной сетке с равноотстоящими узлами ко каждой координате, причем для удобства вычислений в контроллере число интервалов разбиения области параметров, то есть давления и температуры, должно быть равно целой степени двух.

На этой основе формируется двумерная таблица значений кодов, которая используется для вычисления давления с учетом влияния температуры. Вычисление давления при промежуточных значениях кодов давления и температуры, не указанных в таблице, осуществляется с помощью аппроксимации по имеющимся точкам в таблице.

Результаты испытаний датчика с использованием микроконтроллера MSP430 с аппаратным умножителем показали, что алгоритм способен обеспечить погрешность не более ± 1 значащего разряда при 12-разрядном АЦП. Также отмечается высокая скорость реализации алгоритма [8].

В настоящее время в случае, если требуются более точные измерения давления, для аппроксимации характеристики преобразования используются полиномы. Давление представляется полиномиальной функцией электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала давления аналоговой части датчика. В матричном виде соотношения, определяющие модель, выглядят следующим образом [10–13]:

$$P = [1 \quad U \quad U^2] \times \begin{vmatrix} \gamma_{00} & \gamma_{01} & \gamma_{02} \\ \gamma_{10} & \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{20} & \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{vmatrix},$$

$$P = [1 \quad U] \times \begin{vmatrix} \gamma_{00} & \gamma_{01} & \gamma_{02} \\ \gamma_{10} & \gamma_{11} & \gamma_{12} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{vmatrix}.$$

Для упрощения вычислений обычно формируется единое представление характеристики преобразования для всего диапазона измеряемой физической величины и внешнего воздействующего фактора и, следовательно, определяется один набор коэффициентов аппроксимации.

В работе [10] показано, что компенсация характеристик пьезорезисторного кремниевго сенсора давления с использованием аппроксимации обратной функции передачи сенсора полиномом второго порядка по давлению и температуре позволила снизить максимальную погрешность измерения по отношению к характеристике сенсора в идеальном случае до $\pm 0,2\%$, а в температурном диапазоне от 0 до 70°C – до значений менее $\pm 0,1\%$. Температурная зависимость напряжения смещения нуля при этом находится в границах $\pm 0,2\%$ полного диапазона. Температурная компенсация уменьшила температурную зависимость чувствительности в 3,16 раза по отношению к некомпенсированному сенсору, чувствительность увеличилась 1,65 раза, максимальная нелинейность характеристики уменьшена в 26 раз.

Однако, указанный результат был достигнут при использовании довольно значительного массива исходных данных, примерно 10000 точек, что сложно реализовать при производстве партии датчиков.

Управление погрешностью аппроксимации при выборе пространственной модели характеристики преобразования датчика. Для управления погрешностью аппроксимации характеристики преобразования датчика можно воспользоваться методом мультисегментной пространственной аппроксимации (МСПА ХП), а в качестве сегментов использовать модели линейных или нелинейных пространственных элементов [13–20]. В методе реальная характеристика преобразования заменяется системой локальных поверхностей. При этом эти поверхности в совокупности повторяют форму реальной характеристики. Тип сегмента, его геометрические параметры позволяют управлять точностью аппроксимации характеристики преобразования датчика в зависимости от требований задачи, которую он решает.

Метод базируется на нескольких основных положениях [13, 19, 20].

Модель пространственной характеристики преобразования должна повторять конфигурацию функции преобразования чувствительного элемента с учетом влияния внешних и внутренних факторов, таких как температура, нелинейность, дрейф нуля.

Пространственная аппроксимация характеристики преобразования датчика должна удовлетворять требованиям, которые определяются решаемой задачей. Основные требования: погрешность аппроксимации характеристики в заданном диапазоне измерения физической величины и изменения дестабилизирующего фактора и уровень сложности вычислений.

Пространственная аппроксимация характеристики преобразования формируется системой локальных линейных или нелинейных пространственных элементов (сегментов). Потенциально возможным вариантом может быть использование не-

линейных и нелинейных элементов в одной модели характеристики преобразования. Использование линейной или нелинейной функции для формирования пространственного элемента определяется требованиями задачи и реальной пространственной конфигурацией функции преобразования чувствительного элемента.

Сшивка пространственных элементов модели на границе раздела их областей определения не является необходимой. Более того, сшивка элементов может ограничить возможности в подборе функциональных зависимостей, формирующих сегменты. Поэтому пространственные элементы могут перекрывать друг друга (рис. 2) Важно только обеспечить на границе раздела достижение заданной погрешности аппроксимации характеристики преобразования при выборе любого из сегментов в процессе проведения измерений.

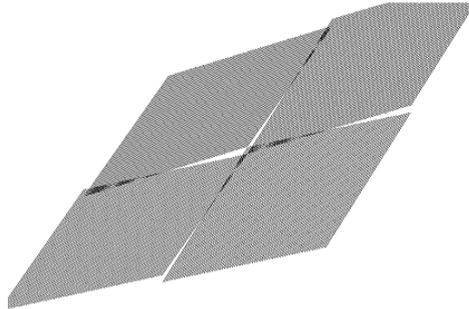


Рис. 2. Схема перекрытия пространственных элементов, аппроксимирующих характеристику преобразования

Наиболее опасным внешним воздействующим фактором, существенно влияющим на погрешность измерения медленно меняющейся физической величины, например, давления, является температура окружающей среды. Тогда в общем виде пространственная модель характеристики преобразования датчика давления с учетом влияния температуры представляется выражением:

$$P_t = P(U_{Pt}, U_{Tt}, \bar{\gamma}_{\alpha\beta}, \Omega_{\alpha\beta}, F_{\alpha\beta}, \varepsilon_P),$$

где P_t – значение давления в момент времени t ;

U_{Pt} – значение электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала давления аналоговой части интеллектуального датчика (далее, канал давления датчика) в момент времени t ;

U_{Tt} – значение электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала температуры аналоговой части интеллектуального датчика (далее, сигнал канала температуры) в момент времени t ;

$\Omega_{\alpha\beta} = \bar{U}_{P\alpha} \cup \bar{U}_{T\beta}$ – область определения α -го сегмента характеристики,

α – номер интервала разбиения области изменения сигнала канала давления,

$\alpha = 1, \dots, L_P$;

β – номер интервала разбиения области изменения сигнала канала темпера-

туры, $\beta = 1, \dots, L_T$;

L_{PT} – общее количество сегментов;

$\bar{U}_{P\alpha} = \{U_P \in [U_{P,\alpha-1}, U_{P,\alpha}]\}$ – диапазон изменений значений электрического сигнала по каналу давления для области определения α -го сегмента;

$U_{P,\alpha-1}, U_{P,\alpha}$ – нижняя и верхняя границы диапазона $\bar{U}_{P\alpha}$;

$\bar{U}_{T\beta} = \{U_T \in [U_{T,\beta-1}, U_{T,\beta}]\}$ – диапазон изменений значений электрического сигнала по каналу температуры для области определения β -го сегмента;

$U_{T,\beta-1}, U_{T,\beta}$ – нижняя и верхняя границы диапазона $\bar{U}_{T\beta}$;
 $\bar{\gamma}_{\alpha\beta}$ – массив значений коэффициентов аппроксимации -го сегмента характеристики;
 $F_{\alpha\beta}$ – функция, аппроксимирующая -й сегмент характеристики датчика;
 ε_p – максимальная погрешность аппроксимации характеристики преобразования.

Для построения МСПА ХП датчика используется информация о поведении функции преобразования чувствительного элемента (ЧЭ) при воздействии измеряемой физической величины и наиболее значимого внешнего фактора, в данном случае, давления и температуры. Эти данные получают в результате градуировочных испытаний и объединяются в массив значений электрических сигналов канала давления и канала температуры [19].

Можно использовать различные функциональные зависимости для построения сегментов МСПА ХП датчика в виде локального линейного элемента (плоскости) или локального нелинейного элемента (поверхности).

Если задача заключается в достижении приемлемой точности аппроксимации и низкой сложности вычислений в микроконтроллере, то для аппроксимации характеристики преобразования целесообразно использовать представление в виде системы сегментов, каждый из которых является линейным пространственным элементом (ЛПЭ) в пространстве измеряемых параметров [13, 16, 19, 20].

Однако, если требуется более высокая точность вычислений, то в качестве элементов модели характеристики преобразования целесообразно использовать нелинейные пространственные элементы (НПЭ) [13, 19, 20].

Возможен вариант, когда в области определения характеристики преобразования можно выделить подобласти, которые обладают более низкой нелинейностью по сравнению с другими. Тогда можно комбинировать использование ЛПЭ и НПЭ для управления погрешностью и снижения сложности вычислений.

Наиболее приемлемыми моделями сегментов являются плоскости и поверхности в виде полинома [13, 16, 18–20].

Модель аппроксимирующей плоскости:

$$P = A_{\alpha\beta} + B_{1\alpha\beta} \cdot U_{Pt} + B_{2\alpha\beta} \cdot U_{Tt}, \quad (1)$$

где $A_{\alpha\beta}, B_{1\alpha\beta}, B_{2\alpha\beta}$ – коэффициенты аппроксимации для формирования сегмента $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$ в его области определения $\Omega_{\alpha\beta}$ в виде линейного пространственного элемента.

Модель аппроксимирующей поверхности в виде полинома второй или третьей степени:

$$P = \sum_{i=0}^l a_i^{\alpha\beta} \cdot U_{Pt}^i, \quad l = 2, 3 \quad (2)$$

$$a_i^{\alpha\beta} = \sum_{l=0}^L \gamma_{il}^{\alpha\beta} \cdot U_{Tt}^l, \quad L = 2, 3, \quad (3)$$

где $a_i^{\alpha\beta}$ и $\gamma_{il}^{\alpha\beta}$ – коэффициенты аппроксимации для формирования сегмента $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$ в его области определения $\Omega_{\alpha\beta}$ в виде нелинейного пространственного элемента. Коэффициенты $a_i^{\alpha\beta}$ зависят только от температуры, а $\gamma_{il}^{\alpha\beta}$ – не зависят от температуры и являются постоянными величинами для каждого сегмента $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$;

U_{Pt} и U_{Tt} – значения электрических сигналов канала давления и канала температуры датчика в момент времени t .

Выражение (2) учитывает нелинейность характеристики при фиксированной температуре, а выражение (3) описывает нелинейность характеристики при изменении температуры.

Коэффициенты аппроксимации в выражениях (1), (2) и (3) определяются с помощью метода наименьших квадратов для каждого сегмента $P_{\text{УТ}}^{\alpha\beta}$.

Использование метода МСПА ХП датчика для вычислений значений давления с компенсацией влияния температуры осуществляется следующим образом:

Исходными данными для вычислений являются значения электрических сигналов канала давления U_{Pk} и канала температуры U_{Tk} . Они соответствуют физическим сигналам давления P_k и температуры T_k .

По известным значениям электрических сигналов U_{Pk} и U_{Tk} находится область определения сегмента пространственной характеристики преобразования. На первом этапе определяется номер интервала разбиения по температуре β , которой принадлежит текущее значение электрического сигнала канала температуры ($U_{Tk} \in \Omega_{\alpha\beta}$). Затем, используя найденный номер интервала разбиения по температуре β , находится номер интервала разбиения α , которой принадлежит текущее значение сигнала канала давления ($U_{Pk} \in \Omega_{\alpha\beta}$).

Для полученной области определения сегмента $\Omega_{\alpha\beta}$ выбирается соответствующий этой области определения сегмент, сформированный на этапе построения модели. Фактически используется соответствующее сегменту функциональное выражение и значения коэффициентов аппроксимации.

Вычисляется давление согласно выражениям (1) или (2), используя выбранные коэффициенты аппроксимации и значений электрических сигналов каналов давления и температуры.

Результаты моделирования пространственной характеристики преобразования. Проверка возможности управления погрешностью при использовании МСПА ХП в интеллектуальном датчике осуществлялась на основе данных градуировочных испытаний двух чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков давления, ЧЭ №1 и ЧЭ №2, рассчитанных на измерение давления до 60 кгс/см² и 10 кгс/см² соответственно в диапазоне температур от - 40⁰С до +80⁰С.

Представленные данные испытаний характеризуются небольшой нелинейностью при фиксированной температуре. Нелинейность фиксировалась на начальном и конечном участках диапазона изменения давления. Зависимость выходного сигнала ЧЭ от температуры значительная и имеет нелинейный характер. При низких температурах наблюдается увеличение сигнала при росте температуры, при высоких температурах при росте температуры сигнал уменьшается.

Реальная функция преобразования ЧЭ представляет собой поверхность в системе параметров $P \times U_p \times U_T$. Нижняя и верхняя части поверхности (по оси давления) повернуты друг относительно друга относительно условной линии раздела. Например, для ЧЭ № 2, при $P \sim 360-380$ КПа.

Для интеллектуального датчика с ЧЭ №1 пространственная характеристика преобразования формировалась на основе ЛПЭ размерами 6 кгс/см² $\times 20^\circ\text{C}$, НПЭ – 12 кгс/см² $\times 40^\circ\text{C}$. Для интеллектуального датчика с ЧЭ №2 размеры ЛПЭ были выбраны 1 кгс/см² $\times 20^\circ\text{C}$, а НПЭ – 2 кгс/см² $\times 40^\circ\text{C}$.

На размеры пространственных элементов влияют объемы испытаний. В данном случае были выбраны размеры, наименьшие из возможных.

На рис. 3, 4 представлены графики относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования ЧЭ №1 с использованием ЛПЭ и НПЭ при температурах $T = -40^\circ\text{C}$ и $T = 80^\circ\text{C}$.

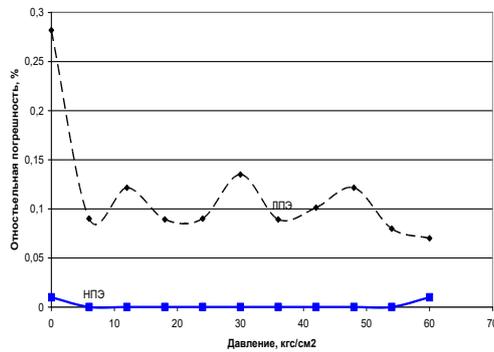


Рис. 3. График относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования датчика с ЧЭ №1 при $T = -40^{\circ}\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

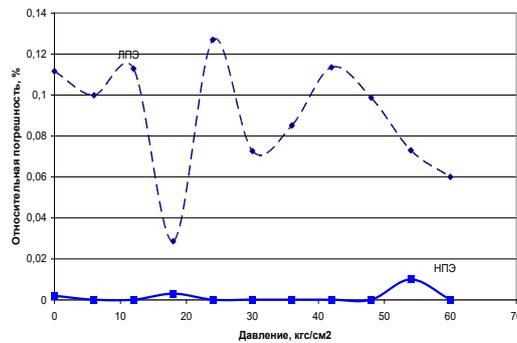


Рис. 4. График относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования датчика с ЧЭ №1 при $T = 80^{\circ}\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

На рис. 5 и 6 представлены аналогичные графики относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования для ЧЭ №2.

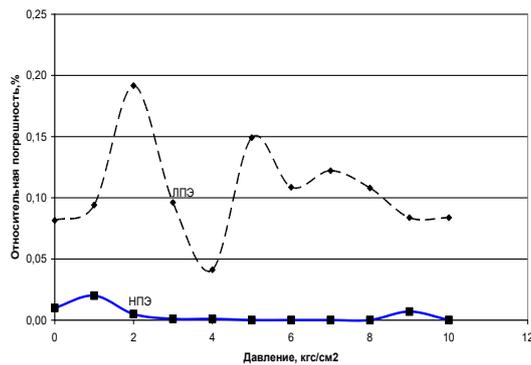


Рис. 5. График относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования датчика с ЧЭ №2 при $T = -40^{\circ}\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

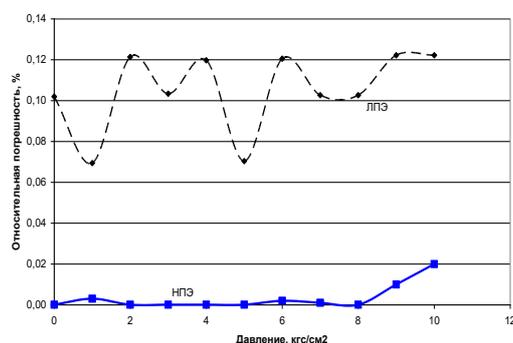


Рис. 6. График относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования датчика с ЧЭ №2 при $T = 80^{\circ}\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

Заключение. Анализ результатов моделирования показывает, что наименьшая погрешность аппроксимации характерна для случая использования нелинейных пространственных элементов. Например, относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования с использованием НПЭ на поддиапазисте размером $2 \text{ кгс/см}^2 \times 40^{\circ}\text{C}$ для ЧЭ № 2 не выше $0,03\%$ в диапазоне изменения давления от 0 кгс/см^2 до 10 кгс/см^2 и температур от -40°C до 80°C .

В случае использования линейных пространственных элементов погрешность аппроксимации выше. Для ЧЭ №1 и №2 погрешность аппроксимации заключена в среднем в диапазоне $0,1\% \pm 0,05\%$, что значительно выше по сравнению с погрешностью при применении НПЭ. Плоскостная модель сегмента МСПА ХП, естественно, менее чувствительна к нелинейностям исходной функции преобразования ЧЭ, ее адаптационные способности ниже относительно нелинейно модели.

Однако, если задача, поставленная перед датчиком, не требует очень высокой точности измерений, то целесообразно использовать линейные модели сегментов, поскольку они характеризуются низкой сложностью и, соответственно, простотой вычислений давления. Это влияет на выбор контроллера датчика, его стоимость и стоимость измерений.

Порядок использования МСПА ХП для вычислений давления с учетом влияния температуры способствует комбинированному применению линейных и нелинейных пространственных элементов в рамках одной модели МСПА ХП. Но процедура подбора типа сегмента должна начинаться с оценки возможности использования сначала линейного пространственного элемента, а в случае невозможности выполнения требований по точности, анализа использования нелинейного элемента.

Кроме того, метод построения МСПА ХП позволяет модифицировать текущую модель пространственной аппроксимации, изменяя типы локальных пространственных элементов и таким образом, управлять погрешностью измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hillea P., Höhlera R., Stracka H. A Linearisation and Compensation Method for Integrated Sensors // Sensors and Actuators A: Physical. – 1994. – Vol. 44, Issue 2. – P. 95-102.
2. Бобровников Н.Р., Яркин С.В., Гридин Ю.Н., Стрыгин В.Д., Чертов Е.Д. Математическое обеспечение микропроцессорных преобразователей аналоговых пневматических сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 2. – С.36-39.
3. Bartkovej J., Karovičová M. Approximation by Rational Functions // Measurement Science Review. – 2001. – Vol. 1, No. 1. – P. 63-65.

4. Гутников В.С. Тенденции развития электронных измерительных преобразователей для датчиков // Приборы и системы управления. – 1990. – № 10. – С. 32-35.
5. Bluemm C. Weiss R. Weigel R. Brenk D. Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling // Industrial Electronics (ISIE). 2010. IEEE International Symposium. 4-7 July 2010. – P. 3356-3361.
6. Gorbunov S.F., Tsylin B.V. Linearization of calibration characteristics of capacitance pressure sensors // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 53, No. 10. – P. 1113-1117.
7. Patra J.C. Chakraborty G. Meher P.K. Neural-Network-Based Robust Linearization and Compensation Technique for Sensors Under Non-linear Environmental Influences // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2008. – Vol. 55, Issue 5. – P.1316-1327.
8. Мухатаев Н.А. Алгоритм линеаризации и температурной компенсации характеристик преобразователей // Матер. третьей научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Т. 2. – Таганрог, ТТИ ЮФУ, 2008. – С. 74-76.
9. Клевцов С.И., Линьков В.С. Пространственная аппроксимация градуировочной характеристики датчика давления // Матер. международной научной конференции "Анализ и синтез как методы научного познания". Ч. 2. – Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2004. – С. 8-15.
10. Шапонич Д., Жигич А. Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 1. – С. 54-60.
11. Клевцов С.И. Пространственно-полиномиальные модели аппроксимации градуировочной характеристики интеллектуального датчика // Тр. международных научно-технических конференций "Интеллектуальные системы" (IEEE AIS'04) и "Интеллектуальные САПР" (CAD-2004): Научные издания в 3-х т. Т. 2. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2004. – С. 309-314.
12. Клевцов С.И. Модели и методы построения прецизионных градуировочных характеристик интеллектуальных датчиков давления // Известия ТРТУ. – 2007. – № 3. – С. 110-118.
13. Клевцов С.И., Клевцова А.Б. Мульти сегментная пространственная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика // Матер. международной научной конференции "Цифровые методы и технологии". Ч. 4. – Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2005. – С. 21-26.
14. Пьявченко О.Н., Мокров Е.А., Панич А.Е., Клевцов С.И., Пьявченко А.О., Федоров А.Г., Удод Е.В. Методы, модели, алгоритмы и архитектура прецизионных интеллектуальных датчиков давления. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 130 с.
15. Клевцов С.И. Особенности применения моделей градуировочных характеристик датчиков давления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 1 (78). – С. 25-26.
16. Клевцов С.И., Удод Е.В. Пространственная плоскостная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления // Известия ТРТУ. – 2005. – № 1. – С. 99-107.
17. Пьявченко О.Н. Клевцов С.И. Повышение точности обработки результатов измерения в интеллектуальных датчиках-измерителях физических сигналов // Электроника и системы управления. – 2006. – № 1. – С. 16-21.
18. Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
19. Клевцов С.И. Мульти сегментная пространственная аппроксимация градуировочной характеристики микропроцессорного датчика // Метрология. – 2011. – № 7. – С. 26-36.
20. Klevtsov and Udod Y. Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors // in Proc. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2015. – P. 1-5. – Doi: 10.1109 / SIBCON.2015.7147097.

REFERENCES

1. Hillea P., Höhlera R., Stracka H. A Linearisation and Compensation Method for Integrated Sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994, Vol. 44, Issue 2, pp. 95-102.
2. Bobrovnikov N.R., Yarkin S.V., Gridin Yu.N., Strygin V.D., Chertov E.D. Matematicheskoe obespechenie mikroprotsessornykh preobrazovateley analogovykh pnevmaticheskikh signalov [Mathematical support of microprocessor converters of analog pneumatic signals], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2002, No. 2, pp. 36-39.

3. Bartkovjak J., Karovičová M. Approximation by Rational Functions, *Measurement Science Review*, 2001, Vol. 1, No. 1, pp. 63-65.
4. Gutnikov V.S. Tendentsii razvitiya elektronnykh izmeritel'nykh preobrazovateley dlya datchikov [Trends in the development of electronic measuring transducers for sensors], *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and control systems], 1990, No. 10, pp. 32-35.
5. Bluemm C., Weiss R., Weigel R., Brenk D. Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling, *Industrial Electronics (ISIE). 2010. IEEE International Symposium. 4-7 July 2010*, pp. 3356-3361.
6. Gorbunov S.F., Tsylin B.V. Linearization of calibration characteristics of capacitance pressure sensors, *Measurement Techniques*, 2011, Vol. 53, No. 10, pp. 1113-1117.
7. Patra J.C., Chakraborty G., Meher P.K. Neural-Network-Based Robust Linearization and Compensation Technique for Sensors Under Non-linear Environmental Influences, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2008, Vol. 55, Issue 5, pp.1316-1327.
8. Mukhataev N.A. Algoritm linearizatsii i temperaturnoy kompensatsii kharakteristik preobrazovateley [The algorithm of linearization and temperature compensation of converter characteristics], *Mater. tret'ey nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the third scientific and practical conference "Perspective systems and management tasks"]. Vol. 2. Taganrog, TTI YuFU, 2008, pp. 74-76.
9. Klevtsov S.I., Lin'kov V.S. Prostranstvennaya approksimatsiya graduirovochnoy kharakteristiki datchika davleniya [Spatial approximation of the calibration characteristic of the pressure sensor], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Analiz i sintez kak metody nauchnoy poznaniya"* [Materials of the international scientific conference "Analysis and synthesis as methods of scientific cognition"]. Part 2. Taganrog: Izd-vo "Anton", TRTU, 2004, pp. 8-15.
10. Shaponich D., Zhigich A. Korrektsiya p'ezorezistivnogo datchika davleniya s ispol'zovaniem mikrokontrollera [Correction of a piezoresistive pressure sensor using a microcontroller], *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and techniques of the experiment], 2001, No. 1, pp. 54-60.
11. Klevtsov S.I. Prostranstvenno-polinomial'nye modeli approksimatsii graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika [Spatial-polynomial models of approximation of the calibration characteristic of an intelligent sensor] *Tr. mezhdunarodnykh nauchno-tekhnicheskikh konferentsiy "Intellektual'nye sistemy" (IEEE AIS'04) i "Intellektual'nye SAPR" (CAD-2004): Nauchnye izdaniya v 3-kh t. T. 2* [Proceedings of the international scientific and technical conferences "Intelligent Systems" (IEEE AIS '04) and "Intelligent CAD" (CAD-2004). Scientific publications in 3 vol. Vol. 2]. Moscow: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 2004, pp. 309-314.
12. Klevtsov S.I. Modeli i metody postroeniya pretsizionnykh graduirovochnykh kharakteristik intellektual'nykh datchikov davleniya [Models and methods for constructing precision calibration characteristics of intelligent pressure sensors], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2007, No. 3, pp. 110-118.
13. Klevtsov S.I., Klevtsova A.B. Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya model' graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika [Multi-segment spatial model of the calibration characteristic of an intelligent sensor], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "TSifrovye metody i tekhnologii"* [Materials of the international scientific conference "Digital methods and technologies"]. Part 4. Taganrog: Izd-vo "Anton", TRTU, 2005, pp. 21-26.
14. P'yavchenko O.N., Mokrov E.A., Panich A.E., Klevtsov S.I., P'yavchenko A.O., Fedorov A.G., Udod E.V. Metody, modeli, algoritmy i arkhitektura pretsizionnykh intellektual'nykh datchikov davleniya [Methods, models, algorithms and architecture of precision intelligent pressure sensors]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007, 130 p.
15. Klevtsov S.I. Osobennosti primeneniya modeley graduirovochnykh kharakteristik datchikov davleniya [Features of application of models of calibration characteristics of pressure sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 1 (78), pp. 25-26.
16. Klevtsov S.I., Udod E.V. Prostranstvennaya ploskostnaya model' graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika davleniya [Spatial planar model of the calibration characteristic of an intelligent pressure sensor], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2005, No. 1, pp. 99-107.
17. P'yavchenko O.N., Klevtsov S.I. Povyshenie tochnosti obrabotki rezul'tatov izmereniya v intellektual'nykh datchikakh—izmeritelyakh fizicheskikh signalov [Improving the accuracy of processing measurement results in intelligent sensors-meters of physical signals], *Elektronika i sistemy upravleniya* [Electronics and control systems], 2006, No. 1, pp. 16-21.

18. *Semenov L.A., Siraya T.N. Metody postroeniya graduirovocnykh kharakteristik sredstv izmereniy [Methods for constructing calibration characteristics of measuring instruments]. Moscow: Izd-vo standartov, 1986.*
19. *Klevtsov S.I. Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya approksimatsiya graduirovocnoy kharakteristiki mikroprotssornogo datchika [Multi-segment spatial approximation of the calibration characteristic of a microprocessor sensor], Metrologiya [Metrology], 2011, No. 7, pp. 26-36.*
20. *Klevtsov and Udod Y. Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors, in Proc. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015, pp. 1-5. DOI: 10.1109 / SIBCON.2015.7147097.*

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

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 539.3, 51-7, 519.6, 517.9, 53.082.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-73-87

А.Г. Клово, А.А. Илюхин, Г.В. Куповых, И.А. Ляпунова

ОБОБЩЕННЫЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ВНУТРЕННИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

При решении задач, связанных с исследованием прочностных свойств различных конструкций, часто используются некоторые наборы тригонометрических (синусы или косинусы), а также гиперболических функций, которые циклично при взятии производных последовательно переходят друг в друга. Эти наборы состоят из двух функций, причем последняя из этих функций при дифференцировании переходит в первую, взятую соответственно со знаком «плюс» (тригонометрическая система первого типа) или «минус» (тригонометрическая система второго типа). Тригонометрические и гиперболические функции также используются при решении многих прикладных задач, математические модели которых содержат вторые производные по пространственным переменным. Если математическая модель содержит производные четвертого порядка по пространственным переменным, то при решении соответствующих задач можно использовать функции, четвертые производные которых пропорциональны этим функциям. Известен ряд работ по общей теории систем функций, где описаны обобщенные тригонометрические системы (ОТС) функций, производные определенного порядка которых пропорциональны этим функциям. В данной работе эта теория развивается в направлении исследования квадратичных форм функций, составляющих ОТС. Показано, что квадратичные формы функций ОТС могут сами по себе являться функциями ОТС того же порядка (первого или второго типов). Полученные тождества и созданная теория используется для решения спектральных задач для оператора четвертого порядка для функций с определенными условиями. Специфика рассматриваемых задач заключается в том, что помимо стандартных граничных условий имеются дополнительные условия на внутренней границе. Эти условия недостаточны для того, чтобы автономно решать задачу в каждой отдельной области в которых заданы исследуемые функции. Использование установленных в работе свойств ОТС позволяет решать такие задачи во всей рассматриваемой области.

Дифференциальный оператор; спектр; обобщенные тригонометрические системы; внутренняя граница; собственные функции; собственные значения; самосопряженность; ортонормированность.

A.G. Klovo, A.A. Pyukhin, G.V. Kupovykh, I.A. Lyapunova

GENERALIZED TRIGONOMETRIC SYSTEMS AND SPECTRAL TASKS WITH ADDITIONAL INTERNAL BOUNDARY CONDITIONS

When solving problems related to the study of the strength properties of various structures, some sets of trigonometric (sine or cosine), as well as hyperbolic functions are often used, which cyclically pass into each other when taking derivatives. These sets consist of two functions, and the last of these functions, when differentiating, passes into the first, taken respectively with a plus sign (a trigonometric system of the first type) or a minus sign (a trigonometric system of the second type). Trigonometric and hyperbolic functions are also used in solving many applied problems, whose mathematical models contain second derivatives in spatial variables. If the mathematical model contains fourth-order derivatives with respect to spatial variables, then when solving the corresponding problems, it is possible to use functions whose fourth derivatives are proportional to these functions. There are a number of works on the general theory of systems of functions, where generalized trigonometric systems (GTS) of functions are described, the derivatives of a certain order of which are proportional to these functions. In this paper, this theory is developed in the direction of studying the quadratic forms of the functions that make up the GTS. It is shown that the quadratic forms of GTS functions can themselves be GTS functions of the same order (of the first or second types). The obtained identities and the created theory are used to solve spectral problems for a fourth-order operator for functions with certain conditions. The specificity of the problems under consideration is that in addition to the standard boundary conditions, there are additional conditions on the inner boundary. These conditions are not sufficient to independently solve the problem in each separate domain in which the functions under study are specified. The use of the GTS properties identified herein allows us to solve such problems in the entire area under consideration.

Differential operator; spectrum; generalized trigonometric systems; internal boundary; eigenfunctions; eigenvalues; self-conjugacy; orthonormality.

Введение. Академик А.Н. Крылов [1 с. 30] для расчета закритического поведения конструкций использовал функции, четвертые производные которых пропорциональны самой функции. В работах [2–6] эти же функции использовались для решения других прочностных задач. Свойства таких систем функций было использовано в работах [7–8] для исследования вопросов разрушения кварцевых резонаторов. В частности, при решении спектральных задач с внутренними граничными условиями использовался метод промежуточных задач Вайнштейна [9–13].

В работе [14] введено понятие обобщенной тригонометрической системы (ОТС). Это набор определенного числа функций, которые при дифференцировании последовательно переходят друг в друга. При этом производная от последней функции переходит в первую, взятую со знаком плюс (ОТС первого типа) или со знаком минус (ОТС второго типа). Кроме того, для функций ОТС требуется выполнение начальных условий. При $x=0$ все функции системы равны 0, а последняя функция равна 1. Интегральные свойства функций этих систем четного порядка в этой работе были сформулированы в [14] интуитивно и соответствующие формулы доказаны путем дифференцирования левой и правой их частей.

В работах [15–20] проведены исследования дифференциальных свойств обобщенных тригонометрических систем и их квадратичных форм. В итоге построена тригонометрия ОТС произвольного порядка, показана специфика систем четного и нечетного порядков. Изучение свойств матриц квадратичных форм, их преобразований при взятии производной квадратичной формы позволило вывести серию интегральных свойств ОТС.

В настоящей работе изучаются дополнительные свойства обобщенных тригонометрических систем, связанные с исследованием их квадратичных форм. Полученные свойства позволяют, не используя методы промежуточных задач, приступить напрямую к изучению спектральных свойства оператора дифференцирования порядка 4 с условиями на внешней и внутренней границах.

Определение функций ОТС порядка 4. Для построения теории ОТС четвертого порядка дадим следующие определения.

Определение 1. Функции $K_1(x)$, $K_2(x)$, $K_3(x)$, $K_4(x)$, такие что $(K_1(x))' = K_2(x)$, $(K_2(x))' = K_3(x)$, $(K_3(x))' = K_4(x)$, $(K_4(x))' = K_1(x)$, $K_i(0) = 0$, $i = 1, 2, 3$, $K_4(0) = 1$ образуют обобщенную тригонометрическую систему порядка 4 типа 1 (*o.m.c.*[4;1]).

Определение 2. Функции $\Phi_1(x)$, $\Phi_2(x)$, $\Phi_3(x)$, $\Phi_4(x)$, такие что $(\Phi_1(x))' = \Phi_2(x)$, $(\Phi_2(x))' = \Phi_3(x)$, $(\Phi_3(x))' = \Phi_4(x)$, $(\Phi_4(x))' = -\Phi_1(x)$, $\Phi_i(0) = 0$, $i = 1, 2, 3$, $\Phi_4(0) = 1$ образуют обобщенную тригонометрическую систему порядка 4 типа 2 (*o.m.c.*[4;2]).

Функции *o.m.c.*[4;1] и *o.m.c.*[4;2] указанными дифференциальными и начальными условиями определяются однозначно. Так как они являются решениями дифференциальных уравнений $y^{IV}(x) = \pm y(x)$ соответственно, то несложно написать явный вид этих функций. Первыми являются функции

$$K_1(x) = \frac{shx - \sin x}{2},$$

$$\Phi_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(ch\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \sin\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) - sh\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \cos\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \right),$$

остальные являются их производными. В то же время мы будем пользоваться свойствами ОТС, не связанными с их конкретным видом.

Тригонометрия функций ОТС порядка 4. В этом разделе для функций ОТС четвертого порядка построим теорию, обобщающую школьную тригонометрию.

Несложно проверить, что функции *o.m.c.*[4;1] и *o.m.c.*[4;2] образуют фундаментальные решения указанных дифференциальных уравнений $y^{IV}(x) = y(x)$ и $y^{IV}(x) = -y(x)$. Поэтому функция $K_1(x+y)$ представляется в виде

$$K_1(x+y) = C_1(y)K_1(x) + C_2(y)K_2(x) + C_3(y)K_3(x) + C_4(y)K_4(x).$$

Отсюда, используя начальные условия функций ОТС, получим

$$K_1(x+y) = K_1(x)K_4(y) + K_2(x)K_3(y) + K_3(x)K_2(y) + K_4(x)K_1(y). \quad (1)$$

Аналогично выводится формула

$$\Phi_1(x+y) = \Phi_1(x)\Phi_4(y) + \Phi_2(x)\Phi_3(y) + \Phi_3(x)\Phi_2(y) + \Phi_4(x)\Phi_1(y) \quad (2)$$

и после дифференцирования формул (1), (2) по одной из переменных получим остальные формулы сложения.

Для вывода формул разности аргументов надо исследовать функции ОТС на четность и нечетность. Заметим, что в силу фундаментальности *o.m.c.*[4;1] и *o.m.c.*[4;2] и четности их порядка функция $K_1(-x)$ представляется в виде

$$K_1(-x) = C_1K_1(x) + C_2K_2(x) + C_3K_3(x) + C_4K_4(x),$$

откуда с помощью начальных условий функций ОТС получим

$$K_1(-x) = -K_1(x), K_2(-x) = K_2(x), K_3(-x) = -K_3(x), K_4(-x) = K_4(x). \quad (3)$$

Аналогично проверяется, что и для *o.m.c.*[4;2] справедливы формулы

$$\Phi_1(-x) = -\Phi_1(x), \Phi_2(-x) = \Phi_2(x), \Phi_3(-x) = -\Phi_3(x), \Phi_4(-x) = \Phi_4(x). \quad (4)$$

Правило, что функции ОТС обоих типов с четными номерами являются четными функциями, а функции с нечетными номерами являются нечетными функциями, остается справедливым для всех ОТС четных порядков. Теперь мы можем написать формулы разности аргументов, например,

$$K_1(x-y) = K_1(x)K_4(y) - K_2(x)K_3(y) + K_3(x)K_2(y) - K_4(x)K_1(y),$$

$$\Phi_1(x-y) = \Phi_1(x)\Phi_4(y) - \Phi_2(x)\Phi_3(y) + \Phi_3(x)\Phi_2(y) - \Phi_4(x)\Phi_1(y),$$

Квадратичные формы функций ОТС порядка 4 первого типа. Далее разовьем теорию квадратичных форм ОТС и соответствующих матриц.

Рассмотрим квадратичную форму

$$\begin{aligned} A(x) = & a_{11}K_1^2(x) + a_{22}K_2^2(x) + a_{33}K_3^2(x) + a_{44}K_4^2(x) + \\ & + 2a_{12}K_1(x)K_2(x) + 2a_{13}K_1(x)K_3(x) + 2a_{14}K_1(x)K_4(x) + \\ & + 2a_{23}K_2(x)K_3(x) + 2a_{24}K_2(x)K_4(x) + 2a_{34}K_3(x)K_4(x), \end{aligned} \quad (5)$$

порожденную функциями *o.m.c.*[4;1]. Выясним, при каких обстоятельствах квадратичная форма (8) является константой. В этом случае мы получим аналог основного гиперболического тождества $ch^2x - sh^2x = 1$. Исследование формы (5) позволит ответить и на ряд других вопросов.

Матрица

$$A_0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & a_{34} \\ a_{14} & a_{24} & a_{34} & a_{44} \end{pmatrix} \quad (6)$$

соответствует квадратичной форме $A(x)$, а матрица

$$A_1 = \begin{pmatrix} 2a_{14} & a_{11} + a_{24} & a_{12} + a_{34} & a_{13} + a_{44} \\ a_{11} + a_{24} & 2a_{12} & a_{13} + a_{22} & a_{14} + a_{23} \\ a_{12} + a_{34} & a_{13} + a_{22} & 2a_{23} & a_{24} + a_{33} \\ a_{13} + a_{44} & a_{14} + a_{23} & a_{24} + a_{33} & 2a_{34} \end{pmatrix} \quad (7)$$

соответствует, как несложно проверить, ее производной $A'(x)$.

Выясним, при каких обстоятельствах нулевой матрице (7) соответствует ненулевая матрица (6). Из равенства 0 элементов на главной диагонали (7) следует равенство 0 элементов (6), расположенных на первой и третьей диагоналях выше и ниже главной. Каждый из остальных элементов может быть отличен от 0. Если $a_{11} = 1$, то из (7) $a_{11} + a_{24} = 0$, $a_{24} + a_{33} = 0$ и поэтому $a_{24} = -1$, $a_{33} = 1$. Отсюда

константе равна квадратичная функция $K_1^2(x) + K_3^2(x) - 2K_2(x)K_4(x)$. Аналогично при $a_{22} = 1$ мы найдем равную константе квадратичную функцию $K_2^2(x) + K_4^2(x) - 2K_1(x)K_3(x)$. С учетом начальных условий мы приходим к тождествам (первым интегралам)

$$\begin{aligned} K_1^2(x) + K_3^2(x) &= 2K_2(x)K_4(x), \\ K_2^2(x) + K_4^2(x) &= 1 + 2K_1(x)K_3(x). \end{aligned} \quad (8)$$

В справедливости формул (8) также легко убедиться их непосредственным дифференцированием. Анализируя формулы (6)-(7) можно найти первообразные для квадратов функций *о.м.с.*[4;1]. Справедливы формулы (вторым интегралам):

$$\int K_1^2(x)dx = \frac{3}{4}K_1(x)K_4(x) - \frac{1}{4}K_2(x)K_3(x) + C, \quad (9)$$

$$\int K_2^2(x)dx = \frac{3}{4}K_1(x)K_2(x) - \frac{1}{4}K_3(x)K_4(x) + \frac{x}{4} + C, \quad (10)$$

$$\int K_3^2(x)dx = \frac{3}{4}K_2(x)K_3(x) - \frac{1}{4}K_1(x)K_4(x) + C, \quad (11)$$

$$\int K_4^2(x)dx = \frac{3}{4}K_3(x)K_4(x) - \frac{1}{4}K_1(x)K_2(x) + \frac{x}{4} + C. \quad (12)$$

При взятии производных от левой и правой частей формул (9)-(12) мы приходим к первым интегралам (8).

Для того, чтобы найти матрицы A_2 , A_3 , A_4 квадратичных форм, соответствующих последующим производным квадратичной формы $A(x)$, можно, например, применить преобразование матрицы (6) в матрицу (7), к самой матрице (7) и к созданным при этом матрицам. Поэтому матрицы

$$\begin{aligned} A_2 &= \begin{pmatrix} 2(a_{13} + a_{44}) & 3a_{14} + a_{23} & a_{11} + 2a_{24} + a_{33} & a_{12} + 3a_{34} \\ 3a_{14} + a_{23} & 2(a_{11} + a_{24}) & 3a_{12} + a_{34} & a_{22} + 2a_{13} + a_{44} \\ a_{11} + 2a_{24} + a_{33} & 3a_{12} + a_{34} & 2(a_{13} + a_{22}) & a_{14} + 3a_{23} \\ a_{12} + 3a_{34} & a_{22} + 2a_{13} + a_{44} & a_{14} + 3a_{23} & 2(a_{24} + a_{33}) \end{pmatrix}, \\ A_3 &= \begin{pmatrix} 2(a_{12} + 3a_{34}) & a_{22} + 4a_{13} + 3a_{44} & 4(a_{14} + a_{23}) & a_{11} + 4a_{24} + 3a_{33} \\ a_{22} + 4a_{13} + 3a_{44} & 2(3a_{14} + a_{23}) & 3a_{11} + 4a_{24} + a_{33} & 4(a_{12} + a_{34}) \\ 4(a_{14} + a_{23}) & 3a_{11} + 4a_{24} + a_{33} & 2(3a_{12} + a_{34}) & 3a_{22} + 4a_{13} + a_{44} \\ a_{11} + 4a_{24} + 3a_{33} & 4(a_{12} + a_{34}) & 3a_{22} + 4a_{13} + a_{44} & 2(a_{14} + 3a_{23}) \end{pmatrix}, \\ A_4 &= \begin{pmatrix} 2a_{11} + 8a_{24} + 6a_{33} & 6a_{12} + 10a_{34} & 4a_{22} + 8a_{13} + 4a_{44} & 6a_{14} + 10a_{23} \\ 6a_{12} + 10a_{34} & 2a_{22} + 8a_{13} + 6a_{44} & 6a_{23} + 10a_{14} & 4a_{11} + 8a_{24} + 4a_{33} \\ 4a_{22} + 8a_{13} + 4a_{44} & 6a_{23} + 10a_{14} & 2a_{33} + 8a_{24} + 6a_{11} & 6a_{34} + 10a_{12} \\ 6a_{14} + 10a_{23} & 4a_{11} + 8a_{24} + 4a_{33} & 6a_{34} + 10a_{12} & 2a_{44} + 8a_{13} + 6a_{22} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

являются матрицами последующих производных квадратичной формы (5), т.е. квадратичных форм $A''(x)$, $A'''(x)$, $A^{IV}(x)$.

Для нас важно выяснить, может ли квадратичная форма системы ОТС поменять свой тип, т.е. стать функцией ОТС другого типа? Для ответа на этот вопрос напишем условия пропорциональности матриц A_4 и A_0 :

$$\begin{aligned} \frac{2a_{11} + 8a_{24} + 6a_{33}}{a_{11}} &= \frac{6a_{12} + 10a_{34}}{a_{12}} = \frac{4a_{22} + 8a_{13} + 4a_{44}}{a_{13}} = \frac{6a_{14} + 10a_{23}}{a_{14}} = \\ &= \frac{2a_{22} + 8a_{13} + 6a_{44}}{a_{22}} = \frac{6a_{23} + 10a_{14}}{a_{23}} = \frac{4a_{11} + 8a_{24} + 4a_{33}}{a_{24}} = \frac{2a_{33} + 8a_{24} + 6a_{11}}{a_{33}} = \\ &= \frac{6a_{34} + 10a_{12}}{a_{34}} = \frac{2a_{44} + 8a_{13} + 6a_{22}}{a_{44}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Заметим, что система (16) распадается на 3 подсистемы:

$$\frac{2a_{11} + 8a_{24} + 6a_{33}}{a_{11}} = \frac{4a_{11} + 8a_{24} + 4a_{33}}{a_{24}} = \frac{2a_{33} + 8a_{24} + 6a_{11}}{a_{33}}, \quad (14)$$

$$\frac{6a_{12} + 10a_{34}}{a_{12}} = \frac{6a_{34} + 10a_{12}}{a_{34}}, \quad (15)$$

$$\frac{4a_{22} + 8a_{13} + 4a_{44}}{a_{13}} = \frac{2a_{22} + 8a_{13} + 6a_{44}}{a_{22}} = \frac{2a_{44} + 8a_{13} + 6a_{22}}{a_{44}}, \quad (16)$$

каждая из которых решается независимо от других. При этом мы приходим к следующим тождествам для функций ОТС:

$$\begin{aligned} K_1(x) &= 2 \left(K_1 \left(\frac{x}{2} \right) K_4 \left(\frac{x}{2} \right) + K_2 \left(\frac{x}{2} \right) K_3 \left(\frac{x}{2} \right) \right), \\ K_2(x) &= K_1^2 \left(\frac{x}{2} \right) + K_3^2 \left(\frac{x}{2} \right) + 2K_2 \left(\frac{x}{2} \right) K_4 \left(\frac{x}{2} \right), \\ K_3(x) &= 2 \left(K_1 \left(\frac{x}{2} \right) K_2 \left(\frac{x}{2} \right) + K_3 \left(\frac{x}{2} \right) K_4 \left(\frac{x}{2} \right) \right), \\ K_4(x) &= K_2^2 \left(\frac{x}{2} \right) + K_4^2 \left(\frac{x}{2} \right) + 2K_1 \left(\frac{x}{2} \right) K_3 \left(\frac{x}{2} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1(x) &= \sqrt{2} \left(K_2 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) K_3 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) - K_1 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) K_4 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \right), \\ \Phi_2(x) &= K_3^2 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) - K_1^2 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right), \\ \Phi_3(x) &= \sqrt{2} \left(K_3 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) K_4 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) - K_1 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) K_2 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \right), \\ \Phi_4(x) &= K_4^2 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) - K_2^2 \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Квадратичные формы функций ОТС порядка 4 второго типа. Для функций *о.т.с.*[4;2] также рассмотрим квадратичную форму

$$\begin{aligned}
 B(x) = & b_{11}\Phi_1^2(x) + b_{22}\Phi_2^2(x) + b_{33}\Phi_3^2(x) + b_{44}\Phi_4^2(x) + \\
 & + 2b_{12}\Phi_1(x)\Phi_2(x) + 2b_{13}\Phi_1(x)\Phi_3(x) + 2b_{14}\Phi_1(x)\Phi_4(x) + \\
 & + 2b_{23}\Phi_2(x)\Phi_3(x) + 2b_{24}\Phi_2(x)\Phi_4(x) + 2b_{34}\Phi_3(x)\Phi_4(x)
 \end{aligned} \tag{20}$$

и соответствующую матрицу

$$B_0 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{12} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} & b_{34} \\ b_{14} & b_{24} & b_{34} & b_{44} \end{pmatrix}.$$

Производной квадратичной формы (20) соответствует матрица

$$B_1 = \begin{pmatrix} -2b_{14} & b_{11}-b_{24} & b_{12}-b_{34} & b_{13}-b_{44} \\ b_{11}-b_{24} & 2b_{12} & b_{13}+b_{22} & b_{14}+b_{23} \\ b_{12}-b_{34} & b_{13}+b_{22} & 2b_{23} & b_{24}+b_{33} \\ b_{13}-b_{44} & b_{14}+b_{23} & b_{24}+b_{33} & 2b_{34} \end{pmatrix}.$$

Проведя аналогичные исследования, получим первые

$$\Phi_3^2(x) - \Phi_1^2(x) = 2\Phi_2(x)\Phi_4(x),$$

$$\Phi_4^2(x) - \Phi_2^2(x) = 1 - 2\Phi_1(x)\Phi_3(x)$$

и вторые

$$\int \Phi_1^2(x) dx = -\frac{3}{4}\Phi_1(x)\Phi_4(x) + \frac{1}{4}\Phi_2(x)\Phi_3(x) + C,$$

$$\int \Phi_2^2(x) dx = \frac{3}{4}\Phi_1(x)\Phi_2(x) + \frac{1}{4}\Phi_3(x)\Phi_4(x) - \frac{x}{4} + C,$$

$$\int \Phi_3^2(x) dx = \frac{3}{4}\Phi_1(x)\Phi_2(x) + \frac{1}{4}\Phi_3(x)\Phi_4(x) - \frac{x}{4} + C,$$

$$\int \Phi_4^2(x) dx = \frac{3}{4}\Phi_3(x)\Phi_4(x) + \frac{1}{4}\Phi_1(x)\Phi_2(x) + \frac{x}{4} + C$$

интегралы *о.м.с.*[4;2], которые также могут быть проверены непосредственным их дифференцированием.

Исследование производных квадратичных форм функций *о.м.с.*[4;2] приводит нас к тождествам:

$$K_1(x) = \sqrt{2} \left(\Phi_2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\Phi_3\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) - \Phi_1\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\Phi_4\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \right),$$

$$K_2(x) = \Phi_3^2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) + \Phi_1^2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right),$$

$$K_3(x) = \sqrt{2} \left(\Phi_3\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\Phi_4\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) + \Phi_1\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\Phi_2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \right),$$

$$K_4(x) = \Phi_4^2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) + \Phi_2^2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right),$$

$$\begin{aligned}\Phi_1(x) &= 2\left(\Phi_2\left(\frac{x}{2}\right)\Phi_3\left(\frac{x}{2}\right) + \Phi_1\left(\frac{x}{2}\right)\Phi_4\left(\frac{x}{2}\right)\right), \\ \Phi_2(x) &= \Phi_3^2\left(\frac{x}{2}\right) - \Phi_1^2\left(\frac{x}{2}\right) + 2\Phi_2\left(\frac{x}{2}\right)\Phi_4\left(\frac{x}{2}\right), \\ \Phi_3(x) &= 2\left(\Phi_3\left(\frac{x}{2}\right)\Phi_4\left(\frac{x}{2}\right) - \Phi_1\left(\frac{x}{2}\right)\Phi_2\left(\frac{x}{2}\right)\right), \\ \Phi_4(x) &= \Phi_4^2\left(\frac{x}{2}\right) - \Phi_2^2\left(\frac{x}{2}\right) - 2\Phi_1\left(\frac{x}{2}\right)\Phi_3\left(\frac{x}{2}\right).\end{aligned}$$

Постановка задач на собственные значения. Важную роль в прикладных исследованиях играет решение задач на собственные значения. При этом в технических системах могут встречаться не только стандартные условия на внешней границе области. Существенную роль могут играть дополнительные условия во внутренних точках области. При этом условий на этой внутренней границе может быть недостаточно для того, чтобы разбить область решения задачи на несколько частей. Нашей целью является такая постановка задачи с внутренними граничными условиями, при которой соответствующий оператор сохранит свою положительную определенность и самосопряженность. И при этом использование функций ОТС позволяет в ряде случаев получить решение спектральной задачи в явном виде.

В области D на оси абсцисс с внешней границей Γ и внутренней границей γ рассматривается задача на собственные значения

$$X^{IV}(x) = \lambda X(x) \quad (21)$$

с дополнительными условиями на внешней и внутренней границах

$$X''(x)|_{x \in \Gamma} = X'''(x)|_{x \in \Gamma} = 0, \quad (22)$$

$$X(x)|_{x \in \gamma} = 0. \quad (23)$$

При $D = D_l = (-l; l)$ задача (21)-(22) без внутренних граничных условий является известной. При наличии граничных условий на внутренней границе решение задачи (1)-(3) определим следующим образом.

Определение 1. Функция $X(x)$, удовлетворяющая во внутренних точках области D дифференциальному уравнению (21), в точках внешней границы Γ условию (22), в точках внутренней границы γ условию (23) и условиям непрерывности производных $\frac{dX(x)}{dx}$, $\frac{d^2X(x)}{dx^2}$ в области $D \cup \gamma$ (условиям согласования) называется решением задачи (21)-(23).

Нами будут рассмотрены следующие задачи на собственные значения:

♦ Задача (21)-(23) в области $D_{l,0} = (-l; 0) \cup (0; l)$ с внешней границей $\Gamma = \pm l$ и внутренней границей $\gamma = 0$ – задача А.

♦ Задача (21)-(23) в области $D_{l,0,h} = (-l+h; 0) \cup (0; l+h)$ с внешней границей $\Gamma = \pm l + h$, $0 < h < l$ и внутренней границей $\gamma = 0$ – задача Б.

Спектральные свойства задач А и Б мы будем сравнивать с задачей (21)-(23) в области $D = D_l = (-l; l)$ – базовой задачей.

Решение базовой задачи. В области $(-l;l)$ на оси абсцисс с внешней границей $\Gamma = \pm l$ рассматривается задача на собственные значения (21) с дополнительными условиями на внешней границе (22). Несложно проверить, что и в данном случае оператор $L = \frac{d^4}{dx^4}$ с этими граничными условиями является положительно

определенным и самосопряженным. Следовательно, для базовой задачи существует полная ортонормированная система собственных функций (п.о.н.с.).

Общее решение уравнения (21) запишем в виде линейной комбинации фундаментальной системы решений

$$X(x) = C_1 K_1(\sqrt[4]{\lambda}x) + C_2 K_2(\sqrt[4]{\lambda}x) + C_3 K_3(\sqrt[4]{\lambda}x) + C_4 K_4(\sqrt[4]{\lambda}x).$$

Если эта функция удовлетворяет граничным условиям (22), то мы приходим к СЛАУ для определения постоянных

$$\begin{cases} -C_1 K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) - C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_4 K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_1 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) - C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) - C_4 K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_1 K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_4 K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_1 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_4 K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Система (24) распадается на две подсистемы

$$\begin{cases} C_1 K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_1 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

и

$$\begin{cases} C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_4 K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_4 K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0. \end{cases} \quad (26)$$

При этом набор собственных значений базовой задачи состоит из значений $\{\lambda_{1n}\}$, $n \in N$, порождаемых системой (25) и соответствующих нечетным собственным функциям базовой задачи, а также значений $\{\lambda_{2n}\}$, $n \in N$, порождаемых системой (26) и соответствующих четным собственным функциям этой задачи

Первая группа собственных значений $\{\lambda_{1n}\}$ удовлетворяет уравнению $K_1(\sqrt[4]{\lambda}l)K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) = K_2(\sqrt[4]{\lambda}l)K_3(\sqrt[4]{\lambda}l)$ или, с учетом вида функций *o.m.c.*[4;1], уравнению $th\sqrt[4]{\lambda}l = tg\sqrt[4]{\lambda}l$, корни которого $\{\lambda_{1n}\}$ обладают свойством

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\lambda_{1n} - \left(\frac{\pi}{4l} + \frac{\pi n}{l} \right)^4 \right) = 0.$$

Вторая группа собственных значений $\{\lambda_{2n}\}$ порождается системой (26) и удовлетворяет уравнению $K_1(\sqrt[4]{\lambda}l)K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) = K_3(\sqrt[4]{\lambda}l)K_4(\sqrt[4]{\lambda}l)$ или уравнению $th\sqrt[4]{\lambda}l = -tg\sqrt[4]{\lambda}l$, корни которого $\{\lambda_{2n}\}$ обладают свойством

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\lambda_{2n} - \left(-\frac{\pi}{4l} + \frac{\pi n}{l} \right)^4 \right) = 0.$$

Собственным значениям $\{\lambda_{1n}\}$ соответствуют собственные функции базовой задачи $K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}x}) - K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}x})$, которые после нормирования приводятся к виду

$$\frac{1}{\sqrt{l}} \left(\frac{K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})}{\sqrt{K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})}} K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}x}) - \frac{K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})}{\sqrt{K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})}} K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}x}) \right).$$

Собственным значениям $\{\lambda_{2n}\}$ соответствуют собственные функции базовой задачи $K_2(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_2(\sqrt[4]{\lambda_{2n}x}) - K_4(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_4(\sqrt[4]{\lambda_{2n}x})$ и после нормирования

$$\frac{K_2(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_2(\sqrt[4]{\lambda_{2n}x}) - K_4(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_4(\sqrt[4]{\lambda_{2n}x})}{\sqrt{l(0,5 + K_1(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_3(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l}))}}.$$

Решение задачи А. В области $D_{l,0} = (-l;0) \cup (0;l)$ на оси абсцисс с внешней границей $\Gamma = \pm l$ и внутренней границей $\gamma = 0$ рассматривается задача на собственные значения (21) с дополнительными условиями на внешней границе (22) и на внутренней границе (23). Несложно проверить, что и в данном случае оператор $L = \frac{d^4}{dx^4}$ с этими граничными условиями является положительно определенным и

самосопряженным. Следовательно, для задачи А существует полная ортонормированная система собственных функций (п.о.н.с.), которую мы построим в явном виде.

Общее решение уравнения (21) в рамках задачи А представляется в виде

$$X(x) = \begin{cases} C_1^- K_1(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_2 K_2(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_3 K_3(\sqrt[4]{\lambda x}), & -l \leq x < 0, \\ C_1^+ K_1(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_2 K_2(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_3 K_3(\sqrt[4]{\lambda x}), & 0 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (27)$$

В самом деле, слагаемое, содержащее $K_4(\sqrt[4]{\lambda x})$ из общего решения (21) должно отсутствовать в силу равенства 0 решения задачи (21)-(23) при $x = 0$. Кроме того, в силу определения 1 коэффициенты при $K_3(\sqrt[4]{\lambda x})$ и $K_2(\sqrt[4]{\lambda x})$ должны совпадать в силу непрерывности при $x = 0$ первых и вторых производных.

Следовательно, нам остается потребовать выполнения условий (22) для функции (43). Это приводит к нахождению ненулевых решений C_1^-, C_1^+, C_2, C_3 системы

$$\begin{cases} -C_1^- K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) - C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_1^- K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) - C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_1^+ K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_1^+ K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0. \end{cases} \quad (28)$$

С одной стороны, можно непосредственно вычислить определитель этой системы, приравнять к 0 и получить уравнение

$$\left(K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) - K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) \right) \left(K_4^2(\sqrt[4]{\lambda}x) - K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) \right) = 0, \quad (29)$$

а с другой стороны, применяя метод Гаусса, можно записать СЛАУ (28) в виде

$$\begin{cases} -C_1^- K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) - C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_2 \left(K_4^2(\sqrt[4]{\lambda}x) - K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) \right) = 0, \\ C_1^+ K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) + C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0, \\ C_3 \left(K_2(\sqrt[4]{\lambda}l) K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) - K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) K_4(\sqrt[4]{\lambda}l) \right) = 0. \end{cases} \quad (30)$$

Пусть в уравнении (29) первый множитель равен 0. Соответствующие собственные значения $\{\lambda_{1n}\}$, $n \in N$ совпадают с серией собственных значений базовой задачи, соответствующих нечетным собственным функциям. В этом случае последнее уравнение в (30) выполнено всегда, например, при $C_3 = 1$. Множители в (29) одновременно в 0 обратиться не могут, поэтому из второго уравнения (30) получим $C_2 = 0$. Теперь из первого и третьего уравнений этой СЛАУ получим

$$C_1^+ = C_1^- = -\frac{K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l)}{K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l)}$$

и соответствующие собственные функции пропорциональны нечетным функциям

$$X_{1n}(x) = \begin{cases} K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l) K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}x) - K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l) K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}x), & -l \leq x < 0, \\ K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l) K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}x) - K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l) K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}x), & 0 \leq x \leq l. \end{cases}$$

Нечетные собственные функции базовой задачи и задачи А совпадают, поэтому нормированные функции совпадают и записываются в виде

$$\bar{X}_{1n}(x) = \frac{1}{\sqrt{l}} \left(\sqrt{\frac{K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l)}{K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l)}} K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}x) - \sqrt{\frac{K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l)}{K_1(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}l)}} K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}}x) \right), \quad (31)$$

при этом $\int_{-l}^l \bar{X}_{1n}^2 dx = 1$.

Пусть теперь в уравнении (29) второй множитель равен 0. Соответствующие собственные значения $\{\lambda_{2n}\}$, $n \in N$ совпадают с корнями уравнения $K_4^2(\sqrt[4]{\lambda}x) - K_1(\sqrt[4]{\lambda}l) K_3(\sqrt[4]{\lambda}l) = 0$ или $ch(\sqrt[4]{\lambda}x) \cos(\sqrt[4]{\lambda}l) = -1$. В системе (46) в этом случае $C_3 = 0$ и можно взять $C_2 = 1$. Тогда

$$C_1^- = \frac{K_4(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})}{K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})}, \quad C_1^+ = -\frac{K_4(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})}{K_3(\sqrt[4]{\lambda_{1n}l})}$$

и соответствующие собственные функции пропорциональны четным, как несложно проверить, функциям

$$X_{2n}(x) = \begin{cases} K_3(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_1(\sqrt[4]{\lambda_{2n}x}) + K_4(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_2(\sqrt[4]{\lambda_{2n}x}), & -l \leq x < 0, \\ -K_3(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_1(\sqrt[4]{\lambda_{2n}x}) + K_4(\sqrt[4]{\lambda_{2n}l})K_3(\sqrt[4]{\lambda_{2n}x}), & 0 \leq x \leq l \end{cases}$$

и они также могут быть нормированы.

Решение задачи Б. В области $D_{l,0,h} = (-l+h; 0) \cup (0; l+h)$ на оси абсцисс с внешней границей $\Gamma = \pm l + h$ и внутренней границей $\gamma = 0$ рассматривается задача на собственные значения (21) с дополнительными условиями на внешней границе (22) и на внутренней границе (23). В этом случае, также, как и в предыдущих, несложно проверить путем непосредственного интегрирования по частям положительную определенность и самосопряженность соответствующего оператора.

В данном случае поставленной задачи, удовлетворяющее внутреннему граничному условию (3) и уравнению (1) во внутренних точках $D_{l,0,h}$, можно представить в виде

$$X(x) = \begin{cases} C_1^- K_1(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_2 K_2(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_3 K_3(\sqrt[4]{\lambda x}), & -l+h \leq x < 0, \\ C_1^+ K_1(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_2 K_2(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_3 K_3(\sqrt[4]{\lambda x}), & 0 \leq x \leq l+h. \end{cases}$$

Выполнение условий (22) приводит к системе

$$\begin{cases} -C_1^- K_3(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) - C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) = 0, \\ C_1^- K_4(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) - C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) + C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) = 0, \\ C_3^+ K_3(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) + C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) = 0, \\ C_4^+ K_4(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) + C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) + C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) = 0. \end{cases}$$

Условие равенства нулю ее определителя преобразуется к уравнению

$$\begin{aligned} & \left(K_1(\sqrt[4]{\lambda(l-h)})K_4(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) - K_2(\sqrt[4]{\lambda(l-h)})K_3(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) \right) \times \\ & \times \left(K_4^2(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) - K_1(\sqrt[4]{\lambda(l+h)})K_3(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) \right) + \\ & + \left(K_1(\sqrt[4]{\lambda(l+h)})K_4(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) - K_2(\sqrt[4]{\lambda(l+h)})K_3(\sqrt[4]{\lambda(l+h)}) \right) \times \\ & \times \left(K_4^2(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) - K_1(\sqrt[4]{\lambda(l-h)})K_3(\sqrt[4]{\lambda(l-h)}) \right) = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

Корни $\{\lambda_n\}$, $n \in N$ уравнения (32) при $h = 0$ совпадают с корнями уравнения (29). С помощью формул (18) запишем уравнение (32) в виде

$$\begin{aligned} & \left(\Phi_4(\sqrt{2} \cdot \sqrt[4]{\lambda(l+h)}) - 1 \right) \cdot \Phi_3(\sqrt{2} \cdot \sqrt[4]{\lambda(l-h)}) + \\ & + \left(\Phi_4(\sqrt{2} \cdot \sqrt[4]{\lambda(l-h)}) - 1 \right) \cdot \Phi_3(\sqrt{2} \cdot \sqrt[4]{\lambda(l+h)}) = 0. \end{aligned} \quad (33)$$

Заключение. В работе исследованы свойства квадратичных форм функций ОТС. Введено понятие задачи с дополнительными условиями на внутренней границе. Показана возможность постановки задач с такими условиями, при которых изучаемый оператор является положительным и самосопряженным. Это позволяет напрямую исследовать спектральные свойства соответствующих операторов. В ряде случаев, опираясь на полученные свойства квадратичных форм ОТС, приведены примеры решения таких задач в явном виде и получены полные ортонормированные системы собственных функций таких операторов. Разработанные методы могут быть полезны для решения более сложных прикладных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крылов А.Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании. – Л.: Изд. АН СССР, 1931.
2. Пузыревский Н.П. Расчеты фундаментов. – Петроград: Изд. И.И.П.С., 1923.
3. Филиппов А.П. Методы расчета сооружений на колебания. – М., Л.: Стройиздат Наркомстром, 1940.
4. Виноградов Ю.И. Функции Коши-Крылова в расчетах на прочность пластин и оболочек // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 8. – С. 15-19.
5. Виноградов Ю.И. Мультипликативный метод решения краевых задач теории оболочек // Прикладная математика и механика. РАН. – 2013. – Т. 77. – Вып. 4. – С. 620-628.
6. Виноградов Ю.И. Функции Коши-Крылова в расчетах на прочность пластин и оболочек // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 8. – С. 15-19.
7. Ефимов А.В., Клово А.Г. Метод промежуточных задач для исследования вопросов разрушения пластины, движущейся под действием внешней, вынуждающей силы // Пятое советско-чехословацкое совещание по применению методов теории функций и функционального анализа к задачам математической физики. (Материалы совещания). – Новосибирск, 1979. – С. 42-44.
8. Клово А.Г. Некоторые вопросы колебаний кварцевых резонаторов с одним держателем. Физические основы микроэлектроники // Сб. трудов МИЭТа. – М., 1979. – С.58-65.
9. Aronszajn N., Weinstein A. On the unified theory of eigenvalues of plates and membrans // Amer. J. Math., 64 (1942), 623.
10. Вайнштейн А. Промежуточные задачи и максимально-минимальная теория собственных значений. // Сб. Математика. – 1964. – 8:5. – С. 91-101.
11. Weinstein A. and Stenger W. Intermediate Problems for Eigenvalues. – New York and London, 1972.
12. Weinstein A. On intermediate eigenvalues problems maximum-minimum theory and Kolmogorov-Ravlovitz n-widths // В сб. Комплексный анализ и его приложения. – М.: Наука, 1978. – С. 92-101.
13. Гулд С. Вариационные методы в задачах на собственные значения. – М.: Мир, 1970.
14. Клово А.Г. Задачи на собственные значения для одного линейного параметризованного оператора. Деп. ВИНТИ № 5428-80, 24 дек. 1980. – 34 с.
15. Клово А.Г. Некоторые свойства обобщенных тригонометрических систем // «Донецкие чтения 2018: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности»: Матер. III Международной научной конференции. ДНР. Донецк. Т. 1 Физико-математические и технические науки. – 2018. – С. 349-350.
16. Клово А.Г., Кузнецов А.Е., Кузнецов Р.Е., Чистякова Т.А. Построение и свойства обобщенных тригонометрических систем нечетного порядка // Матер. X международной научно-технической конференции в рамках V международного научного форума Донецкой народной республики. – Донецк: ДОННТУ, 2019. – С. 25-29.
17. Клово А.Г., Куловых Г.В., Чистякова Т.А. Обобщенные тригонометрические системы и некоторые приложения // Матер. VI международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях» (СИТОНИ-2019). ДНР. – Донецк, 2019. – С. 53-63.
18. Клово А.Г., Куловых Г.В., Чистякова Т.А. Об одном подходе к тригонометрии // Матер. IV-й Всероссийской научно-методической конференции с международным участием «Информационные и инновационные технологии в науке и образовании» (ИиИТО-2019). – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 467-473.

19. Клово А.Г., Куповых Г.В., Чистякова Т.А. Некоторые свойства и приложения обобщенных тригонометрических систем // Матер. Всероссийской научно-методической конференции «Актуальные проблемы преподавания математических и естественно-научных дисциплин в образовательных организациях высшего образования». – Кострома, 2020. – С. 72-82.
20. Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А., Чистякова Т.А., Кузнецов А.Е., Кузнецов Р.Е. Свойства ОТС произвольного порядка // Матер. V Международной научной конференции «Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности». Физико-математические и технические науки. Ч. 1. ДНР. – Донецк, 2020. – С. 155-157.

REFERENCES

1. Krylov A.N. O raschete balok, lezhashchikh na uprugom osnovanii [On the calculation of beams lying on an elastic base]. Leningrad: Izd. AN SSSR, 1931.
2. Puzyrevskiy N.P. Raschety fundamentov [Calculations of foundations]. Petrograd: Izd. I.I.P.S., 1923.
3. Filippov A.P. Metody rascheta sooruzheniy na kolebaniya [Methods of calculating structures for vibrations]. Moscow, Leningrad: Stroyizdat Narkomstrom, 1940.
4. Vinogradov Yu.I. Funktsii Koshi-Krylova v raschetakh na prochnost' plastin i obolochek [Cauchy-Krylov functions in calculations for the strength of plates and shells], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2013, No. 8, pp. 15-19.
5. Vinogradov Yu.I. Mul'tiplikativnyy metod resheniya kraevykh zadach teorii obolochek [Multiplicative method for solving boundary value problems of shell theory], *Prikladnaya matematika i mekhanika. RAN* [Applied Mathematics and Mechanics. RAS], 2013, Vol. 77, Issue 4, pp. 620-628.
6. Vinogradov Yu.I. Funktsii Koshi-Krylova v raschetakh na prochnost' plastin i obolochek [Cauchy-Krylov functions in calculations for the strength of plates and shells], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2013, No. 8, pp. 15-19.
7. Efimov A.V., Klovo A.G. Metod promezhutochnykh zadach dlya issledovaniya voprosov razrusheniya plastiny, dvizhushcheysya pod deystviem vneshney, vyzhdayushchey sily [The method of intermediate problems for the study of the issues of the destruction of a plate moving under the action of an external, compelling force], *Pyatoe sovetsko-chechoslovatskoe soveshchanie po primeneniyu metodov teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza k zadacham matematicheskoy fiziki. (Materialy soveshchaniya)* [The fifth Soviet-Czechoslovak meeting on the application of methods of the theory of functions and functional analysis to problems of mathematical physics. (Materials of the meeting)]. Novosibirsk, 1979. pp. 42-44.
8. Klovo A.G. Nekotorye voprosy kolebaniy kvartsevykh rezonatorov s odnim derzhatelem. Fizicheskie osnovy mikroelektroniki [Some issues of oscillation of quartz resonators with one holder. Physical foundations of microelectronics], *Sb. trudov MIETA* [Collection of works of MIET]. Moscow, 1979, pp. 58-65.
9. Aronszajn N., Weinstein A. On the unified theory of eigenvalues of plates and membrans, *Amer. J. Math.*, 64 (1942), 623.
10. Vaynshteyn A. Promezhutochnye zadachi i maksimal'no-minimal'naya teoriya sobstvennykh znacheniy [Intermediate tasks and the maximum-minimum theory of eigenvalues], *Sb. Matematika* [Collection of Mathematics], 1964, 8:5, pp. 91-101.
11. Weinstein A. and Stenger W. Intermediate Problems for Eigenvalues. New York and London, 1972.
12. Weinstein A. On intermediate eigenvalues problems maximum-minimum theory and Kolmogorov-Ravlovitz n-widths, *V sb. Kompleksnyy analiz i ego prilozheniya* [In the collection Complex analysis and its applications]. Moscow: Nauka, 1978, pp. 92-101.
13. Guld S. Variatsionnye metody v zadachakh na sobstvennye znacheniya [Variational methods in eigenvalue problems]. Moscow: Mir, 1970.
14. Klovo A.G. Zadachi na sobstvennye znacheniya dlya odnogo lineynogo parametrizovannogo operatora. Dep. VINITI № 5428-80, 24 dek. 1980 [Eigenvalue problems for one linear parametrized operator. Dep. VINITI No. 5428-80, 24 Dec. 1980], 34 p.
15. Klovo A.G. Nekotorye svoystva obobshchennykh trigonometricheskikh sistem [Some properties of generalized trigonometric systems], «Donetskie chteniya 2018: obrazovanie, nauka, innovatsii, kul'tura i vyzovy sovremennosti». Mater. III Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. DNR. Donetsk. T. 1 Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki [Donetsk

- Readings 2018: education, science, innovation, culture and challenges of our time": Materials of the III International Scientific Conference. DNR. Donetsk. Vol. 1 Physical, mathematical and technical sciences], 2018, pp. 349-350.
16. Klovo A.G., Kuznetsov A.E., Kuznetsov R.E., Chistyakova T.A. Postroenie i svoystva obobshchennykh trigonometricheskikh sistem nechetnogo poryadka [Construction and properties of generalized trigonometric systems of odd order], *Mater. X mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v ramkakh V mezhdunarodnogo nauchnogo foruma Donetskoy narodnoy respubliki* [Materials of the X International Scientific and Technical Conference within the framework of the V International Scientific Forum of the Donetsk People's Republic]. Donetsk: DONNTU, 2019, pp. 25-29.
 17. Klovo A.G., Kupovykh G.V., Chistyakova T.A. Obobshchennye trigonometricheskie sistemy i nekotorye prilozheniya [Generalized trigonometric systems and some applications], *Mater. VI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye informatsionnye tekhnologii v obrazovanii i nauchnykh issledovaniyakh» (SITONI-2019)*. DNR [Materials of the VI International Scientific and Technical Conference "Modern Information Technologies in Education and scientific research" (SITONI-2019). DNR]. Donetsk, 2019, pp. 53-63.
 18. Klovo A.G., Kupovykh G.V., Chistyakova T.A. Ob odnom podkhode k trigonometrii [About one approach to trigonometry], *Mater. IV-y Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Informatsionnye i innovatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii» (IiITO-2019)* [Materials of the ivth All-Russian Scientific and Methodological Conference with international participation "Information and Innovative technologies in Science and Education" (IITE-2019)]. Rostov-on-Don, 2020, pp. 467-473.
 19. Klovo A.G., Kupovykh G.V., Chistyakova T.A. Nekotorye svoystva i prilozheniya obobshchennykh trigonometricheskikh sistem [Some properties and applications of generalized trigonometric systems], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy prepodavaniya matematicheskikh i estestvenno-nauchnykh distsiplin v obrazovatel'nykh organizatsiyakh vysshego obrazovaniya»* [Materials of the All-Russian Scientific and methodological Conference "Actual problems of teaching mathematical and natural science disciplines in educational institutions of higher education"]. Kostroma, 2020, pp. 72-82.
 20. Klovo A.G., Kupovykh G.V., Lyapunova I.A., Chistyakova T.A., Kuznetsov A.E., Kuznetsov R.E. Svoystva OTS proizvol'nogo poryadka [Properties of the OTS of arbitrary order], *Mater. V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Donetskie chteniya 2020: obrazovanie, nauka, innovatsii, kul'tura i vyzovy sovremennosti»*. *Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Materials of the V International Scientific Conference "Donetsk Readings 2020: education, science, innovation, culture and Modern challenges". Physico-mathematical and technical sciences]. Part 1. Donetsk, 2020, pp. 155-157.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.Н. Каркищенко.

Клово Александр Георгиевич – Южный федеральный университет; e-mail: klovo_ag@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281221064; к.ф.-м.н.; доцент.

Куповых Геннадий Владимирович – e-mail: kupovykh@sfedu.ru; тел.: 89289543642; д.ф.-м.н.; профессор.

Илюхин Александр Алексеевич – e-mail: iliukhin@sfedu.ru; тел. 89381617442; д.ф.-м.н.; профессор.

Ляпунова Ирина Артуровна – e-mail: ialyapunova@sfedu.ru; тел.: 89034310026; к.ф.-м.н.; доцент.

Klovo Alexander Georgievich – Southern Federal University; e-mail: klovo_ag@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281221064; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Kupovykh Gennady Vladimirovich – e-mail: kupovykh@sfedu.ru; phone: +79289543642; dr. of phys. and math. sc.; professor.

Ilyukhin Alexander Alekseevich – e-mail: iliukhin@sfedu.ru; phone: +79381617442; dr. of phys. and math. sc.; professor.

Lyapunova Irina Arturovna – e-mail: ialyapunova@sfedu.ru; phone: +79034310026; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Раздел III. Системы поддержки принятия решений

УДК 004.832.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-88-104

А.А. Левченко, В.В. Таратухин, Ю.А. Кравченко

МЕТОД ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МОДЕЛЕЙ ТИПОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Статья посвящена решению задачи создания метода принятия решений при формировании типовых процессов предприятия для внедрения и использования информационных систем на базе облачных технологий, так же известных, как систем, работающих по модели SaaS (Software as a Service, Программное обеспечение как Услуга). Актуальность исследования обусловлена новизной технологии облачных вычислений и невозможностью применения методов, разработанных для систем класса on-Premise. Целью исследования является повышение эффективности использования типовых моделей предприятия при внедрении и использовании SaaS систем. Повышение эффективности обеспечивает сокращение сроков и бюджета проекта при внедрении SaaS-систем, а также эксплуатационных затрат после. Достижение цели исследования обеспечивается выполнением следующих задач: аналитический обзор области исследования на предмет имеющихся методов, формализация и постановки задачи исследования, описание элементов проектной документации, как единой системы и определение связей между структурными элементами, разработка метода принятия решений о формировании моделей типовых процессов, проверка метода через определение критерия эффективности и сравнения результатов работы метода с аналогами. Задача исследования формализована, как каноническая задача оптимизации с целевой функцией, направленной на максимизацию критерия эффективности. Критерий эффективности задан в виде формулы, описывающей степень покрытия типовыми моделями функциональных требований к целевым процессам предприятия. В статье описаны методы и алгоритмы, используемые для решения аналогичных задачи, а также приведены их недостатки и ограничения. Предложенный метод базируется на теории нечетких множеств и использует алгоритм нечеткого вывода Мамдани для связи множества функциональных требований и множества системных реализаций. На базе метода разработано программное приложение и проведен вычислительный эксперимент. Выборка для проверки метода и его сравнение с существующими аналогами формировалась на базе функциональных требований к организационным процессам управления закупками крупных предприятий и реализации данных требований в SaaS-системах на платформе SAP. Подтвержден рост значения критерия эффективности в случае применения предложенного метода, что демонстрирует его преимущество перед имеющимися альтернативными решениями после второй итерации использования. В качестве примера представлено описание типового процесса создания заявки на закупку до и после применения предложенного метода.

Информационная система; облачные технологии; SaaS; проектная документация; типовые модели процессов предприятия; нечеткие множества.

A.A. Levchenko, V.V. Taratukhin, Yu.A. Kravchenko

DECISION-MAKING METHOD FOR TYPICAL PROCESSES MODELS FORMATION FOR CLOUD-BASED ENTERPRISE SYSTEMS

The article is devoted to solving the problem of creating a decision-making method in the formation of typical enterprise processes in information systems based on cloud technologies, also known as systems operating on the SaaS model (Software as a Service). The study's relevance is due to the novelty of cloud computing technology and the impossibility of applying the methods developed for on-Premise class systems. The study aims to improve the efficiency of using typical enterprise models in the implementation and use of SaaS systems. Increased efficiency affects the time and budget of the SaaS implementation project and operational costs after implementation. Achievement of the research goal is achieved by performing the following tasks: an analytical review of the research area for available methods, formalization and canonical formulation of the research task, description of the elements of project documentation as a single system of elements, and determination of relationships between them, development of a method for making decisions on the formation of models of typical processes, as structural elements of the system, verification of the method by determining the criterion for the effectiveness of the method and its comparison with the data of previous approaches. The research task is formalized as a canonical optimization problem with an objective function to maximize the efficiency criterion. The criterion of efficiency is given in the form of a formula that describes the degree of coverage of functional requirements to the target processes of the enterprise by standard models. The article describes the methods and algorithms used to solve similar problems, as well as their disadvantages and limitations. The proposed method is based for the first time on the theory of fuzzy sets and uses the Mamdani fuzzy inference algorithm to link a set of functional requirements and a set of system implementations. On the basis of the method, a software application was developed, and a computational experiment was carried out. The sample for testing the method and its comparison with existing analogs was formed on the basis of functional requirements for organizational processes of procurement management of large enterprises and the implementation of these requirements in SaaS systems on the SAP platform. The growth of the value of the efficiency criterion was confirmed in the case of the application of the proposed method, which demonstrates its advantage over the available alternative solutions already at the second iteration of use. As an example, a description of a typical process for creating a purchase requisition before and after applying the proposed method is presented.

Information system; cloud technologies; SaaS; project documentation; typical models of enterprise processes; fuzzy sets.

Введение. Системы управления ресурсами предприятия (ERP системы, ERP systems, Enterprise Resource Planning Systems) построены на основе централизованной базы данных и используют единую вычислительную платформу, цель которой – консолидация операций предприятия в универсальную корпоративную системную среду [1]. По причине того, что внедрение данных систем является сложным процессом, затрагивающим функционирование фундаментальных процессов, особое внимание уделяется методологии. Классический подход к внедрению базовых ERP систем на платформе SAP основан на методологии SAP Activate, которая состоит из шести фаз: определение подхода к внедрению, подготовка проекта, проведение анализа, реализация требований, продуктивный старт и использование системы [2, 3]. Методология SAP Activate хоть и обеспечивает соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001, однако не учитывает детализацию связей результатов каждой фазы, а также не описывает, как результаты одного проекта могут быть применимы для последующих проектов. Новые решения на проектах учитываются в документации, созданной в ходе проекта, но не отражаются в типовых моделях процессов, которые будут использоваться в последующих проектах. Модели типовых процессов, используемые при внедрении систем управления ресурсами предприятия, включают в себя описания типовых функциональных требований, шагов процессов, настроек, объектов миграции, ролей и пол-

номочий. Особое значение модели имеют в случае применения облачных технологий, в частности в случае применения модели SaaS (Software as a Service, Программное обеспечение как Услуга), когда изменение заложенных в систему функциональных возможностей невозможно или требует больших трудозатрат [20]. SaaS-системы являются третьим поколением эволюционного развития классических систем и ограничения, заложенные в систему увеличивают роль типовых моделей процессов при внедрении и использовании систем [18, 19]. Ограничения облачных технологий позволило формализовать функциональные требования по причине ограниченного числа настроек параметров системы и микро сервисной модели для реализации разработок, что было невозможно в случае on-Premise систем. Это создает новые научные задачи оптимизации сроков внедрения SaaS-систем.

Была поставлена следующая цель исследования – создание метода принятия решений при формировании моделей типовых процессов предприятий, используемых при внедрении SaaS-систем. Для достижения цели исследования требуется – формализация задачи и поиск решения, позволяющего формировать и обновлять модели на основании результатов успешных внедрений цифровых систем в РФ. Решение должно включать расширенные модели типовых процессов с акцентом на российскую специфику бизнеса и учитывать особенности облачных технологий. Были определены следующие этапы системного анализа объекта исследования:

1. Аналитический обзор области исследования на предмет имеющихся методов формирования моделей типовых процессов.
2. Формализация и постановки задачи исследования, определение критерия эффективности метода для решения задачи.
3. Описание системы множеств проектной документации, как системы структурных элементов, и ее связи с типовыми моделями процессов. Система включает документацию, которая создается и используется в ходе внедрения систем управления ресурсами предприятия, а также модели типовых процессов, которые применяются при создании проектной документации.
4. Разработка метода принятия решений о формировании моделей типовых процессов.
5. Проверка метода через определение критерия эффективности метода и его сравнения с данными предыдущих подходов.

Статья организована в соответствии с этапами исследования. Последовательное выполнение этапов позволяет решить основную задачу – создание метода принятия решений при формировании типовых процессов предприятия в информационных системах на базе облачных технологий. И в результате достигнута цель – повышение эффективности применения типовых моделей предприятия при внедрении и использовании SaaS-систем.

1. Анализ результатов предшествующих работ. Анализ результатов предшествующих работ показал, что модели типовых процессов предприятия широко применяются на практике в ходе внедрения ERP систем. Использование типовых процессов позволяет оптимизировать всю цепочку создания стоимости, что увеличивает их ценность для предприятий [4]. Количественный пример расчёта выгод применения моделей типовых процессов для систем управления процессами предприятия приведен в работе [14]. Задача создания моделей типовых процессов не является новой и уже решалась для различных групп организационных процессов ряда индустрий. Например, модели были созданы для ряда процессов производства [13], для процесса разработки архитектуры предприятия [15], для процессов наукоемких предприятия [16], для процессов в индустрии гостиничных услуг [17]. Во всех случаях модели основываются на результатах одного или нескольких проектов внедрения систем управления ресурсами предприятия, полученных до мо-

мента написании работ. Из-за отсутствия формализованных метода формирования данных моделей и регулярных изменений требования рынка со временем модели будут неприменимы. Фокус данного исследования – это не только разовое создание моделей, а также разработка метода обновления, который позволит формировать модели и в будущем.

Так как модели типовых процессов являются частным случаем моделей процессов с учетом особенностей их реализации в системе ERP, были рассмотрены научные исследования по теме моделирования процессов. Описания функциональных требований, как правило, имеет лингвистическое представление. Поэтому при работе с моделями процессов предприятий в условиях неопределённости, нечеткая логика имеет успешное практическое применение. Вклад нечеткой логики в процесс управления инновациями был описан в работе [7], подчеркнута практическое значение ее использования в задачах поддержки принятия решения.

Нечеткая логика решает множество задач формирования оценок. В работе [8] отмечена крайняя важность применения нечеткой логики в развитие процесса оценки бизнеса предприятий [8]. Также математический аппарат нечеткой логики был описан и применен для оценки качества реализации моделей процессов [5, 6]. Стоит отметить, что в работе [5] не только разработана новая модель нечеткой логики для применения к решению задач одного проекта внедрения, но и найдено ее применение в процессе постоянного улучшения процессов. Применение нечеткой логики выполнено для оценки характеристик процессов, например повышение индикатора устойчивости, были так же отмечены в работе [9].

Помимо решения задач поддержки принятия решений и формирования оценок нечеткая логика применяется для расширения вариативности в описании моделей процессов предприятия [11], например, для процесса оценки поставщиков облачных услуг [12]. Помимо этого, открытая нечеткая система управления может быть применена для управления заданиями ИТ-проекта, когда информация на проекте имеет слабоструктурированный характер [10].

На текущий момент наблюдается недостаток информации связанный, прежде всего, с узкой областью применения решения задачи. Применяющиеся методы базируется на эвристических подходах экспертной оценки и не формализованы в виде методов или алгоритмах. Научные работы о данных методах отсутствуют, поэтому для сравнения были взяты результаты опросы экспертов, занимающихся данной задачей на практике. Имеются близкие по тематике работы, посвященные применению нечеткой логики для работы с организационными процессами предприятия [5, 7, 9, 11, 17]. Методы, описанные в данных работах, а также описания основных результатов фаз, согласно методологии SAP Activate [2], а также предыдущие работы автора [21, 22] послужили базой для данного исследования. Для достижения целей работы потребовалась адаптация имеющийся методов в части: расширения количества и типов элементов системы, включающей модели типовых процессов и проектную документацию; формализации метода, позволяющего формировать модели типовых процессов; описания критерия эффективности метода. Данные особенности заложены в основу исследования и определяют его научную новизну.

2. Постановка задачи. Предположим, что SaaS-система имеет n параметров S , доступных для конфигурации. Каждый параметр системы имеет l_i возможных значений v , то есть для каждого S_i имеется допустимый набор $\{v_1; v_2; \dots; v_{l_i}\}$, где $i = 1, \dots, n$. Состояние системы может быть задано вектором конфигураций каждого параметра $\vec{S} = (S_1, S_2, \dots, S_n)$, При внедрении системы на каждом проекте имеется выборка t функциональных требований P_j ($j = 1, \dots, t$), каждое из которых может быть реализовано m_j способами возмож-

ных конфигурации \vec{S}_{j_x} ($x = 1, \dots, m_j$) Поскольку одно состояние системы может быть определено одним целевым состоянием параметров $\vec{S}_T = (S_1, S_2, \dots, S_n)$, задача проекта внедрения системы определить вектор \vec{S}_T , который бы позволил определить x во всех P_j . В случае отсутствия решения, требуется определить какие P_j могут быть исключены из выборки для решения задачи. Критерий для исключения P_j из выборки определяется тем, с какими затратами на выполнение настроек $f_C(\vec{S}_j)$ и выгодами от реализации требования $f_V(P_j)$ ассоциировано данное функциональное требование. Определение значения положительной функции $f_V(P_j)$ на практике осуществляется на базе экспертной оценки.

Поскольку определение векторов \vec{S}_{j_x} на практике является частной задачей проекта, значение положительной функции $f_C(\vec{S}_j)$ определяется через время t_j , необходимое для поиска \vec{S}_{j_x} для каждого P_j . Имеет место определение типовых функциональных требований BP_j с соответствующими определенными типовыми настройками \vec{BS}_j для которых $t_j = 0$. То есть для которых $x = 1$, а $\vec{BS} = \vec{S}_T$ для случая, когда для всех j справедливо $P_j = BP_j$. Поскольку на практике все проекты имеют различный набор функциональных требований, данное равенство не выполняется, но имеется возможность определить те j , для которых $P_j = BP_j$. Задача оптимизации может быть задана через целевую функцию $Z(P)$ в следующем виде:

$$Z(P) = \sum_{i=1}^t f_V(P_j) - \sum_{i=1}^t f_C(\vec{S}_j) \rightarrow \max.$$

Обозначим, через P множество всех функциональных требований на проекте $\sum_{i=1}^t P_j$, а через BP множество всех типовых функциональных требований $\sum_{i=1}^{\max} \vec{BS}_j$. Критерий качества типовых моделей Q может быть задан через степень покрытия в следующем виде:

$$Q = \frac{|P \cap BP|}{|P|} * 100\%,$$

где $|P \cap BP|$ – мощность множества, являющимся пересечением множеств P и BP , $|P|$ – мощность множества P . Поскольку $f_V(P_j)$ всегда положительна для каждого P_j , а функция $f_C(\vec{S}_j)$ принимает наименьшее значение при $\vec{S}_j = \vec{BS}_j$. То в случае постановки задачи, как задачи принятия решения о формировании типовых процессов предприятия, она может быть сведена к максимизации критерия качества типовых моделей для проектов с различной выборкой P :

$$\frac{|P \cap BP|}{|P|} \rightarrow \max.$$

Таким образом, чем больше типовых моделей было применено на проекте, тем меньше приходилось определять комбинацию необходимых настроек для каждого требования и тем меньше времени и затрат требовалось на проект в целом. Эффективность метода принятия решений при формировании моделей типовых процессов определяется процентом функциональных требований после окончания нового проекта, которые соответствовали типовым функциональным требованиям. Иначе говоря, насколько модели типовых процессов были полны для того, чтобы учесть все функциональные требования на проекте. Полное соответствие ($Q = 100\%$) подразумевает внедрение системы в полном соответствии с моделями типовых процессов и с минимальными трудовыми затратами.

3. Описание элементов системы и их связей, необходимых для решения задачи. Для решения задач исследования на первом этапе необходимо определение подхода к описанию функциональных требований и к описанию связей функ-

циональных требований с их системной реализацией. Как относящаяся к классу задач управления большими системами, задача внедрения ERP систем содержит большое число типов и количества переменных, поэтому требуется описание средствами теории множеств. Для успешного завершения проекта по внедрению системы требуется выполнить все функциональные требования в части автоматизации предприятия. Таким образом, элементы множеств – это функциональные требования и результаты, направленный на выполнение данных требований. Проектные решения и функциональные спецификации – документы, создаваемые в ходе проекта, представляют собой промежуточные результаты (множества), так как не выполняют функциональные требования, но являются необходимым элементом для достижения результата. Результат представляет собой настройку системы, разработку (протестированный программный код), миграцию в систему основных или транзакционных данных, или конфигурацию ролей и полномочий в системе. Описание моделей типовых процессов в исследовании выполняется с применением ряда допущений: на группы исследуемых процессов, на уровень их детализации, на их взаимосвязь между собой. Для сохранения единого лингвистического представления элементов функциональных требований новое требование должно входить в множество имеющихся, либо быть описано по аналогии с уже входящими в множество элементами, чтобы избежать пересечений значений.

Информационная модель связи множествами системы, предложенная авторами, представлена на рис. 1. Разработка новой информационной модели обусловлена отсутствием такой информационной модели, которая бы учитывала детализацию типовых моделей и связи между структурными элементами проектной документации.

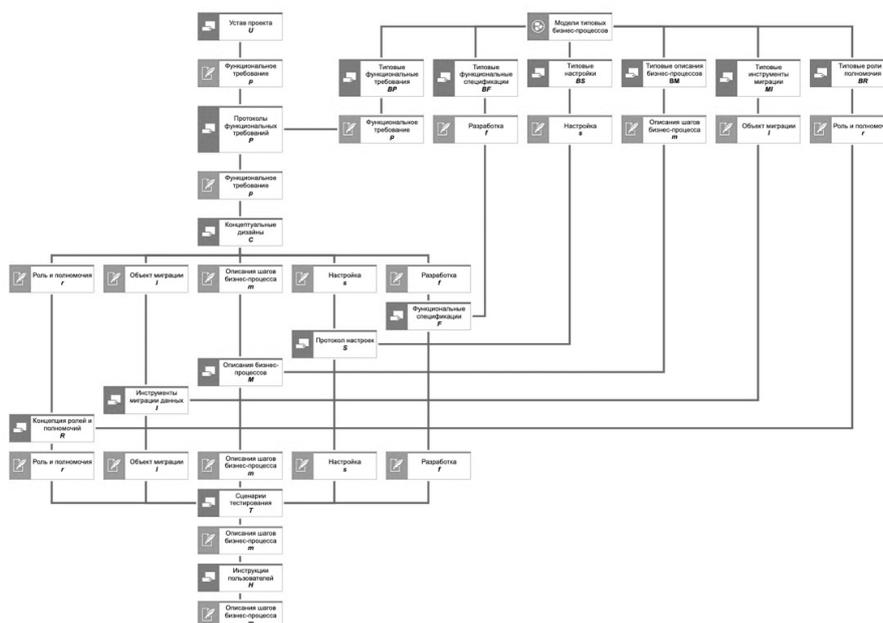


Рис. 1. Информационная модель связи между множествами проектной документации и типовыми моделями

Как было сказано ране, элементы множеств имеют лингвистическую неопределенность, поэтому они были описаны интегрированными инструментами теории нечетких множеств и методами описаний из теории больших систем. Ниже перечислены множества проектной документации.

Множество функциональных требований имеет следующий вид: $P = \{p | g_i(p) \leq 0, i = 1, \dots, ip\} \subset PS$, где p – функциональное требование, $g_i(p)$ – функция ограничений допустимых требований, ip – число требований, PS – нечеткое множество допустимых требований заказчика. Множество PS является нечетким множеством вида: $PS = \{(p, \mu_{PS}(p)) | p \in U\}$, где p – функциональное требование, $\mu_{PS}(p)$ – функция принадлежности, описывающая в какой мере элемент p принадлежит нечеткому множеству PS . Данная функция позволяет определить соответствие требования, включенному в протокол требований, определенным рамкам проекта, U – универсальное множество.

Протоколы настроек представляет собой множество настроек, необходимых для выполнения шагов процессов. Оно основывается на множестве требований и может быть представлено в следующем виде: $S = \{\vec{s} | g_i(\vec{s}) \leq 0, i = 1, \dots, is\} \subset SS$, где \vec{s} – вектор объекта настройки, $g_i(\vec{s})$ – функция ограничений (учитывающая взаимную непротиворечивость настроек), is – число объектов настройки, SS – нечеткое множество допустимых объектов настройки. Множество SS является множеством вида: $SS = \{(\vec{s}, \mu_{SS}(\vec{s})) | \vec{s} \in U\}$, где \vec{s} – вектор объекта настройки, $\mu_{SS}(\vec{s})$ – функция принадлежности, U – универсальное множество. Компоненты вектора \vec{s} следующие: $\vec{s} = \{sd, sr\}$, где sd – объект детального описания настройки, sr – реализация настройки в системе ($s \in U, sr \in U$).

Для полноты описания системы множеств проектной документации по аналогии описаны следующие множества: Концепция ролей и полномочий R ; Описание шагов процессов M ; Инструменты миграции данных I ; Функциональные спецификации F ; Концептуальный дизайн C ; Сценарии тестирования T ; Инструкции пользователей H . Модели типовых процессов включают шесть множеств:

Типовые функциональные требования $BP = \{bp | g_i(bp) \leq 0, i = 1, \dots, ibp\} \subset PS$, где bp – функциональное требование, $g_i(bp)$ – функция ограничений допустимых требований, ibp – число требований, PS – нечеткое множество допустимых требований заказчика, заданное ранее.

Типовые настройки $BS = \{\vec{bs} | g_i(\vec{bs}) \leq 0, i = 1, \dots, isb\} \subset SS$, где \vec{bs} – вектор объекта настройки, $g_i(\vec{bs})$ – функция ограничений (учитывающая взаимную непротиворечивость), isb – число объектов настройки, SS – нечеткое множество допустимых объектов настройки, описанное ранее. По аналогии заданы множества Типовых ролей и полномочий BR , типовых инструментов миграции BI , типовых функциональных спецификаций BF , типовых описаний процессов BM .

4. Разработка метода принятия решений. Из описания системы множеств проектной документации видно, что с множествами моделей типовых процессов BP, BS, BF, BI, BR, BM связаны соответствующие множества P, S, F, I, R, M . Данные множества учтены в методе принятия решений. На рис. 2 представлен предложенный метод принятия решений о формировании множеств BP, BS, BF, BI, BR, BM на базе множеств P, S, F, I, R, M который позволяет менять критерий эффективности Q через изменение множества BP .

1. Этап формирования множества P

На данном этапе происходит определение элементов множества P . Из документов протоколов требований формируются элементы p , представляющие собой отдельные функциональные требования. Элементы множества имеют единую логику в описании и не повторяются.

2. Этап формирования множеств S, F, I, R, M

На данном этапе происходит определение элементов множества S, F, I, R, M . По аналогии с первым этапом, из документов протоколов настроек, функциональных спецификаций, инструментов миграции данных в концепции ролей и полно-

мочий формируются элементы $\vec{s}, \vec{f}, \vec{i}, r, m$. Элементы представляют отдельные описания реализаций в виде настройки параметров системы, разработки, выполнения миграции основных данных, настройки ролей и полномочий. Элементы внутри каждого множества имеют единую логику в описании внутри множества и не повторяются.

3. Этап определения разницы множеств $P \setminus BP$

На данном этапе выполняется определение разницы множеств $P \setminus BP$. Новое множество содержит элементы функциональных требований, которые не включены в модели типовых процессов. Критичным для данной операции является соответствие структуры описания элементов множеств P и BP .



Рис. 2. Метод принятия решений о формировании типовых моделей процессов

4. Этап определения соответствий между множествами $P \setminus BP$ и S, F, I, R, M

На данном этапе происходит определение соответствий между множествами $P \setminus BP$ и S, F, I, R, M . Самый сложный этап с точки зрения практической реализации. Этап необходим для того, чтобы определить необходимую реализацию для функциональных требований, не включенных в модели типовых процессов. По причине того, что на практике невозможно четкое описание данного соответствия, на данном этапе используется методы нечеткой логики.

5. Определение пересечений множеств $S \cap BS, F \cap BF, I \cap BI, R \cap BR, M \cap BM$ для соответствующих элементов множества $P \setminus BP$

На данном этапе происходит определение пересечений множеств $S \cap BS, F \cap BF, I \cap BI, R \cap BR$ и $M \cap BM$. Выполняется это не для всех элементов множеств, в только для соответствующих элементам множества $P \setminus BP$. Пересечения нечетких множеств S и BS задается через нечеткое множество

$$S \cap BS = \int_U \min(\mu_S(p), \mu_{BS}(p)) / p.$$

Данный этап позволяет выделить реализации функциональных требований для случая, когда функциональное требование не было включено в модель типовых процессов, а его реализация – была включена. Данный этап необходим так как различные функциональные требования могут влиять на одни и те же реализации. Например, различные требования могут повлиять на настройку одного параметра системы. Сравнение требований к параметрам позволяет определить потенциальные конфликты настроек ERP системы.

б. Принятие решений и формирование множеств BP, BS, BF, BI, BR, BM

На данном этапе выполняется принятие решений относительно включения новых функциональных требований (этап 3). Элементы P_j не меняющие вектор \vec{S}_T добавляются в выборку. В ином случае возникает так называемый конфликт настройки. Принятие решений для того случая происходит путем экспертной оценки суммы функций $\sum_{i=1}^I f_V(P_j)$ и $\sum_{i=1}^I f_C(\vec{S}_j)$ в случае добавления нового элемента в выборку и без добавления. Решение принимается для случая максимального значения $Z(P)$. Включение новых функциональных требований может требовать изменение нечеткой модели соответствия между множествами BP и BS, BF, BI, BR, BM в части заданных правил (этап 4). Включение одних функциональных требований может потребовать исключение из множества других требований, которые вызывают конфликт настройки. На шестом этапе происходит формирование множеств BP, BS, BF, BI, BR, BM исходя из принятых решений относительно новых функциональных требований.

5. Проверка метода и исследование полученных результатов. Для определения нечеткого соответствия может быть построена ММО-система нечеткого логического вывода типа Мамдани. Рассматривались наиболее распространенные на практике алгоритмы Мамдани и Сугено, по которым существует большое число трудов, описывающих их практическое применение и полученные результаты. Алгоритм Мамдани был выбран за счет его интуитивного и легко интерпретируемого характера базы правил (консеквенты в алгоритме Сугено не нечеткие и поэтому более трудны для интерпретации). Преимущество алгоритма Сугено в том, что в консеквентах правил Сугено может быть столько же параметров на правило, сколько входных значений, это дает больше степеней свободы в дизайне и большую гибкость при проектировании системы. Так же с точки зрения вычислений алгоритм Сугено более эффективен, потому что сложный процесс дефаззификации Мамдани заменен средневзвешенным. Однако алгоритм Сугено может быть использован для MISO-систем, когда алгоритм Мамдани так же работает для MIMO-систем. MIMO-систему можно заменить на множество MISO-систем, однако этого не было сделано для упрощения формирования правил экспертами. Поскольку данная задача решалась впервые было важно подтвердить наличие положительного результата подхода, поэтому на первой итерации не рассматривались алгоритмы Тсукамото, Ларсена, а также упрощенные алгоритмы. Рассмотрение данных алгоритмов планируется в следующих работах. Используемый алгоритм включает расчёт импликации P в S выглядит следующим образом:

1. Введение нечеткости, через формирование базы правил, нахождение степени принадлежности для предпосылок правил. Значения параметров r и s оказываются недоступными для точного измерения, и тогда в их оценке неизбежно появляется субъективный компонент, выражаемый нечеткими оценками типа «всегда», «обычно», «может быть», «иногда», «редко», «никогда». Пример двух правил в простом виде: 1. если есть Функциональное требование r_1 со значением функции принадлежности $\mu_{PS_1}(r_1)$ и есть Функциональное требование r_2 со значением функции принадлежности $\mu_{PS_1}(r_2)$, то требуется Реализация настройки s_1 с функ-

цией принадлежности $\mu_{SS_1}(s_1)$; 2. если есть Функциональное требование r_1 со значением функции принадлежности $\mu_{PS_2}(r_1)$ и есть Функциональное требование r_2 со значением функции принадлежности $\mu_{PS_2}(r_2)$, то требуется Реализация настройки s_1 с функцией принадлежности $\mu_{SS_2}(s_1)$.

2. Агрегирование подусловий правил нечеткой продукции осуществляется при помощи нахождения степени принадлежности после операции минимум, где нечеткая импликация определяется через определение уровня «отсечения» для предпосылок каждого из правил. Целью этого этапа является определение степени истинности условий для каждого правила системы нечеткого вывода. Для каждого условия находим минимальное значение истинности всех его подусловий. Для приведенного примеры формула будет выглядеть следующим образом:

$$\alpha_1 = \mu_{PS_1}(r_1 \cap r_2) = \min(\mu_{PS_1}(r_1); \mu_{PS_1}(r_2));$$

$$\alpha_2 = \mu_{PS_2}(r_1 \cap r_2) = \min(\mu_{PS_2}(r_1); \mu_{PS_2}(r_2)).$$

3. Находятся «усеченные» функции принадлежности $\mu_{SS'_1}(s_1), \mu_{SS'_2}(s_2)$ для предпосылок каждого правила при нечеткой композиции:

$$\mu_{SS'_1}(s_1) = \min(\alpha_1; \mu_{SS_1}(s_1));$$

$$\mu_{SS'_2}(s_1) = \min(\alpha_2; \mu_{SS_2}(s_1)).$$

4. Аккумуляция подзаклучений правил нечеткой продукции проводится при помощи классического для нечеткой логики максимума объединения функций принадлежности $\mu_{SS'_1}(s_1)$ и $\mu_{SS'_2}(s_2)$:

$$\mu_{SS}^{\Sigma}(s) = \max(\mu_{SS'_1}(s_1); \mu_{SS'_2}(s_1)).$$

5. Дефаззификация, приведение к четкости (для нахождения s_1) проводится часто применимым методом по центру тяжести. Цель данного заключительного этапа – получить количественное значение для каждой из выходных лингвистических переменных. Расчёт происходит по формуле:

$$s_1 = \frac{\int_{min}^{max} s \cdot \mu_{SS'_1}(s) ds}{\int_{min}^{max} \mu_{SS'_1}(s) ds}.$$

В ходе исследования элементы множества Р формировались на базе функциональных требований, полученных в ходе семи проектов по внедрению SaaS-систем на предприятия, находящихся на территории РФ. Были проанализированы процессы, относящиеся к группе управления процессами закупки, такие как формирование годового плана закупок, регистрация и квалификация контрагентов, проведение закупочных процедур, управление контрактами, управление заявками и заказами на закупку, контроль поступления материалов и приемки услуг, управление счетами на оплату. Для формирования множеств S, F, I, R, M использовались 394 файла в форматах MS Word и MS Excel проектной документации, среди которых были концептуальные решения, описания настроек, описание разработок, реестр объектов миграции и другие документы, представляющие описанные множества данного исследования. Выборка для исследования включала следующий список индустрий: химическая промышленность, обрабатывающая промышленность, горнодобывающая промышленность, нефтегазовая промышленность, грузоперевозки и логистика, телекоммуникации, розничная торговля. В данной работе не была выполнена сегментация в зависимости от индустрии, это было отложено на следующие этапы исследования.

Было построено две модели с применением теории нечетких множеств: модель, имеющая на входе множество $P \setminus BP$, на выходе – множество реализаций требований S , и модель, имеющая на входе множество $P \setminus BP$, на выходе – M . Модели имеют схожую структуру, но отличаются функциями принадлежности и методиками формирования базы правил. Функции принадлежности $\mu_{PS}(p)$, $\mu_{SS}(s)$ и $\mu_{MS}(m)$ были взяты треугольного типа, так как для данных функций по сравнению с другими типами требуется наименьший объем информации, ограничивающийся данными об угловых точках. Функции принадлежности множеств $\mu_{MPS}(pm)$, $\mu_{MSS}(ms)$ и $\mu_{MMS}(mm)$ имели прямоугольную форму при первоначальном описании и позже были заменены на треугольную. За основу формализации требований были использованы описания функциональных возможностей систем, так в случае решения SAP Arriba, использовались описания к 402 параметрам системы. Данные описания были определены, как первоначальные элементы множества MS . Число заложенных элементов множества P на различных проектах составляло от 105 для 280 элементов, множества PB – 97 элементов. Экспертная оценка потребовалась для формирования базы правил модели, приведения описаний функциональных требований к описаниям, используемых в документах с функциональными возможностями системы, была выполнена корректировка текстовых описаний без потери семантики элементов. Данная операция была выполнена на базе семи документов, описывающих функциональные требования к системе. Экспертам предлагалось оценить влияние функциональных требований (например, «параллельное согласование заявок», «уведомление заявителя по почте о факте поступления материала на склад», «контроль бюджета при проведении закупочной процедуры») на доступные в системе настройки системы в виде лингвистических переменных, выражающими качественные оценки («требуется настройка функции X », «может быть потребуется настройка функции X », «скорее всего потребуется настройка функции X », «точно потребуется настройка функции X »). Это было заложено в нечеткую модель управления (этап 4 в модели). В текстах проектных решений и других документах MS Word были выделены области текста, связанные с первоначальными требованиями, был выполнен подбор релевантных моделей типовых процессов закупки и определена их связь с функциональными реализациями в различных частях проектной документации. Данная операция позволила привести формат исходных документов в соответствие с используемыми в исследовании множествами S и M для их применения в процессе формирования моделей типовых процессов закупки. Из анализа были исключены множества F , I , R для упрощения проведения анализа метода. Специфика облачных систем накладывает строгое ограничение на использование множества F , а множества I и R не представляют большой выгоды при внедрении по сравнению с множествами M и S . Был написан программный код, позволяющий использовать систему нечеткого вывода применительно к функциональным требованиям и их реализациям в виде настроек системы [23]. Применение экспертов было необходимо так же потребовалось для агрегирования подусловий в процессе нечеткого вывода и корректировок функции принадлежности. Удалось не только связать множество функциональных требований с их реализациями, но и выделить дефициты в моделях типовых процессов, что послужило базой для их формирования и обновления согласно предложенному методу. Данный метод демонстрирует современные вызовы к подобным задачам принятия решений, которые могут быть решены использованием технологии искусственного интеллекта. Технология может быть применена на шагах 1, 2 и 6 метода для оптимизации задачи экспертных оценок и является темой дальнейших исследований.

В ходе исследования были сформированы 32 модели типовых процессов. Это позволило увеличить значение критерия эффективности, на базе функциональных требований исследуемых проектов, с 32 % до 67 %. Сформированные модели были

применены на проекте внедрения в индустрии розничной торговли, получены положительные отзывы. В табл. 1 приведены результаты расчёта критерия эффективности моделей типовых процессов на базе семи проектов.

Таблица 1

Зависимость критерия эффективности от количества новых проектов.

Номер проекта	Мощность множества Р для проекта	Мощность множества S	Количество правил нечеткой модели	Критерий эффективности метода
0	97	402	243	–
1	201	411	280	32%
2	108	413	285	56%
3	237	410	314	73%
4	105	412	352	61%
5	202	412	361	62%
6	163	412	366	64%
7	280	412	367	67%

Первая строка отражает показатели моделей типовых процессов до начала формирования. Множество Р формировалось на основании проектных документов каждый раз независимо. Множество S отражает набор параметров конфигурации ERP системы. Количество правил нечеткой модели увеличивалось каждый раз при появлении новых функциональных требований. Критерий эффективности рассчитывался по отношению к функциональным требованиям по каждому проекту независимо. Стоит отметить повышение эффективности модели при увеличении числа входных данных.

Сравнение результатов работы метода было произведено со стандартным эвристическим методом, который на базе экспертной оценки позволял сократить трудозатраты проекта независимо от количества итераций на 10 %. Предложенный метод показал преимущество начиная с достижения критерия эффективности, более 56 % и больше. Результаты приведены в виде графика на рис. 3. Затраты на реализацию предложенного метода были оценены в 60 дней трудозатрат на первоначальную настройку и 5 дней для внесения в систему новой выборки, в сравнение с 35 днями стандартного метода, что делает применение метода целесообразным после пятого проекта.

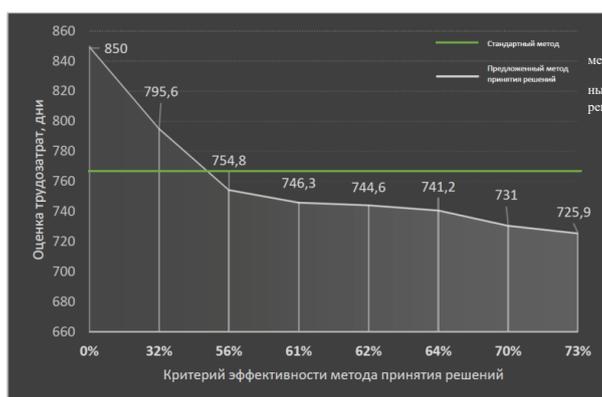


Рис. 3. Сравнение работы стандартного метода и предложенного метода в виде зависимости оценки трудозатрат проекта от критерия эффективности метода принятия решений

На рис. 4 и 5 представлены два описания типового организационного процесса «Создание заявки на закупку материалов по неосновной деятельности» до и после использования метода.

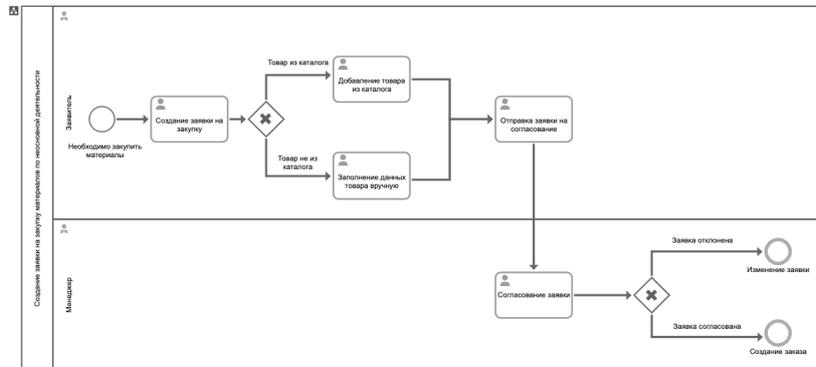


Рис. 4. Описание типового организационного процесса создания заявки до применения метода

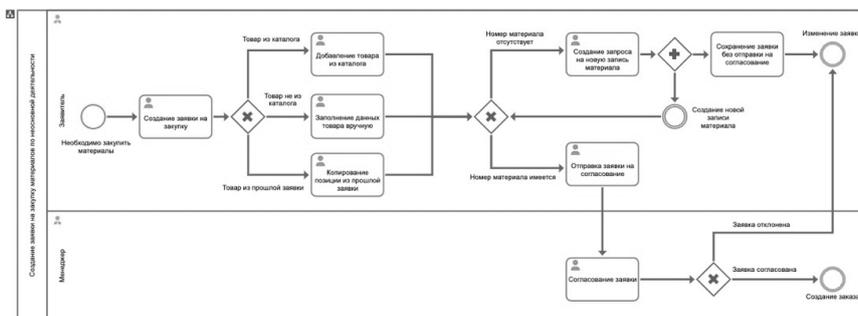


Рис. 5. Описание типового организационного процесса создания заявки после применения метода

В процессе принятия решений были обнаружены требования, специфичные для РФ. Например, требуется присутствие записи материала и кода материала в каждой заявке на закупку для корректной приемки товара на склад и для формирования финансовых проводок в соответствии с правилами бухгалтерского учета РФ. Также было обнаружено требование к копированию позиций заявки из прошлых заявок. Функциональное требование обусловлено тем фактом, что заявители часто заказывают позиции, которые заказывали ранее. Данные требования не были учтены в моделях типовых процессов и поэтому на каждом проекте требовали дополнительных затрат.

Основные трудности в применении метода на практике относятся к двум группам. Первая группа включает сложности при приведении функциональных требований в соответствие формату моделей типовых процессов. Ряд функциональных требований имели общий характер (например, «наличие среды для проведения тестирования системы»), данные требования не могли быть связаны с настройками системы, так как их реализация уже была заложена в базовую архитектуру системы и не поддается изменению, поэтому они были исключены из исследования. Подобные сложности решаются вовлечением экспертов на этапе формирования множества P в методе принятия решений. Вторая группа трудностей

включает сложности при выделении групп процессов закупки и общего множества функциональных требований к ERP системе. Это возникает в случае, когда проект внедрения затрагивает сразу несколько ключевых процессов предприятия. Сложности второй группы отсутствуют в случае внедрения отдельных систем управления процессами закупки крупных предприятий.

Заключение. В результате исследования был создан метод принятия решений о формировании моделей типовых процессов, используемых при внедрении систем управления ресурсами предприятия. Была формализована задача и выполнен поиск решения, позволяющего формировать модели на основании результатов успешных внедрений систем управления ресурсами предприятия в РФ. Были расширены модели типовых процессов в части учета российской специфики бизнеса и особенностей облачных технологий. Было выполнено описание системы множеств проектной документации на базе теории больших систем и теории нечетких множеств. Система включает документацию, создаваемую и используемую при внедрении систем управления ресурсами предприятия, а также модели типовых процессов, которые используются при создании проектной документации. Выполнен анализ связей моделей типовых процессов и проектной документации. Задан критерий эффективности метода для оценки достижения целей исследования. Описан метод принятия решений о формировании моделей на базе теории больших систем и с применением теории нечетких множеств. Выполнена проверка метода и выполнен расчёт критерия эффективности метода.

Проверка метода выполнялась на базе функциональных требований к процессам управления закупками крупных предприятий и реализации требований в системах на платформе SAP. Подтвержден рост значения критерия эффективности при применении предложенного метода. Представлены описания типового процесса создания заявки до и после применения метода. Полученные результаты позволили заложить основу подхода к формированию моделей в процессе обновлений функционала систем управления ресурсами предприятия с применением облачных технологий.

В последнее время увеличивается число проектов по переходу на облачные системы управления ресурсами предприятия в рамках задач компании по повышению операционной эффективности бизнеса, по расширению предприятия и по сокращению издержек, в том числе за счет снижения стоимости поддержки корпоративных систем. Метод расширения моделей типовых моделей для данных проектов позволяет уменьшить риски проекта, уменьшить необходимое время на проектирование и реализацию, и как результат уменьшить стоимость проекта.

Планируется дальнейшая работа в части увеличения данных с новых проектов внедрения, сегментация моделей на индустрии, введение новых функциональных областей процессов. А также расчет критерия эффективности метода при добавлении операторов понижения контрастности нечетких множеств и использовании более сложных функции принадлежности на этапе определения соответствий множеств в предложенном методе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Monk E., Wagner B.* Concepts in Enterprise Resource Planning. – 4th ed. – Boston: Cengage Learning, 2012. – 272 p.
2. *Denecken S., Musil J., Santhanam S.* SAP Activate. – Quincy: Rheinwerk Publishing, 2020. – 600 p.
3. *Kalaimani J.* SAP Project Management Pitfalls: How to Avoid the Most Common Pitfalls of an SAP Solution. – 4th ed. – NY.: Apress, 2015. – 350 p.
4. *Kim H.M., Ramkaran R.* Best practices in e-business process management: Extending a re-engineering framework // Business Process Management Journal. – 2004. – No. 10 (1). – P. 27-43.

5. *Figueroa-Garcia J.C., Kalenatic D., Lopez-Bello C.A.* A Fuzzy Evaluation of Projects for Business Processes' Quality Improvement // *Intelligent Systems Reference Library*. – 2015. – No. 87. – P. 559-579.
6. *Yahya F., Boukadi K., Ben Abdallah H., Maamar Z.* A fuzzy logic-based approach for assessing the quality of business process models // *International Conference on Software Technologies: Proceedings of the 12th International Conference on Software*. – Madrid, 2017. – P. 61-72.
7. *Alfaro Garcia V.G., Gil-Lafuente A.M., Alfaro Calderon G.G.* A Fuzzy Logic approach towards innovation measurement // *Global Journal of Business Research*. – 2015. – No. 9. – P. 53-71.
8. *Beraza J.M., Rodriguez A.* A Paradigm Shift in Business Valuation Process Using Fuzzy Logic // *Soft Computing in Management and Business Economics*. – 2012. – No. 287. – P. 61-75.
9. *Safitri N.L., Intani Budiawati G.* Improving Business Process by Evaluating Enterprise Sustainability Indicators Using Fuzzy Rule Based Classification // *Creative Technology for Human Life: Proceedings of 2018 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication*. – Semarang, 2018. – P. 55-60.
10. *Дязитдинова А.Р., Лиманова Н.И.* Использование нечетко-множественного подхода при управлении заданиями ИТ-проекта // *Программные продукты и системы*. – 2019. – Т. 32, № 1. – С. 5-11.
11. *Thomas O., Adam O., Loos P.* Using reference models for business process improvement: A fuzzy paradigm approach // *Lecture Notes in Informatics (LNI): Proceedings – Series of the Gesellschaft für Informatik (GI) – Germany, 2006*. – P. 47-57.
12. *Paunovic M., Ralevic N.M., Gajovic V., Vojinovic B.M., Milutinovic O.* Two-Stage Fuzzy Logic Model for Cloud Service Supplier Selection and Evaluation // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2018. – No. 1. – P. 1-11.
13. *Taratoukhine V., Yadgarova Y., Skachko E.* A Fuzzy Multiagent Approach for Integrated Product Life Cycle Environment // *Recent Developments and New Direction in Soft-Computing Foundations and Applications*. – 2016. – No. 342. – P. 99-110.
14. *Левина А.И., Ильин И.В., Эседулаев Р.А.* Повышение эффективности проектов внедрения информационных систем класса ВРМС с использованием типовых проектных решений // *Наука и бизнес: пути развития*. – 2017. – № 4. – С. 9-14.
15. *Штейнгарт Е.А., Бурмистров А.Н.* Обзор и сравнительная характеристика методологий разработки архитектуры предприятий // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. – 2016. – № 3 (245). – С. 111-129.
16. *Ильин И.В.* Developing a reference model of the information system architecture of high-tech enterprises // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки*. – 2015. – № 5 (228). – С. 97-107.
17. *Топольник В.Г., Крылова Л.В.* Функциональное моделирование процессов оказания гостиничных услуг // *Экономика, предпринимательство и право*. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 185-207.
18. *Belet T., Purcarea A.* The Evolution of Enterprise Resource Planning Systems // *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*. – 2017. – Vol. 3, No. 12. – P. 1091-1095.
19. *Katui S.* Enterprise Resource Planning: Past, Present, and Future // *New Review of Information Networking*. – 2020. – No. 25 (1). – P. 37-46.
20. *Bjelland E., Haddara M.* Evolution of ERP Systems in the Cloud: A Study on System Updates // *Systems*. – 2018. – No. 6 (2). – P. 22-48.
21. *Levchenko A.A., Taratukhin V.V.* Reference Business Processes-Based Method for Multi-Tenant SaaS Architecture Deployment and Adaptation // *Proceedings of the 28th Conference of Open Innovations Association FRUCT*. Vol. 1. – Finland: FRUCT Oy, 2021. – P. 264-270.
22. *Левченко А.А., Таратухин В.В.* Оптимизация модели управления корпоративной цифровой системой, предоставляемой по модели SaaS, с позиции компании-производителя // *Тр. Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии - 2020» («ИС & ИТ-2020», «IS&IT'20»): Научное издание в 2-х т. Т. 1.* – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2020. – С. 500-503.
23. Свидетельство 2021661837. Система поддержки принятия решений при выборе типовых процессов предприятия в области закупки: программа для ЭВМ / А.А. Левченко, В.В. Таратухин (RU); правообладатель А.А. Левченко, В.В. Таратухин (RU). № 2021660800; заявл. 30.06.21; опубл. 16.07.2021. 3,56 Мб.

REFERENCES

1. Monk E., Wagner B. Concepts in Enterprise Resource Planning. 4th ed. Boston: Cengage Learning, 2012, 272 p.
2. Denecken S., Musil J., Santhanam S. SAP Activate. Quincy: Rheinwerk Publishing, 2020, 600 p.
3. Kalaimani J. SAP Project Management Pitfalls: How to Avoid the Most Common Pitfalls of an SAP Solution. 4th ed. NY.: Apress, 2015, 350 p.
4. Kim H.M., Ramkaran R. Best practices in e-business process management: Extending a re-engineering framework, *Business Process Management Journal*, 2004, No. 10 (1), pp. 27-43.
5. Figueroa-Garcia J.C., Kalenatic D., Lopez-Bello C.A. A Fuzzy Evaluation of Projects for Business Processes' Quality Improvement, *Intelligent Systems Reference Library*, 2015, No. 87, pp. 559-579.
6. Yahya F., Boukadi K., Ben Abdallah H., Maamar Z. A fuzzy logic-based approach for assessing the quality of business process models, *International Conference on Software Technologies: Proceedings of the 12th International Conference on Software*. Madrid, 2017, pp. 61-72.
7. Alfaro Garcia V.G., Gil-Lafuente A.M., Alfaro Calderon G.G. A Fuzzy Logic approach towards innovation measurement, *Global Journal of Business Research*, 2015, No. 9, pp. 53-71.
8. Beraza J.M., Rodriguez A. A Paradigm Shift in Business Valuation Process Using Fuzzy Logic, *Soft Computing in Management and Business Economics*, 2012, No. 287, pp. 61-75.
9. Safitri N.L., Intani Budiawati G. Improving Business Process by Evaluating Enterprise Sustainability Indicators Using Fuzzy Rule Based Classification, *Creative Technology for Human Life: Proceedings of 2018 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication*. Semarang, 2018, pp. 55-60.
10. Diyazitdinova A.R., Limanova N.I. Ispol'zovanie nechetko-mnozhestvennogo podkhoda pri upravlenii zadaniyami IT–proekta [Using a fuzzy-multiple approach when managing tasks of an IT project], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and Systems], 2019, Vol. 32, No. 1, pp. 5-11.
11. Thomas O., Adam O., Loos P. Using reference models for business process improvement: A fuzzy paradigm approach, *Lecture Notes in Informatics (LNI): Proceedings – Series of the Gesellschaft fur Informatik (GI) – Germany*, 2006, pp. 47-57.
12. Paunovic M., Ralevic N.M., Gajovic V., Vojinovic B.M., Milutinovic O. Two-Stage Fuzzy Logic Model for Cloud Service Supplier Selection and Evaluation, *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, No. 1, pp. 1-11.
13. Taratoukhine V., Yadgarova Y., Skachko E. A Fuzzy Multiagent Approach for Integrated Product Life Cycle Environment, *Recent Developments and New Direction in Soft-Computing Foundations and Applications*, 2016, No. 342, pp. 99-110.
14. Levina A.I., Il'in I.V., Esedulaev R.A. Povyshenie effektivnosti proektov vnedreniya informatsionnykh sistem klassa BPMS s ispol'zovaniem tipovykh proektnykh resheniy [Improving the efficiency of projects for the implementation of BPMS-class information systems using standard design solutions], *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: ways of development], 2017, No. 4, pp. 9-14.
15. Shteyngart E.A., Burmistrov A.N. Obzor i sravnitel'naya kharakteristika metodologiy razrabotki arkhitektury predpriyatiy [Review and comparative characteristics of methodologies for the development of enterprise architecture], *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPBGPU. Ekonomicheskie nauki* [Scientific and Technical Vedomosti of SPBGPU. Economic sciences], 2016, No. 3 (245), pp. 111-129.
16. Ilyin I.V. Developing a reference model of the information system architecture of high-tech enterprises, *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki* [Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences], 2015, No. 5 (228), pp. 97-107.
17. Topol'nik V.G., Krylova L.V. Funktsional'noe modelirovanie protsessov okazaniya gostinichnykh uslug [Functional modeling of the processes of providing hotel services], *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo* [Economics, entrepreneurship and law], 2017, Vol. 7, No. 3, pp. 185-207.

18. Belet T., Purcareia A. The Evolution of Enterprise Resource Planning Systems, *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 2017, Vol. 3, No. 12, pp. 1091-1095.
19. Katuu S. Enterprise Resource Planning: Past, Present, and Future, *New Review of Information Networking*, 2020, No. 25 (1), pp. 37-46.
20. Bjelland E., Haddara M. Evolution of ERP Systems in the Cloud: A Study on System Updates, *Systems* 2018, No. 6 (2), pp. 22-48.
21. Levchenko A.A., Taratukhin V.V. Reference Business Processes-Based Method for Multi-Tenant SaaS Architecture Deployment and Adaptation, *Proceedings of the 28th Conference of Open Innovations Association FRUCT*. Vol. 1. Finland: FRUCT Oy, 2021, pp. 264-270.
22. Levchenko A.A., Taratukhin V.V. Optimizatsiya modeli upravleniya korporativnoy tsifrovoy sistemoy, predostavlyаемой по модели SaaS, s pozitsii kompanii-proizvoditelya [Optimization of the corporate digital system management model provided by the SaaS model from the position of the manufacturing company], *Tr. Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Intellektual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii - 2020» («IS & IT-2020», «IS&IT'20»): Nauchnoe izdanie v 2-kh t. T. 1* [Proceedings of the International scientific and technical Congress "Intelligent systems and information technology - 2020" ("IP & it-2020", "IS&IT'20"): Scientific publication in 2 vol. Vol. 1]. Taganrog: Izd-vo Stupina S.A., 2020, pp. 500-503.
23. Levchenko A.A., Taratukhin V.V. Svidetel'stvo 2021661837. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy pri vybore tipovykh protsessov predpriyatiya v oblasti zakupki: programma dlya EVM [Certificate 2021661837. Decision support system for choosing typical enterprise processes in the field of procurement: computer program]; copyright holder A.A. Levchenko, V.V. Taratukhin (RU). No. 2021660800; appl. 30.06.21; publ. 16.07.2021. 3,56 Mb.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Н.М. Головин.

Левченко Артем Андреевич – Воронежский государственный университет; e-mail: artem.levchenko@sap.com; г. Воронеж, Россия; тел.: 84732207521; кафедра информационных технологий управления; соискатель.

Таратухин Виктор Владимирович – Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; e-mail: vtaratoukhine@hse.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84957713232; базовая кафедра SAP; профессор.

Кравченко Юрий Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Levchenko Artem Andreevich – Voronezh State University; e-mail: artem.levchenko@sap.com; Voronezh, Russia; phone: +74732207521; the department of management information technologies; PHD student.

Taratukhine Victor Vladimirovich – Higher Education "National Research University Higher School of Economics"; e-mail: vtaratoukhine@hse.ru; Moscow, Russia; phone: 84957713232; the base department of SAP; professor.

Kravchenko Yury Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

Э.В. Кулиев, М.П. Кривенко, М.М. Семенова, С.В. Игнатьева

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДСИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ БИОЛОГИЧЕСКИ ПРАВДОПОДОБНЫХ
АЛГОРИТМОВ САМООРГАНИЗАЦИИ***

Рассматриваются основные понятия и определения систем поддержки принятия решений на основе самоорганизации. Системы поддержки принятия решений (Decision Support Systems) относятся к кругу интерактивных компьютерных систем, которые помогают использовать данные, модели и знания для решения частично структурированных, неструктурированных или неструктурированных проблем. Показана и описана схема базовой структуры системы поддержки принятия решений. Рассмотрены три основных компонента Decision Support Systems, а также описан случай, когда может быть применен четвертый компонент системы поддержки принятия решений – система управления, основанная на знаниях. В статье предложено описание интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Примеры специализированных интеллектуальных систем поддержки принятия решений включают в себя интеллектуальные системы поддержки принятия маркетинговых решений и системы медицинской диагностики, гибкие производственные системы. Проблемы, связанные с принятием оптимальных решений, занимают важное место в автоматизированном проектировании и требуют совершенствования методов и средств поддержки процессов оптимального проектирования на различных этапах. Рассмотрены алгоритмы самоорганизации, вдохновленные живой природой. Биоинспирированные алгоритмы являются представительским классом алгоритмов самоорганизации. Биоиндохновенные вычисления имитируют природу и используют основные концепции и поведение этих систем для решения сложных проблем. В статье описан алгоритм летучих мышей. Проведен экспериментальный анализ процесса применения алгоритма самоорганизации в системах принятия решений.

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений; искусственный интеллект; биоинспирированные алгоритмы; алгоритм стаи обезьян; алгоритм стаи летучих мышей.

E.V. Kuliev, M.P. Krivenko, M.M. Semenova, S.V. Ignatieva

**INTELLIGENT SUBSYSTEM FOR DECISION SUPPORT BASED ON
BIOLOGICALLY PLAUSIBLE ALGORITHMS FOR SELF-ORGANIZATION**

The article discusses the basic concepts and definitions of decision support systems based on self-organization. Decision Support Systems refers to a range of interactive computer systems that help to use data, models, and knowledge to solve semi-structured, unstructured, or unstructured problems. The diagram of the basic structure of the decision support system is shown and described. Three main components of Decision Support Systems are considered, and a case is described when the fourth component of a decision support system - a knowledge-based management system - can be applied. The article offers a description of an intelligent decision support system. Examples of specialized intelligent decision support systems include intelligent marketing decision support systems and medical diagnostics systems, flexible manufacturing systems. The problems associated with making optimal decisions occupy an important place in computer-aided design and require improving methods and means of supporting optimal design processes at various stages. Self-organization algorithms inspired by wildlife are considered. Bioinspired algorithms are a representative class of self-organization algorithms. Bio-inspired computing mimics nature and uses the underlying concepts and behavior of these systems to solve complex problems. The article describes the algorithm for bats. An experimental analysis of the process of applying the self-organization algorithm in decision-making systems is carried out.

Intelligent decision support systems; artificial intelligence; bioinspired algorithms; monkey flock algorithm; bat flock algorithm.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00099 и № 19-01-00648.

Введение. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений могут трансформировать процесс принятия решений человеком, объединяя исследования в области искусственного интеллекта, информационных технологий и системного проектирования. Методы искусственного интеллекта оказывают вычислительную помощь людям в практическом применении. Исследователи сравнивают человеческий и искусственный интеллект, исследуют вычислительный интеллект, представляют прагматические системы и обсуждают будущие тенденции.

Принятие решений – это фундаментальный процесс, который лежит в основе нашего взаимодействия с миром [1]. Известно, что люди принимают как хорошие решения, так и плохие. Исследователи обсуждают наиболее эффективный способ помочь людям в принятии «хорошего» решения. Один из способов охарактеризовать решения – классифицировать решения как структурированные, полуструктурированные или неструктурированные. Структурированные решения проблем, имеют известное оптимальное решение и, таким образом, не требуют поддержки принятия решений. Например, решение на кратчайшем маршруте между двумя точками может быть решено аналитически с точным решением. Проблемы неструктурированного решения не имеют согласованных критериев или решений и полагаются на предпочтения принимающего решения. Между этими двумя типами проблем существует широкий спектр полуструктурированных проблем, которые обычно имеют некоторые согласованные параметры и в то же время требуют участия человека. Полуструктурированные проблемы принятия решений поддаются поддержке принятия решений, что требует сочетание взаимодействия с пользователем и аналитических методов для разработки альтернатив на основе критериев и оптимальных решений. Когда методы искусственного интеллекта (ИИ) используются при разработке альтернатив полученная система называется интеллектуальной системой поддержки (IDSS).

Системы поддержки принятия решений. Процесс принятия решений – это сочетание навыков, личной интуиции, творческих способностей и суждений, приобретенных на основе опыта и взаимодействия с окружающей средой, а не строго дисциплинированного процесса. В течение долгого времени человека с такими навыками, принимающего решения, было бы достаточно для принятия решений для небольшой компании или организации. В настоящее время, с увеличением огромного количества собранных данных и огромного количества поступающей информации, человеку необходимо «поддерживать» компьютеризированные системы, чтобы справиться с новыми поставленными задачами и не отставать от конкурентов.

Системы поддержки принятия решений (Decision Support Systems (DSS)) относятся к широкому кругу интерактивных компьютерных систем, которые помогают лицам, принимающим решения, использовать данные, модели и знания для решения частично структурированных, неструктурированных или неструктурированных проблем [1–3]. Все современные DSS должны обрабатывать и учитывать огромное количество входных данных, собранных с мест. Это случай исследуемой веб-службы DSS. Лицо, принимающее решение является частью системы, поэтому DSS включает в себя возможности, позволяющие лицу, принимающему решение, выполнить одно или несколько действий ввода выбора, запроса системы, детализации объяснений, анализа выходных данных и вообще взаимодействовать с вычислительным устройством. Поскольку большинство DSS разработаны для решения конкретной проблемы или общего класса проблем, есть много типов DSS, специализированных для различных типов пользователей и проблем. DSS также может быть предназначен для одного или нескольких лиц, принимающих решения, и может использоваться для поддержки решений, которые варьируются от

управленческого до творческого решения проблем. Разные термины были прикреплены к DSS, включая Expert Systems, Group DSS, Collaborative DSS, Адаптивные DSS, Клинические DSS, Системы поддержки руководителя, Интеллектуальный DSS и т. д. Однопользовательские DSS, как правило, основаны на процессе Саймона, принимающие решения и имеют компоненты для ввода (интеллект), обработки (дизайн) и вывода результата [1]. Групповые или совместные DSS находятся на ранней стадии разработки, так как теории совместного принятия решений среди людей все еще появляются. Точно так же, DSS для поддержки инноваций и генерации идей появляются вместе с теориями человека для творческого процесса.

Схема базовой структуры DSS показана на рис. 1 и включает в себя лицо, принимающее решения, как часть системы.

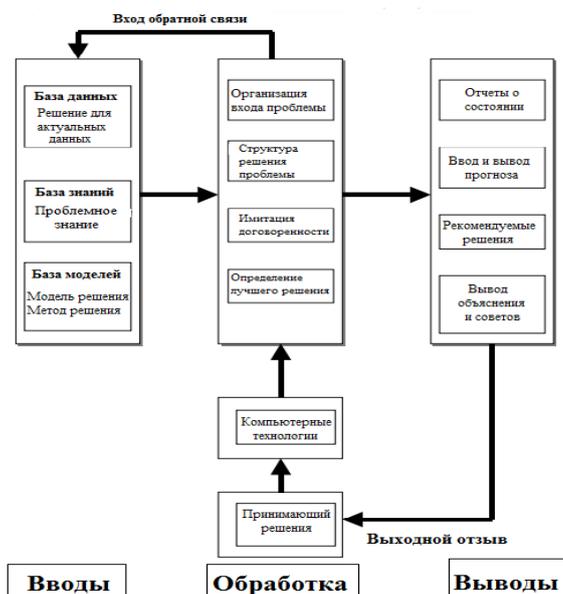


Рис. 1. Структура системы поддержки принятия решений

Входные данные включают в себя базу данных, базу знаний и модель базы. База данных содержит данные, относящиеся к решению проблемы, а база знаний может включать, например, руководство по выбору альтернатив [2].

Модельная база содержит формальные модели, алгоритмы и методологии для разработки результатов.

Обработка включает в себя использование модели принятия решений для моделирования или изучения различных состояний и поиска наилучшего решения в рамках ограничения [4]. Обратная связь от обработки может предоставить дополнительные входные данные, которые могут быть обновлены в режиме реального времени, чтобы улучшить решение проблемы. Результат может генерировать прогнозы и объяснения обосновать рекомендации и дать совет. Результаты предоставляются лицу, принимающему решение, которое может взаимодействовать с системой для предоставления дополнительной информации или запроса результатов.

Совсем недавно термин «поддержка принятия решений» был расширен и теперь включает другие решения, таких как системы управления знаниями, бизнес-интеллект и аналитика. Данные системы могут включать или не включать в себя взаимодействие с лицом, принимающим решения. Данные функции часто используются для расширения возможности выбора этих решений, например, для агреги-

рования широко рассредоточенных данных и получения наблюдений из больших распределенных наборов данных, называемых «большими данными». Такие системы могут включать в себя такие функции, как персонализация для предпочтений лица, принимающего решения, или даже подражать принятию решений человеком. Они предлагают новые мощные инструменты для решения очень сложных проблем и новые тенденции на будущее.

Применение искусственного интеллекта для принятия решений, безусловно, не ново. Последние достижения сделали методы искусственного интеллекта доступными для более широкой аудитории. Это видно по увеличению количества приложений в таких областях, как интеллектуальные системы поддержки принятия решений. Ведущие профессиональные организации искусственного интеллекта признают текущие усилия в «сосредоточении внимания на проблемах, а не на молотках» [5].

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений. Система поддержки принятия решений (DSS) определяется как интерактивная компьютерная информационная система, предназначенная для помощи пользователям в принятии решений путем извлечения, обобщения и анализа данных, важных для принятия решений. Три основных компонента DSS: система управления базами данных, система управления базой моделей и система создания диалогов и управления ими. Чтобы обеспечить интеллект для трех компонентов DSS, может быть включен дополнительный четвертый компонент, система управления, основанная на знаниях (KMS) (например, экспертная система). Экспертные системы (ЭС) в основном собирают и организуют знания о конкретных задачах, полученные от экспертов (опыт), в компьютерную программу. Пользователи могут дать конкретные советы по решению проблемы, вспомнив накопленные экспертные знания. DSS с KMS называется DSS, основанным на знаниях, или интеллектуальным DSS (IDSS).

Интеллектуальная система поддержки принятия решений (IDSS) [1, 6–8] – система поддержки принятия решений, которая широко использует методы искусственного интеллекта (ИИ). Примеры специализированных интеллектуальных систем поддержки принятия решений включают в себя интеллектуальные системы поддержки принятия маркетинговых решений и системы медицинской диагностики, гибкие производственные системы (FMS) [5].

Гибкие производственные системы (FMS) используют компьютеры и общие ресурсы (такие как роботы, машины и автоматизированные управляемые транспортные средства) для автоматического производства продуктов [9]. Из-за конкуренции разделяемых ресурсов в FMS могут быть некоторые процессы, которые после запуска не могут быть завершены, то есть тупиковые ситуации [1]. Следовательно, следует гарантировать, что в FMS не возникнет тупиковых ситуаций; другими словами, все рабочие процессы должны быть живыми. Обычно свойство живучести FMS может быть проверено путем анализа их моделей (таких как сети Петри) перед использованием. Поскольку сложность модели будет увеличиваться с увеличением гибкости рабочего цеха (альтернативные машины, альтернативные последовательности операций и полная гибкость маршрутизации), соответственно увеличится и работа по выявлению живучести FMS.

В настоящее время существует две категории методов проверки жизнеспособности: одна категория основана на классическом анализе перебора состояний сетей Петри, который экспоненциально растет с размером сети [8]; другой основан на стандартизированных инструментах смешанного целочисленного программирования (MIP), который первоначально был предложен Чу и Се и более эффективен, чем первый.

Исследования в области ИИ, направленные на то, чтобы дать возможность системам реагировать на новизну и неопределенность более гибкими способами, начинают использоваться в IDSS. Например, интеллектуальные агенты, которые выполняют сложные когнитивные задачи без необходимости вмешательства человека, использовались в ряде приложений для поддержки принятия решений. Возможности этих интеллектуальных агентов включают обмен знаниями, машинное обучение, интеллектуальный анализ данных и автоматический вывод. Ряд методов искусственного интеллекта, таких как рассуждения на основе случая, методов самоорганизации и нечеткая логика, также использовались, чтобы позволить системам поддержки принятия решений лучше работать в неопределенных условиях.

Постановка задачи. Проблемы, связанные с принятием оптимальных решений, занимают важное место в автоматизированном проектировании и требуют совершенствования методов и средств поддержки процессов оптимального проектирования на различных этапах.

Организация процедур поиска оптимальных решений в современных системах автоматизированного проектирования осложняется неполнотой априорного математического описания проектируемых объектов, что проявляется при проектировании сложных систем [6].

При оптимальном проектировании технического объекта его математическая модель (ММ) представляет формализованное описание критерия качества, обеспечивающего выполнение заданных функций, предъявляемых требований и др.

Задача параметрической оптимизации схмотехнического решения заключается в нахождении таких внутренних параметров схемы, при которых выходные параметры имели бы заданные характеристики, а элементы схемы и способ их соединения оставались бы неизменными.

Пусть в проектируемом объекте имеется n управляемых параметров, образующих вектор $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Обозначим целевую функцию через $F(X)$, а область ее определения – через XO . Вектор X определяет координаты точки в области определения XO . Если элементы вектора X принимают только дискретные значения, то XO является дискретным множеством точек и задача оптимизации относится к области дискретного программирования.

Цель алгоритмов решения задачи параметрической оптимизации – определить такой вектор управляющих параметров, при котором заданная целевая функция принимает минимальное значение.

Основная проблема постановки задачи заключается в формулировке целевой функции [2]. Сложность выбора целевой функции (функции качества) состоит в том, что любой технический объект первоначально имеет векторный характер критериев оптимальности, причем улучшение одного из выходных параметров, как правило, приводит к ухудшению другого, так как все выходные параметры являются функциями одних и тех же управляемых параметров и не могут изменяться независимо друг от друга. Такие выходные параметры называют конфликтными параметрами

В процессе разработки математической модели необходимо определить параметры объекта, оказывающие влияние на критерий оптимальности. Далее определяются параметрические, дискретизирующие и функциональные ограничения, накладываемые на параметры технического объекта.

Параметрическими называют ограничения следующего вида: $x'_i \leq x_i \leq x''_i$, где x_i – i -ый параметр объекта; x'_i и x''_i – соответственно \min и \max значения i -го параметра.

Дискретизирующие ограничения имеют вид: $x_j = \{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}\}$, где x_j – j-ый параметр технического объекта; x_{jk} – допустимые значения j-го параметра ($k=1, 2, \dots, m$). Такие ограничения накладываются на значения параметров либо в связи с их физической сущностью.

Функциональные ограничения, накладываемые на параметры объектов, представляются собой условия связи их значений. Эти ограничения имеют вид: $g_i(x) \leq 0$; $g_j(x) = 0$; $g_k(x) < 0$.

Функциональными ограничениями при оптимальном проектировании технического объекта могут быть условия прочности, жесткости, устойчивости. Эти условия обеспечивают желаемые значения тех или иных технических характеристик [5].

Биологически правдоподобные алгоритмы самоорганизации. Самоорганизация относится к процессу, когда свойство системы возникает в результате простого и локального взаимодействия большого числа компонентов. Примеры включают морфологическое развитие и регенерацию многоклеточных биологических организмов, создание путей и распределение задач у социальных насекомых и так далее. Самое главное, что эти системы не спроектированы и не управляются нисходящим способом какой-либо внешней сущностью, такой как агент или шаблон. Вместо этого они основаны на внутренних восходящих механизмах [9–11].

Эти восходящие самоорганизующиеся механизмы интересны с инженерной точки зрения, поскольку они часто позволяют повысить надежность и масштабируемость систем по сравнению с центральным управлением, а также значительно упростить компоненты системы, снижая стоимость развертывания. Кроме того, центральный или иерархический контроль часто просто невозможен из-за внутренней децентрализации системы.

Биоинспирированные алгоритмы являются представительским классом алгоритмов самоорганизации. Биоинспирированные вычисления имитируют природу и используют основные концепции и поведение этих систем для решения сложных проблем. ГА вдохновлен эволюцией, нейронными сетями из мозга, искусственными иммунными системами из иммунной системы, возникающими системами из муравьев и пчел, рендерингом (компьютерная графика) из шаблонов и рендеринга шкур животных, перьев птиц, раковин моллюсков и колоний бактерий, а также клеточные автоматы

Биоинспирированные решения по оптимизации имеют ряд преимуществ, таких как масштабируемость, отказоустойчивость, адаптация, скорость, модульность, автономность и параллелизм, что делает их работу более эффективной по сравнению с традиционными решениями во многих подходах к решению проблем. Однако, эти алгоритмы имеют несколько ограничений, таких как структура алгоритма, оптимальный баланс между разведкой и эксплуатацией, наилучшими показателями производительности в отношении того, как найти лучший алгоритм, автоматической настройкой параметров среди других. Таким образом, есть еще возможности для их улучшения, исследуя больше природы, чтобы разработать саморазвивающийся алгоритм, который может автоматически настраивать его поведение для решения сложных проблем [12].

Самоорганизация, основанная на алгоритмах, вдохновленных живой природой обычно основана на общих принципах, взятых из мира природы, которые могут быть составлены и переведены в алгоритмы.

Следует заметить, что в процессе решения задачи диспетчеризации установленной длины применение биоинспирированных стратегий помогает повысить разнообразие генетического материала популяций, при этом, увеличивая скорость схождения к глобальному оптимуму. Определяющими для эффективности реали-

зации алгоритма являются: размер популяции, нормы и тип генетических операций, оптимальный выбор весового коэффициента Q , применение которых обеспечивает появление в популяции оптимальных вариантов потомков, разнообразие их оптимальных частей и схождение популяции к оптимальному (квазиоптимальному) варианту.

В качестве биоинспирированных алгоритмов, которые можно было бы применить в системах интеллектуального принятия решений, рассмотрим алгоритм стаи летучих мышей. А также сравним со стандартным поиском решений в системах интеллектуального анализа данных [2].

Алгоритм стаи летучих мышей. Алгоритмы, вдохновленные природой, привлекают многих исследователей со всего мира для решения самых сложных задач оптимизации. Один из новейших членов этого обширного семейства - алгоритм летучей мыши.

Алгоритм оптимизации летучих мышей (ВА) [13] основан на биологии и представляет собой эвристический метод решения сложных задач оптимизации. Он представляет собой попытку смоделировать поведение летучих мышей при охоте на добычу, и алгоритм был представлен Янгом (X.-Sh. Yang). ВА оказался более мощным, чем оптимизация роя частиц и генетические алгоритмы, благодаря надежным функциям управления параметрами и возможности настройки частоты. Алгоритм стаи летучих мышей показывает хорошие результаты для многих задач оптимизации. К. Келкович и Д. Грела (K. Kielkiewicz and D. Grela) использовали ВА для задач нелинейной оптимизации [16].

Алгоритм летучей мыши – это инновационный метод, доказавший, что он дает лучшее решение, чем многие популярные традиционные и эвристические алгоритмы для решения сложных инженерных задач. ВА основан на эхолокации летучих мышей.

Одно из творений животной жизни, изучаемое многими зоологами – это эхолокация (или биологический сонар) летучих мышей. Есть несколько других групп животных, которые также обладают способностью к эхо-позиционированию, такие как птицы (южноамериканские нефтяные птицы и юго-восточные азиатские свифтеллы), киты, дельфины и мелкие насекомые, но это очень редко. Такое поведение летучих мышей начал изучать Лаззаро Спалланцани в 1794 г. Затем термин «эхолокация» был введен Дональдом Гриффином в 1944 году, когда летучие мыши излучали звук с эхом, превышающим частоту человеческого слуха, и использовали его для общего наведения в темноте и поиска добычи ночью с помощью эхолокации, летучие мыши излучают ультразвук. импульсы либо с измененной частотой (FM), либо с фиксированной частотой (CF), а иногда и с их комбинацией. Тональные сигналы, производимые в гортани (некоторые летучие мыши используют язык), излучаются короткими импульсами через рот или жабры. Шуга в 1990 описал, что отраженные звуки находились в состоянии доплеровского давления или преобразования, в результате чего принимаемый резонанс имел более высокую частоту, чем создаваемый ранее звук. Летучие мыши могут определять объект и расстояние, измеряя модифицированное время отражения эха.

Когда летучие мыши начинают искать добычу на этапе исследования, они излучают импульсы с низкой частотой около 10 Гц. Во время фазы приближения, когда летучие мыши обнаруживают добычу и приближаются к ней, импульсы должны быть короче, чтобы предотвратить помехи. Более короткие импульсы вызывают уменьшение времени между импульсом и эхом. Также в этот момент частота пульса постепенно увеличивается до 200 ударов в секунду, поскольку летучие мыши продолжают обновлять место добычи. Шуга утверждает, что частота излучения импульсов увеличивается, потому что летучим мышам необходимо подавать

больше сигналов, чтобы точно следовать за добычей, поскольку угловое положение добычи изменяется быстрее из-за более близкого расстояния между летучей мышью и объектом. На последнем этапе (заключительный этап) частота излучаемых импульсов увеличивается более чем на 200 Гц, а скорость излучения импульсов увеличивается всего за небольшую долю миллисекунды, задолго до того, как добыча будет поймана. У колонии летучих мышей есть два эксклюзивных подхода, чтобы избежать столкновения друг с другом при эхолокации. Это поведение в основном относится к типам летучих мышей-вампиров, таким как срыгивание кровью от успешных летучих мышей, чтобы скормить их бесполезному члену в колонии, как ответ на тщательно сбалансированный энергетический бюджет каждого члена колонии. Вилкиусон обнаружил в 1988 г., что выживающее альтруистическое поведение растет у выживших, так что его приспособленность относительно высока к невосприимчивым, и взаимный альтруизм также возникает во время ухода за больными.

Эхолокация помогает летучим мышам находить добычу, а также помогает различать различные виды препятствий и опасностей на пути к добыче в полной темноте (рис. 2).

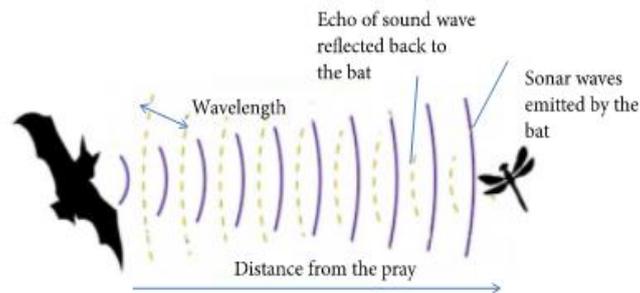


Рис. 2. Модель роевого алгоритма на основе поведения летучих мышей

Алгоритм летучей мыши был успешно применен к ряду задач, таких как задачи крупномасштабной оптимизации, глобальная инженерная оптимизация, нечеткая кластеризация, оценка параметров в динамических биологических системах, многокритериальная оптимизация, сопоставление изображений, проблемы экономической нагрузки и распределения выбросов, интеллектуальный анализ данных, проблемы планирования, нейронные сети и обнаружение фишинговых сайтов.

В ВА летучие мыши перемещаются, используя временную задержку от излучения до отражения. Частоту пульса можно просто определить в диапазоне от 0 до 1, где 0 означает отсутствие излучения и 1 означает, что излучение летучей мыши максимальное. Помимо параметров управления, таких как размер популяции и максимальное количество итераций, которые являются общими параметрами управления для всех алгоритмов, основанных на природе, ВА имеет несколько важных параметров, таких как параметр настройки частоты, аналогичный ключевой функции, используемой в параметрах PSO и HS. для автоматического увеличения области, в которой были найдены многообещающие решения, и параметра управления для автоматического переключения с разведки на эксплуатацию. Это дает преимущество ВА перед другими метаэвристическими алгоритмами [13–18].

Результаты экспериментов с исходным алгоритмом летучей мыши показали, что этот алгоритм эффективен, особенно при оптимизации задач меньшей размерности. В соответствии с этим Эйбен и Смит утверждали, что двумерные функции не подходят для решения с помощью стохастических алгоритмов, основанных на

популяциях (например, эволюционных алгоритмов и разведки роя), потому что они могут быть решены оптимально с использованием традиционных методов. С другой стороны, эти типы алгоритмов могут играть роль в качестве средств решения общих проблем, поскольку они обладают одинаковой производительностью при усреднении по всем дискретным задачам. Этот факт составляет суть так называемой теоремы о запрете бесплатного обеда (NFL) [13, 20]. Для того, чтобы эта теорема превалировала, существует почти два типичных механизма повышения производительности алгоритмов, основанных на популяциях, а именно:

- 1) самоадаптация параметров управления;
- 2) гибридизация.

Первый позволяет изменять параметры управления во время процесса поиска, чтобы лучше соответствовать компонентам исследования и эксплуатации этого процесса поиска, а второй включает в себя специфические для проблемы знания.

Экспериментальные исследования. Рассматриваемый алгоритм был реализован с использованием языка C++. По проведенным запускам алгоритма были получены следующие результаты – наиболее подходящие для поиска оптимального решения задачи принятия решения.

Использовались: алгоритм стаи летучих мышей (1), алгоритм стаи обезьян (2) [19] и стандартный алгоритм принятия решения (3).

Временные результаты представлены на рис. 3, 4.

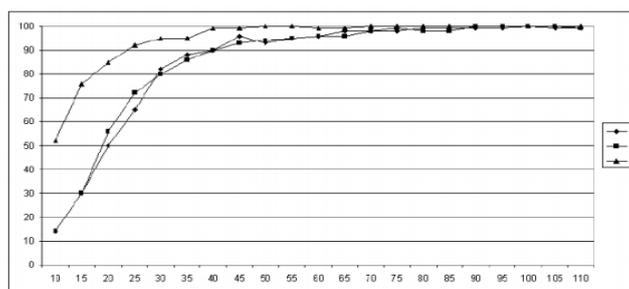


Рис. 3. Временные показатели при сравнении алгоритмов

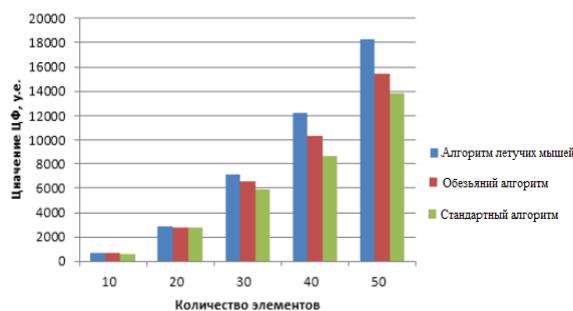


Рис. 4. Сравнение целевой функции

Закключение. В статье описаны основные понятия систем поддержки принятия решений, а также рассмотрена интеллектуальная система поддержки принятия решений. Исследования в области искусственного интеллекта, направлены на то, чтобы дать возможность системам реагировать на новизну и неопределенность более гибкими способами, начинают использоваться в интеллектуальной системе поддержки принятия решений. Самоорганизация относится к процессу, когда

свойство системы возникает в результате простого и локального взаимодействия большого числа компонентов. Биоинспирированные алгоритмы являются представительским классом алгоритмов самоорганизации. Был подробно описан и рассмотрен алгоритм летучих мышей, который основан на эхолокации летучих мышей и который оказался более мощным, чем оптимизация роя частиц и генетические алгоритмы, благодаря надежным функциям управления параметрами и возможности настройки частоты. Алгоритм стаи летучих мышей показывает хорошие результаты для многих задач оптимизации. Результаты экспериментов с исходным алгоритмом летучей мыши показали, что этот алгоритм эффективен, особенно при оптимизации задач меньшей размерности. Исходя из результатов показанных на рис. 4, быстрдействие стандартного алгоритма принятия решений значительно уступает биоинспирированным алгоритмам. Применение биоинспирированных алгоритмов в интеллектуальных системах принятия решений является перспективным направлением. Это подтверждаются экспериментальные исследования, проведенные в данной работе. По времени и качеству алгоритмы показали результаты, превосходящие показатели нынешних алгоритмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бершадская Е.Г.* Моделирование. Модели систем и методы принятия решений: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Информатика и вычислительная техника"; Минобрнауки России, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Пензенская гос. технологическая акад.". – Пенза: ПГТА, 2012. – 144 с. – (Система открытого образования). – ISBN 9785989031696.
2. *Емельянова С.В.* Обработка информации и анализ данных. Программная инженерия. Математическое моделирование. Прикладные аспекты информатики. – М.: Ленанд, 2015. – 104 с.
3. *Баушев С.В.* Достоверяющие автоматизированные информационные системы и средства. Введение в теорию и практику. – СПб.: ВHV, 2016. – 304 с.
4. *Ашим Ж.К., Кенжегулов Б.З.* Разработка алгоритмического обеспечения адаптивных систем поддержки принятия решений в ситуационных центрах (DSS) // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2020. – № 1-7(57). – С. 21-27.
5. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Гладков Л.А., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физмалит, 2009. – 384 с.
6. *Мезенцев К.Н.* Автоматизированные информационные системы. – М.: Academia, 2016. – 1280 с.
7. *Федорова Г.Н.* Информационные системы. – М.: Academia, 2016. – 158 с.
8. *Корнеев В.В., Гареев А.Ф., Васютин С.В., Райх В.В.* Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. – М.: Изд-во «Нолидж», 2000. – 352 с.
9. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Гладков Л.А., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации: учеб. пособие. – М.: Физмалит, 2009.
10. *Курейчик В.В., Запорожец Д.Ю.* Роевой алгоритм в задачах оптимизации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 28-32.
11. *Bova V.V., Lezhebokov A.A., Gladkov L.A.* Problem-oriented algorithms of solutions search based on the methods of swarm intelligence // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 27 (9). – P. 1201-1205.
12. *Zaruba D., Zaporozhets D., Kureichik V.* VLSI placement problem based on ant colony optimization algorithm // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 464. – P. 127-133.
13. *Kureichik V., Kureichik V., Bova V.* Placement of VLSI fragments based on a multilayered approach // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 464. – P. 181-190.
14. *Kureichik V.V., Zaruba D.V.* The bioinspired algorithm of electronic computing equipment schemes elements placement // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – Vol. 347. – P. 51-58.

15. Кулиев Э.В., Лежебоков А.А., Кравченко Ю.А. Роевой алгоритм поисковой оптимизации на основе моделирования поведения летучих мышей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 7 (180). – С. 53-62.
16. Kursitys I., Kravchenko Y., Kuliev E., Natskevich A. A bioinspired algorithm for improving the effectiveness of knowledge processing // Advances in Intelligent Systems and Computing (см. в книгах). – 2021. – Vol. 1197 AISC. – P. 1491-1498.
17. Kuliev E., Zaporozhets D., Kravchenko Y., Kursitys I. A combined bioinspired algorithm for big data processing // Advances in Intelligent Systems and Computing (см. в книгах). – 2021. – Vol. 1197 AISC. – P. 842-849.
18. Лежебоков А.А., Кулиев Э.В. Технологии визуализации для прикладных задач интеллектуального анализа данных // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2019. – № 4 (90). – С. 14-23.
19. Кулиев Э.В., Кравченко Ю.А., Логинов О.А., Запорожец Д.Ю. Метод интеллектуального принятия эффективных решений на основе биоинспирированного подхода // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017. – № 6-2 (80). – С. 162-169.
20. Kureichik V., Kuliev E., Zaporozhets D., Kravchenko Y. Combined algorithm for decision making // 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2017 - Proceedings. 11. 2019.

REFERENCES

1. *Bershadskaya E.G.* Modelirovanie. Modeli sistem i metody prinyatiya reshenii: ucheb. posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenii, obuchayushchikhsya po napravleniyu "Informatika i vychislitel'naya tekhnika"; Minobrnauki Rossii, Federal'noe gos. byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Penzenskaya gos. tekhnologicheskaya akad." [Modeling. Models of systems and methods of decision-making: a textbook for students of higher educational institutions studying in the direction of "Informatics and Computer Engineering"; the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education. education "Penza State Technological Academy"]. Penza: PGTA, 2012, 144 s. (Open education system). ISBN 9785989031696.
2. *Emel'yanova S.V.* Obrabotka informatsii i analiz dannykh. Programmaya inzheneriya. Matematicheskoe modelirovanie. Prikladnye aspekty informatiki [Information processing and data analysis. Software engineering. Mathematical modeling. Applied aspects of computer science]. Moscow: Lenand, 2015, 104 p.
3. *Baushev S.V.* Udostoverayushchie avtomatizirovannye informatsionnye sistemy i sredstva. Vvedenie v teoriyu i praktiku [Certifying automated information systems and tools. Introduction to theory and practice]. Saint Petersburg: BHV, 2016, 304 p.
4. *Ashim Zh.K., Kenzhegulov B.Z.* Razrabotka algoritmicheskogo obespecheniya adaptivnykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii v situatsionnykh tsentrakh (DSS) [Development of algorithmic support for adaptive decision support systems in situational centers (DSS), *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire* [Actual scientific research in the modern world], 2020, No. 1-7(57), pp. 21-27.
5. *Kureichik V.V., Kureichik V.M., Gladkov L.A., Sorokoletov P.V.* Bioinspirirovannye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmalit, 2009, 384 p.
6. *Mezentsev K.N.* Avtomatizirovannye informatsionnye sistemy [Automated information systems]. Moscow: Academia, 2016, 1280 p.
7. *Fedorova G.N.* Informatsionnye sistemy [Information systems]. Moscow: Academia, 2016, 158 p.
8. *Korneev V.V., Gareev A.F., Vasyutin S.V., Raikh V.V.* Bazy dannykh. Intellektual'naya obrabotka informatsii [Databases. Intellectual information processing]. Moscow: Izd-vo «Nolidzh», 2000, 352 p.
9. *Kureichik V.V., Kureichik V.M., Gladkov L.A., Sorokoletov P.V.* Bioinspirirovannye metody v optimizatsii: ucheb. posobie [Bioinspired methods in optimization: a textbook]. Moscow: Fizmalit, 2009.
10. *Kureichik V.V., Zaporozhets D.Yu.* Roevoi algoritm v zadachakh optimizatsii [Swarm algorithm in optimization problems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 28-32.

11. Bova V.V., Lezhebokov A.A., Gladkov L.A. Problem-oriented algorithms of solutions search based on the methods of swarm intelligence, *World Applied Sciences Journal*, 2013, Vol. 27 (9), pp. 1201-1205.
12. Zaruba D., Zaporozhets D., Kureichik V. VLSI placement problem based on ant colony optimization algorithm, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, Vol. 464, pp. 127-133.
13. Kureichik V., Kureichik V., Bova V. Placement of VLSI fragments based on a multilayered approach, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, Vol. 464, pp. 181-190.
14. Kureichik V.V., Zaruba D.V. The bioinspired algorithm of electronic computing equipment schemes elements placement, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, Vol. 347, pp. 51-58.
15. Kuliev E.V., Lezhebokov A.A., Kravchenko Yu.A. Roeffoi algoritm poiskovoi optimizatsii na osnove modelirovaniya povedeniya letuchikh myshei [Swarm search engine optimization algorithm based on bat behavior modeling], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 7 (180), pp. 53-62.
16. Kursiyts I., Kravchenko Y., Kuliev E., Natskevich A. A bioinspired algorithm for improving the effectiveness of knowledge processing, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, Vol. 1197 AISC, pp. 1491-1498.
17. Kuliev E., Zaporozhets D., Kravchenko Y., Kursiyts I. A combined bioinspired algorithm for big data processing, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, Vol. 1197 AISC, pp. 842-849.
18. Lezhebokov A.A., Kuliev E.V. Tekhnologii vizualizatsii dlya prikladnykh zadach intellektual'nogo analiza dannykh [Visualization technology for applications of data mining], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkar scientific centre of the RAS], 2019, No. 4 (90), pp. 14-23.
19. Kuliev E.V., Kravchenko Yu.A., Loginov O.A., Zaporozhets D.Yu. Metod intellektual'nogo prinyatiya effektivnykh reshenii na osnove bioinspirirovannogo podkhoda [The method of intellectual making effective decisions based on a bioinspired approach], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkar scientific centre of the RAS], 2017, No. 6-2 (80), pp. 162-169.
20. Kureichik V., Kuliev E., Zaporozhets D., Kravchenko Y. Combined algorithm for decision making, *11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2017 - Proceedings*. 11. 2019.

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

Кулиев Эльмар Валерьевич – Южный федеральный университет; e-mail: ekuliev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; доцент.

Кривенко Марина Павловна – e-mail: krivenko@sfedu.ru; студент.

Семенова Марина Максимовна – e-mail: bogomolova@sfedu.ru; студент.

Игнатьева Сабина Валерьевна – e-mail: signateva@sfedu.ru; студент.

Kuliev Elmar Valerievich – Southern Federal University; e-mail: ekuliev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; associate professor.

Krivenko Marina Pavlovna – e-mail: krivenko@sfedu.ru; student.

Semenova Marina Maximovna – e-mail: bogomolova@sfedu.ru; student.

Ignatieva Sabina Valerievna – e-mail: signateva@sfedu.ru, student.

Д.В. Заруба, Э.В. Кулиев, Д.Ю. Запорожец, М.М. Семенова

РАЗРАБОТКА БИОЭВРИСТИК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ NP-ТРУДНЫХ И NP-СЛОЖНЫХ КОМБИНАТОРНО-ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ГРАФАХ*

Статья посвящена решению новых актуальных проблем, возникших в условиях современного развития информационных и нанометровых технологий в области проектирования, а также разработке новых инновационных методов, обеспечивающих получение эффективных решений за полиномиальное время. В статье рассматривается проблема решения NP-сложных задач. Приведено описание процедуры измерения сложности задачи. Описаны особенности NP-трудных и NP-сложных комбинаторно-логических задач. Приведены основные различия между задачами, а также проблемы, с которыми приходится сталкиваться при решении такого вида задач. Представлена общая схема принятия решений, состоящая из формулировки проблемы; принятия решения; сигнала в автоматических системах и обратной связи. На втором этапе (формирование и выбор вариантов решений) решение основывается на биоинспирированном алгоритме поиска решений задачи коммивояжера. Для решения поставленной задачи был разработан модифицированный биоинспирированный алгоритм, основанный на поведении муравьиной колонии. В отличие от других методов оптимизации, метаэвристические алгоритмы могут находить глобальные оптимальные решения для задач, где существует много локальных решений из-за их случайного характера. Эти причины привели к широкому использованию таких алгоритмов при решении различных задач оптимизации. Биоинспирированные алгоритмы становятся новой революцией в области решений оптимизационных задач. Представлена постановка задачи коммивояжера, а также решение поставленной задачи на основе муравьиного алгоритма. Алгоритмы, такие как генетические алгоритмы и PSO могут быть очень полезными, но они все еще имеют некоторые недостатки в решении проблем мультимодальной оптимизации. Эти алгоритмы способны находить оптимальные решения независимо от физической природы проблемы. В рамках экспериментальных исследований был произведен анализ работы биоинспирированных алгоритмов: алгоритм стаи летучих мышей, бактериальный алгоритм и муравьиный алгоритм.

Сложность задачи; NP-задачи; NP-полные задачи на графах; биоинспирированные алгоритмы; муравьиный алгоритм; алгоритм стаи летучих мышей.

D.V. Zaruba, E.V. Kuliev, D.Yu. Zaporozhets, M.M. Semenova

DEVELOPMENT OF BIOHEURISTICS FOR CREATING AN INTELLECTUAL SUBSYSTEM FOR MAKING EFFECTIVE DECISIONS OF NP-HARD AND NP-DIFFICULT COMBINATORIAL-LOGICAL PROBLEMS ON GRAPHS

The article is devoted to the solution of new topical problems that have arisen in the conditions of the modern development of information and nanometer technologies in the field of design, as well as the development of new innovative methods that provide effective solutions in polynomial time. The article deals with the problem of solving NP-hard problems. The description of the procedure for measuring the complexity of the problem is presented, the features of NP-hard and NP-difficult combinatorial logic problems are described. The main differences between the tasks are presented, as well as the problems that one has to face when solving this type of task. The general decision-making scheme is presented, consisting of the problem formulation; decision-making; signal in automatic systems and feedback. At the second stage (formation and selection of solutions), the solution is based on a bioinspired algorithm for finding solutions to the traveling salesman problem. To solve this problem, a modified bioinspired algorithm based on the behavior

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00059.

of an ant colony was developed. Unlike other optimization methods, metaheuristic algorithms can find global optimal solutions for problems where there are many local solutions due to their random nature. These reasons have led to the widespread use of such algorithms in solving various optimization problems. Bioinspired algorithms are becoming a new revolution in the field of solving optimization problems. The statement of the traveling salesman problem is presented, as well as the solution of the problem on the basis of the ant algorithm. Algorithms such as genetic algorithms and PSO can be very useful, but they still have some disadvantages in solving multimodal optimization problems. These algorithms can find optimal solutions regardless of the physical nature of the problem. In the framework of experimental studies, the analysis of the work of bioinspired algorithms was carried out: the algorithm of a flock of bats, the bacterial algorithm and the ant algorithm.

Three-dimensional modeling; three-dimensional integration; placement; LSI; VLSI; genetic algorithm; evolution; bioinspired algorithm.

Введение. Современные алгоритмы оптимизации часто вдохновлены природой, как правило, основаны на роевом интеллекте. Данные методы привлекли многих ученых-исследователей, лиц, принимающих решения, и практикующих исследования в качестве мощных интеллектуальных вычислительных методов для решения ряда сложных реальных задач [1]. Эти алгоритмы можно классифицировать на алгоритмы детерминированной и стохастической оптимизации. Детерминированные алгоритмы всегда выдают одинаковые выходные данные для определенных входных данных. Эти алгоритмы часто используются как локальные алгоритмы поиска. В отличие от детерминированных алгоритмов, стохастические алгоритмы имеют случайные компоненты и дают разные выходные данные для конкретных входных данных. Многие метаэвристические алгоритмы реализуют некоторую форму алгоритмов стохастической оптимизации. Следующим этапом развития оптимизационных алгоритмов стали алгоритмы оптимизации роя частиц (PSO). Они были основаны на роящем поведении птиц и рыб, и эта мультиагентная система может иметь роевой или групповой интеллект [1, 2–5].

Оптимизация роя частиц (PSO) – это метод эволюционных вычислений, предложенный Кеннеди и Эберхартом в 1995 г. [1], возникшие в результате моделирования хищничества и другого поведения стай птиц и косяков рыб. Решение каждой задачи оптимизации в алгоритме похоже на «частицу» в пространстве поиска. Алгоритм роя частиц случайным образом генерирует начальный рой и придает каждой частице случайную скорость. В процессе оптимизации частицы регулируют скорость и траекторию в соответствии с опытом самих себя и товарищей, так что весь плавание содержит возможность лететь в лучшую область поиска. Благодаря небольшому количеству параметров и простоте реализации, PSO широко используется во многих областях, таких как оптимизация функций, обучение нейронных сетей, управление нечеткими системами, распознавание образов и инженерные приложения. Однако, алгоритм PSO по-прежнему имеет такие проблемы, как преждевременное попадание в локальный оптимум при решении сложных мультимодальных задач. Чтобы улучшить решающую способность оптимизации роя частиц, исследователи предложили такие методы, как корректировка инерционных параметров алгоритма роя частиц, включая динамические политики и адаптивные методы, факторы обучения и социальные факторы [2], стратегию поиска окрестностей для более эффективного изучения окрестностей текущего населения [3], принятие механизма обмена информацией для увеличения разнообразия населения и предотвращения преждевременной конвергенции алгоритмов [4], а также интеграции с другими алгоритмами, такие как комбинация алгоритма оптимизации роя частиц и иммунного алгоритма, генетического алгоритма и алгоритма искусственной пчелиной семьи [5].

В PSO частица изменяет свое положение и векторы скорости, отслеживая свое индивидуальное оптимальное решение, а также глобальное оптимальное решение роя. Такой вид обновления дает возможность глобального поиска PSO на ранней стадии эволюции и способность локальной конвергенции в конце эволюции.

Эволюция роя выглядит следующим образом:

$$v_{i,j}^{G+1} = w_{ps0} v_{i,j}^G + c_1 r_1 (p_{i,j} - x_{i,j}^G) + c_2 r_2 (p_{g,j} - x_{i,j}^G). \quad (1)$$

$$x_{i,j}^{G+1} = x_{i,j}^G + v_{i,j}^{G+1}, \quad (2)$$

где оптимальное положение, которое когда-либо находила i^{th} частица, представлено, как $P_i = [p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,D_{ps0}}]^T$. Верхний индекс «G» обозначает порождение эволюции, $0 < w_{ps0} < 1$ обозначает вес инерции, который показывает, насколько частица зависит от ее собственной скорости, и $c_1, c_2 \in [0,4]$ обозначает фактор обучения; обозначает влияние индивидуального опыта на i частицу и влияние опыта группы на i частицу. $c_1 i c_2 i r_1, r_2 \in [0,1]$ обозначает равномерно распределенные случайные числа, генерируемые в каждом поколении эволюции.

Позволять $\zeta_1 = c_1 r_1 + c_2 r_2$, а также $\zeta_2 = c_1 r_1 p_{i,j} + c_2 r_2 p_{g,j}$, то имеем

$$x_{i,j}^{G+2} + (\zeta_1 - w_{ps0} - 1) x_{i,j}^{G+1} + w_{ps0} x_{i,j}^G = \zeta_2. \quad (3)$$

Если движение частицы рассматривается как непрерывный процесс, уравнение 3 можно рассматривать как классическое неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка без члена скорости.

Все алгоритмы могут работать лишь с конечными объектами. Под конечными объектами понимаются объекты, которые можно «эффективно» закодировать словами в некотором алфавите. Эффективность кодирования означает, что по коду объекта можно вычислить все ключевые характеристики. Например, по коду графа можно вычислить, сколько в нём вершин и соединены ли две данные вершины ребром, по коду матрицы можно вычислить её размер и число в любой ячейке, и т.д. Как правило, кодирование не представляет особых проблем: с обычными строками, описывающими объекты, можно работать алгоритмически. Например, натуральные числа представляются своей двоичной (или десятичной) записью, вектора и матрицы представляются как цепочки записей чисел с разделителями, граф можно представить в виде списка рёбер или в виде матрицы смежности, и т.д. [6]. Во всех примерах считается, что все объекты уже закодированы как слова в некотором алфавите, и не будут отдельно обозначать код объекта. Разумеется, исключением будут бесконечные объекты, такие как действительные числа или геометрические фигуры.

Вычислительная модель называется эффективной (соответственно, предположительно эффективной), если она способна предоставлять решения за полиномиальное время для трудноразрешимых проблем (соответственно, NP-полных проблем) [3]. Термин «предположительно эффективный» относится к тому факту, что, по общему мнению, если P = NP, то каждая NP-полная проблема неразрешима и, следовательно, любая предположительно эффективная модель будет эффективной.

Пусть фиксированы конкретный алгоритм и конкретная мера его сложности, например время работы. Как из сложности работы на каждом входе получить сложность всего алгоритма? Во-первых, для слов одинаковой длины можно использовать два подхода: подсчитывать сложность в худшем случае, измеряемую как максимум по всем входам данной длины, и сложность в среднем, для которой эти величины так или иначе усредняются. Возможно также изучение сложности в «типичном» случае: на входах, которые обычно встречаются на практике. Но та-

кой подход трудно формализовать. Во-вторых, разных длин тоже бесконечно много, поэтому изучаются асимптотическое поведение сложной меры при длине, стремящейся к бесконечности. У такого подхода есть недостатки, ведь асимптотическое поведение может быть достигнуто при нереальных значениях длины входа. Как правило, такого всё же не случается.

Во многих случаях единицы измерения очевидны из определения: число использованных случайных битов, длина подсказки, число запросов и т. д. В других случаях выбор бинарный, поэтому никаких единиц нет. Например, квантовые вычисления, интерактивность или возможность адаптивных запросов либо доступны, либо нет. А вот к определению времени работы и памяти возможны разные подходы.

Постановка задачи. Переборные задачи, нацеленные на поиск оптимального варианта, называют задачами комбинаторной оптимизации.

Дадим формальную постановку задачи оптимизации. Дано конечное множество X и числовая функция $U(x)$ на этом множестве. Эту функцию называют целевой. Требуется найти такой $x^* \in X$, что $U(x^*)$ будет наименьшим, т.е. $U(x^*) \leq U(x)$ для всех $x \in X$. Вариант постановки задачи, когда требуется найти точки максимума целевой функции, легко сводится к поиску точек минимума функции U [1, 3, 8–10].

Цель оптимизации - найти наилучший приемлемый ответ, учитывая ограничения и потребности проблемы. Для проблемы могут быть разные ответы, которые определяются как целевая функция для их сравнения и выбора оптимального решения. Выбор этой функции зависит от характера проблемы. Например, время или стоимость поездки – одна из общих целей оптимизации транспортной сети. Однако выбор подходящей целевой функции – один из наиболее важных шагов оптимизации. Иногда при оптимизации нескольких целей одновременно такие задачи оптимизации, которые включают несколько целевых функций, называются многокритериальными задачами. Самый простой способ справиться с этими проблемами – сформировать новую целевую функцию в виде линейной композиции основных целевых функций, в котором эффект каждой функции определяется присвоенным ей весом. Каждая задача оптимизации имеет ряд независимых переменных, которые называются проектными переменными, которые представлены вектором x размером n . Целью оптимизации является определение переменных проекта таким образом, чтобы целевая функция была количественной или оптимальной. Различные задачи оптимизации делятся на две категории:

а) Задачи оптимизации без ограничений: в этих задачах цель состоит в том, чтобы сделать целевую функцию наибольшей или наименьшей без каких-либо ограничений на проектные переменные.

б) Задачи оптимизации с ограничениями: оптимизация в большинстве прикладных задач выполняется в соответствии с ограничениями, а в отношении поведения и производительности системы поведенческие ограничения и ограничения в физике и геометрии задачи называются геометрическими или боковыми ограничениями.

Уравнения, представляющие ограничения, могут быть равными или неравными, и в каждом случае метод оптимизации отличается. Однако ограничения определяют приемлемую область дизайна. Задача коммивояжера (TSP) высоко ценится из-за ее различных приложений при тестировании эффективности новых алгоритмов и преобразовании других задач в этот алгоритм. В этой, казалось бы, простой проблеме продавец переезжает со склада и должен вернуться на склад после того, как однажды встретится со всеми покупателями. Задача – максимально сократить пробег. Проблема TSP может рассматриваться с разных точек зрения. Например, эта проблема исследуется для измерения эффективности новых алгоритмов, потому что, хотя эта проблема имеет жесткую структуру в теории сложно-

сти, большинство алгоритмов легко применимы к ней, и, таким образом, эффективность алгоритмов можно исследовать по сравнению с другими алгоритмами. Кроме того, другие проблемы можно превратить в проблемы и решить. Таким образом, шаги для решения некоторых проблем могут быть сокращены с помощью этой процедуры, а с использованием высокоэффективных алгоритмов для решения проблемы TSP основная проблема может быть решена более качественно.

Задача коммивояжёра может быть поставлена как задача оптимизации. Задача коммивояжера (TSP), типичная трудная задача недетерминированного полинома (NP), использовалась во многих инженерных приложениях. Генетические алгоритмы полезны для NP-сложных задач, особенно для задачи коммивояжера.

В качестве множества X достаточно взять S_n (множество перестановок n -элементного множества), а в качестве целевой функции $U(x)$ – длину замкнутой ломаной, проходящей через n заданных точек в порядке, заданной перестановкой $x \in X$.

Для решения задачи поиска точки минимума функции придумано множество методов. Например, для дифференцируемых функций U , определённых на числовом множестве X , как известно, точки минимума (если они есть) следует искать среди критических точек U , то есть таких x , что $U'(x)=0$.

Для решения поставленной задачи был разработан биоинспирированный алгоритм, основанный на поведении муравьиной колонии.

Классом NP называется множество языков L , для которых существует функция $V(x, s)$ с булевыми значениями, вычисляемая за полиномиальное время от длины первого аргумента, такая что:

- ◆ Если $x \in L$, то $\exists s V(x, s) = 1$;
- ◆ Если $x \notin L$, то $\forall s V(x, s) = 0$.

Второй вход s часто называют сертификатом, а функцию V – верификатором. Таким образом, сертификат удостоверяет, что $x \in L$, а верификатор проверяет правильность сертификата. Для слов из языка подходящий сертификат должен существовать, а для слов не из языка все сертификаты должны отвергаться. Иначе говоря, класс NP – это класс языков, принадлежность к которым можно быстро доказать, а P – класс языков, принадлежность к которым можно быстро выяснить.

Примерами языков из NP служит такая задача:

SAT = $\{\phi \mid \phi \text{ – выполнимая булева формула}\}$. (Выполнимость означает, что формула равна 1 на некотором входе). В данном случае сертификатом будет выполняющий набор, а верификатор проверит, что значение формулы на этом наборе действительно равно 1.

NP-полные задачи на графах. Задачи коммивояжера, хорошо известна как NP-полная задача, вычислительная сложность которой возрастает экспоненциально за счет увеличения количества городов. Небольшой модификацией можно получить NP-полноту и задач о гамильтоновом цикле в ориентированном и неориентированном варианте. Ещё одна известная задача о путях в графе – задача коммивояжера (traveling salesman problem). В этом случае дан не просто граф, а граф с весами, т.е. неотрицательными числами на каждом ребре. Путём коммивояжера называется путь минимального суммарного веса, проходящий хотя бы один раз через каждую вершину. Вершины интерпретируются как города, рёбра – как дороги между городами, веса – как длины дорог. Коммивояжёр должен посетить все города, проехав как можно меньше [11].

При формулировке задачи коммивояжера, в некоторых источниках, требуют, чтобы граф обязательно был полным. Ясно, что это не влияет на суть задачи: все отсутствующие рёбра можно провести, но сопоставить им очень большие веса, так чтобы оптимальный путь через них заведомо не проходил. В рассуждении об NP-полноте можно взять все рёбра, отсутствующие в исходном графе, с весом

больше 1: на вывод это не повлияет. При этом веса рёбер образуют метрику, т.е. для них выполняется неравенство треугольника, соответственно, метрическая задача коммивояжёра также будет NP-полной. Можно показать, что даже евклидова задача коммивояжёра, в которой все вершины лежат в евклидовом пространстве, а расстояния получаются при помощи обычной евклидовой метрики, является NP-полной. Конструкция работает уже в двумерном пространстве, т.е. на декартовой плоскости.

Для решения задач подобного типа были созданы системы поддержки принятия решений (СППР), которые являются системами обработки информации для интерактивной поддержки работы в процессе принятия решений.

Решение задачи коммивояжёра биоинспирированным подходом. Поскольку решение задачи коммивояжёра является NP-полной проблемой, большинство эвристических алгоритмов не обладают высоким качеством для решения задачи коммивояжёра, поэтому многие исследования были направлены на метаэвристику, которая дает хороший тур, если не оптимальный. Поскольку метаэвристические подходы очень эффективны для ухода от локального оптимума, они являются одним из лучших алгоритмов для решения задач комбинаторной оптимизации. Эвристические и метаэвристические алгоритмы могут получить более качественное решение по сравнению с точным алгоритмом. В последнее десятилетие решение задачи коммивояжёра хорошо изучена многими биоинспирированными подходами, такими как генетический алгоритм, оптимизация колоний муравьев, оптимизация роя частиц, поиск с кукушкой и алгоритм светлячков.

В отличие от других методов оптимизации, метаэвристические алгоритмы могут находить глобальные оптимальные решения для задач, где существует много локальных решений из-за их случайного характера. Эти причины привели к широкому использованию таких алгоритмов при решении различных задач оптимизации.

В статье разработан биоинспирированный подход к решению комбинаторно-логических задач на основе метода роевого интеллекта, включающий в себя поведения муравьиной колонии.

Муравьиный алгоритм на основе популяции основан на поведении настоящих муравьев в поисках пищи. Когда муравей ищет пищу в своем гнезде, он формирует маршрут, основанный на количестве феромона на каждом краю, через который он прошел. Каждый муравей будет откладывать феромон на каждом пройденном краю во время поиска, так что уровень феромонов на этих посещенных краях будет увеличен, а уровень феромонов на не посещенных краях будет снижен. Другие муравьи будут искать свои собственные маршруты в соответствии со своим опытом, основанным на уровнях феромонов в краях, которые они выбирают для путешествия. Чем выше уровень феромона на краю, тем более он привлекателен для муравья. Чем больше муравьев проходило по краю, тем выше уровень феромонов на этом краю. Количество осажденных феромонов зависит от качества раствора. В алгоритме оптимизации муравьиной колонии количество отложенного феромона косвенно пропорционально длине тура. Чем меньше длина тура, тем больше феромона, заложенного на пути. Феромон также распадается по пути со временем. Это позволяет менее пройденным путям иметь более низкий след феромонов, поскольку феромоны со временем испаряются. Процедура такого поискового поведения может быть применена для решения задачи коммивояжёра.

Алгоритм муравьиной колонии – это алгоритм случайного поиска. В этом алгоритме решение проблемы абстрагируется в последовательности перехода состояний из начального состояния в целевое состояние в дискретном пространстве состояний. Оптимальное решение задачи соответствует удовлетворению критерия

оптимальной оценки последовательности перехода состояний. Значение интенсивности феромона на пути является основой для перехода муравьев в состояние. После того, как каждый муравей в группе завершает поиск, интенсивность феромона на пути обновляется в соответствии с их соответствующими путями, чтобы завершить групповой поиск [20]. Процесс поиска колонии муравьев продолжает цикл и, наконец, максимизирует силу пути при оптимальной последовательности перемещения, чтобы получить оптимальное решение посредством обмена информацией и взаимного сотрудничества между отдельными муравьями.

Математическая модель алгоритма муравьиной колонии подробно описан следующим образом: Во-первых, а муравьи случайным образом размещены на b городов, каждый путь между городами имеет феромон инициализации, и каждый муравей имеет государственную последовательность записи таблицы. Он используется для записи городов, по которым ходили муравьи. Затем каждый муравей совершает переход между состояниями случайным образом в соответствии с вероятностью перехода состояния, и каждому переходу разрешен переход только из текущего состояния в соседнее состояние, так что муравей k переходит из состояния. Вероятность перехода состояния в соседнее состояние определяется как

$$\zeta_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\delta_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\epsilon_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{\vartheta_i \in Q_u} [\delta_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\epsilon_{ij}(t)]^\beta}, & \vartheta_i \in Q_u \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Со временем информация, оставленная на пути, постепенно исчезнет. Мы используем параметр, чтобы указать степень улетучивания информации. Через n раз муравей завершает цикл. В настоящее время объем информации по каждому пути равен

$$\delta_{ij}(t+n) = \rho \cdot \delta_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \delta_{ij}^k. \quad (5)$$

Среди них обозначает город, который муравью k разрешено посетить на следующем шаге. Поскольку система муравьиной колонии имеет функцию памяти, она может записывать городские узлы, по которым муравей k ходил раньше, и набор будет динамически корректироваться с развитием муравьев. представляет интенсивность феромона на пути от города i к городу j , δ – коэффициент расстояния от города i до города j , α – важность феромона на пути, β – важность эвристического фактора, а также α и β больше нуля.

В общем, алгоритмы оптимизации колоний муравьев (АСО) используют искусственных агентов конечного размера с определенными характеристиками, которые коллективно ищут качественные решения рассматриваемой проблемы. Начиная с начального состояния, выбранного в соответствии с некоторыми зависящими от случая критериями, каждый муравей строит решение, подобное хромосоме в генетическом алгоритме. Создавая собственное решение, каждый муравей собирает информацию о своих действиях и использует эту информацию, чтобы изменить представление о проблеме, которое видят другие муравьи [15–20]. Во внутренних состояниях муравья хранится информация о прошлом поведении муравья, которую можно использовать для вычисления качества / ценности сгенерированного решения.

Также муравьи используют политику вероятностных решений, чтобы направить свои поиски в наиболее интересные области поискового пространства. Уровень стохастичности политики и сила обновлений в феромонном следе определяют баланс между исследованием новых точек в пространстве состояний и использованием накопленных знаний

Экспериментальные исследования. В рамках экспериментальных исследований был произведен анализ работы алгоритмов стаи летучих мышей, бактериальный алгоритм и муравьиный алгоритм, используемые при решении NP-сложных задач на графах. В качестве задачи была выбрана классическая оптимизационная задача – Задача Коммивояжера. В качестве тестовых графов была сгенерирована серия графов от 30 до 120 вершин с шагом 10 с известным глобальным значением ЦФ. В качестве ЦФ рассматривается длина гамильтонова цикла для графа. Цель оптимизации является минимизация значения ЦФ. В ходе экспериментальных исследований были исследованы такие характеристики алгоритмов, как скорость сходимости алгоритма в зависимости от количества вершин в графе, а также оптимальность полученных решений в зависимости от количества вершин в графе. Под оптимальностью будем понимать отношение полученного значения ЦФ к глобальному значению ЦФ.

Был произведен запуск программного продукта с количеством итераций – 600.

На рис. 1 представлен график зависимости номера итерации, на которой алгоритм сошелся, т. е. после данной итерации значение ЦФ более не изменялось, от размера входных данных.

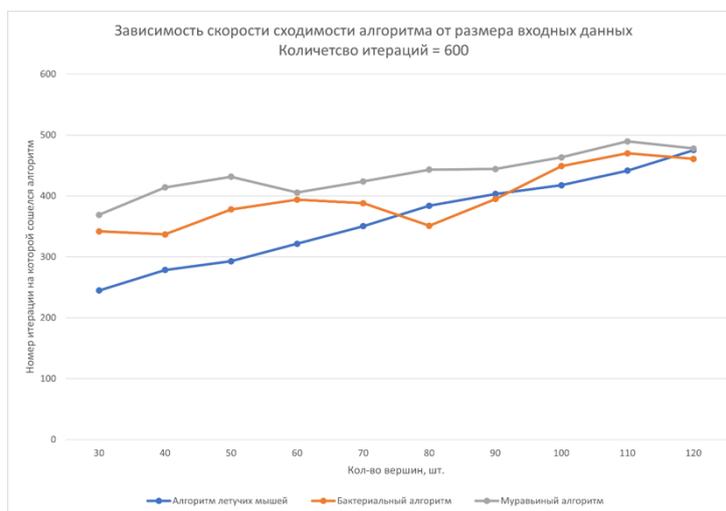


Рис. 1. Зависимость номера итерации от размера входных данных

Как видно из графика, различие в скорости сходимости алгоритмов становится не существенным для графов с количеством вершин более 90. Для графов с количеством вершин менее 90 в среднем наиболее быстрым в данном исследовании является алгоритм летучих мышей. Тем не менее качество получаемых решений, полученных с помощью алгоритма летучих мышей, резко ухудшается, с ростом количества вершин в графе. На рис. 2 представлена зависимость качества получаемых решений от количества вершин в графе. Из рисунка видно, что качество решений, полученных с помощью муравьиного алгоритма достаточно высокого и менее чувствительно к росту количества входных данных. Это объясняется хорошим балансом между диверсификацией поиска на начальных этапах и интенсификацией на заключительных этапах выполнения алгоритма.

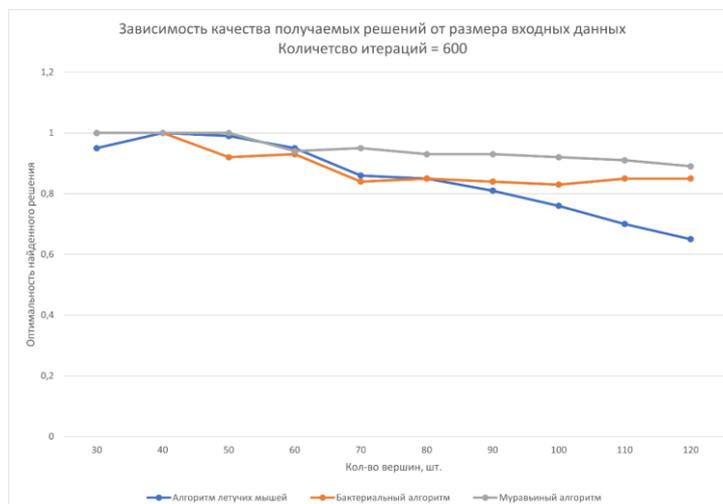


Рис. 2. Зависимость качества полученных решений от размера входных данных

Подводя итог, можно сказать, что биоинспирированные алгоритмы являются одними из самых мощных алгоритмов для оптимизации, которые будут иметь большое влияние на будущее поколение вычислений. Особое место они уже нашли при решении NP-полных и NP-сложных задач.

Заключение. В статье разработана биоэвристика для создания интеллектуальной подсистемы принятия эффективных решений NP-трудных и NP-сложных комбинаторно-логических задач на графах. В процессе выполнения был разработан модифицированный биоинспирированный алгоритм для решения NP- трудных и NP-сложных комбинаторно-логических задач на графах.

Приведено описание процедуры измерения сложности задачи. Описаны особенности NP- трудных и NP-сложных комбинаторно-логических задач. Приведены основные различия между задачами, а также проблемы, с которыми приходится сталкиваться при решении такого вида задач. Представлена общая схема принятия решений, состоящая из формулировки проблемы; принятие решения; сигнала в автоматических системах и обратной связи. На втором этапе (формирование и выбор вариантов решений) решение основывается на биоинспирированном алгоритме поиска решений задачи коммивояжера.

В статье разработан биоинспирированный подход к решению комбинаторно-логических задач на основе метода роевого интеллекта, включающий в себя поведения муравьиной колонии.

Эффективность биоинспирированных методов и алгоритмов определяется временем их работы, которое растет при росте объемов обрабатываемых данных, также растет при росте сложности решаемых для этих данных задач, но уменьшается при использовании параллельных или распределенных вычислительных систем.

Получены и исследованы теоретические оценки трудоемкости и эффективности разработанного биоинспирированного алгоритма для решения комбинаторно-логических задач на графах. Разработанный модифицированный биоинспирированный алгоритм точнее показывает значение целевой функции при большем количестве элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 364 с.
2. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 474 с.
3. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И.* Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
4. *Штовба Д.С.* Муравьиные алгоритмы: теория и применение // Математика в приложениях. – 2004. – С. 70-75.
5. *Борознов В.О.* Исследование решения задачи коммивояжера // Вестник Астраханского государственного технического университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – С. 147-151.
6. *Курейчик В.М., Курейчик В.В.* Генетический алгоритм разбиения графа // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 1999. – № 4. – С. 79-87.
7. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.К.* Поисковая адаптация: теория и практика. – М.: Физматлит, 2006. – 272 с. – ISBN 5-9221-0749-6.
8. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Гладков Л.А., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009. – 384 с.
9. *Курейчик В.В., Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю.* Биоинспирированный алгоритм компоновки блоков ЭВА на основе модифицированной раскраски графа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 4 (165). – С. 6-14.
10. *Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл., Бова В.В.* Биоинспирированный поиск в задачах конструкторского проектирования и оптимизации // Информационные технологии в науке, образовании и управлении / под ред. проф. Е. Л. Глориозова. – 2015. – С. 427-432.
11. *Курейчик В.В.* Гибридный подход к решению комбинаторно-логических задач на графах // Тр. Международного научно-технического конгресса "Интеллектуальные системы и информационные технологии - 2019" ("ИС & ИТ-2019", "IS&IT19"). Научное издание: в 2-х т. – 2019. – С. 36-41.
12. *Bova V.V., Lezhebokov A.A., Gladkov L.A.* Problem-oriented algorithms of solutions search based on the methods of swarm intelligence // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 27 (9). – P. 1201-1205.
13. *Kureichik V., Kureichik V., Bova V.* Placement of VLSI fragments based on a multilayered approach // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 464. – P. 181-190.
14. *Kureichik V.V., Zaruba D.V.* The bioinspired algorithm of electronic computing equipment schemes elements placement // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – Vol. 347. – P. 51-58.
15. *Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Гордиенко В.Н.* Модифицированный генетический алгоритм решения задачи компоновки блоков ЭВА // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2015. – № 4 (24). – С. 18-27.
16. *Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл.* Биоинспирированный алгоритм разбиения схем при проектировании СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 23-29.
17. *Курейчик В.В., Заруба Д.В.* Двухуровневый алгоритм разбиения графа на части // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 6-15.
18. *Курейчик В.М., Логунова Ю.А.* Об алгоритмах решения задачи коммивояжера в сети интернет // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 68. – С. 37-43.
19. *Кулиев Э.В., Кравченко Ю.А., Логинов О.А., Запорожец Д.Ю.* Метод интеллектуального принятия эффективных решений на основе биоинспирированного подхода // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017. – № 6-2 (80). – С. 162-169.
20. *Zaporozhets D., Zaruba D., Kuliev E.* Ant algorithm for determining of critical CONNECTIONS IN VLSI // Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTTS 2018. Electronic publication. – 2018. – P. 8524709.

REFERENCES

1. *Norenkov I.P.* Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya [Fundamentals of computer-aided design], Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2010, 364 p.
2. *Karpenko A.P.* Sovremennyye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: a textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014, 474 p.
3. *Kureichik V.V., Kureichik V.M., Rodzin S.I.* Teoriya evolyutsionnykh vychislenii [The theory of evolutionary calculations]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 260 p.
4. *Shtovba D.S.* Murav'inye algoritmy: teoriya i primeneniye [Ant algorithms: theory and application], *Matematika v prilozheniyakh* [Mathematics in applications], 2004, pp. 70-75.
5. *Boroznov V.O.* Issledovanie resheniya zadachi kommivoyazhera [Research of the solution of the traveling salesman problem], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Management, computer engineering and computer science], 2009, pp. 147-151.
6. *Kureichik V.M., Kureichik V.V.* Geneticheskii algoritm razbieniya grafa [Genetic algorithm of graph partitioning], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Theory and control systems], 1999, No. 4, pp. 79-87.
7. *Kureichik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.K.* Poiskovaya adaptatsiya: teoriya i praktika [Search adaptation: theory and practice]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 272 p. ISBN 5-9221-0749-6.
8. *Kureichik V.V., Kureichik V.M., Gladkov L.A., Sorokoletov P.V.* Bioinspirirovannyye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 384 p.
9. *Kureichik V.V., Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu.* Bioinspirirovannyy algoritm komponovki blokov EVA na osnove modifitsirovannoi raskraski grafa [Bioinspired algorithm for the layout of EVA blocks based on a modified graph coloring], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4 (165), pp. 6-14.
10. *Kureichik V.V., Kureichik V.V., Bova V.V.* Bioinspirirovannyy poisk v zadachakh konstruktorskogo proektirovaniya i optimizatsii [Bioinspired search in the problems of design design and optimization], *Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [Information technologies in science, education and management], ed. by prof. E. L. Glorizova, 2015, pp. 427-432.
11. *Kureichik V.V.* Gibridnyi podkhod k resheniyu kombinatorno-logicheskikh zadach na grafakh [A hybrid approach to solving combinatorial-logical problems on graphs], *Tr. Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa "Intellektual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii - 2019" ("IS & IT-2019", "IS&IT19")*. Nauchnoe izdanie: v 2-kh t. [Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies-2019" ("IS & IT-2019", "IS&IT19")]. Scientific publication: in 2 vol., 2019, pp. 36-41.
12. *Bova V.V., Lezhebokov A.A., Gladkov L.A.* Problem-oriented algorithms of solutions search based on the methods of swarm intelligence, *World Applied Sciences Journal*, 2013, Vol. 27 (9), pp. 1201-1205.
13. *Kureichik V., Kureichik V., Bova V.* Placement of VLSI fragments based on a multilayered approach, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, Vol. 464, pp. 181-190.
14. *Kureichik V.V., Zaruba D.V.* The bioinspired algorithm of electronic computing equipment schemes elements placement, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, Vol. 347, pp. 51-58.
15. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gordienko V.N.* Modifitsirovannyy geneticheskii algoritm resheniya zadachi komponovki blokov EVA [Modified genetic algorithm for solving the problem of EVA block layout], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, computer engineering and engineering education], 2015, No. 4 (24), pp. 18-27.
16. *Kureichik V.V., Kureichik V.V.* Bioinspirirovannyy algoritm razbieniya skhem pri proektirovanii SBIS [Bioinspired algorithm for splitting circuits in VLSI design], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 23-29.
17. *Kureichik V.V., Zaruba D.V.* Dvukhurovnevyy algoritm razbieniya grafa na chasti [A two-level algorithm for splitting a graph into parts], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2 (204), pp. 6-15.
18. *Kureichik V.M., Logunova Yu.A.* Ob algoritmakh resheniya zadachi kommivoyazhera v seti internet [About algorithms for solving the traveling salesman problem on the Internet], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2019, No. 68, pp. 37-43.

19. Kuliev E.V., Kravchenko Yu.A., Loginov O.A., Zaporozhets D.Yu. Metod intellektual'nogo prinyatiya effektivnykh reshenii na osnove bioinspirirovannogo podkhoda [The method of intellectual making effective decisions based on a bioinspired approach], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, No. 6-2 (80), pp. 162-169.
20. Zaporozhets D., Zaruba D., Kuliev E. Ant algorithm for determining of critical CONNECTIONS IN VLSI, *Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2018. Electronic publication*, 2018, pp. 8524709.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Заруба Дарья Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: dzaruba@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; ассистент.

Кулиев Эльмар Валерьевич – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; доцент.

Запорожец Дмитрий Юрьевич – e-mail: zaporozhets@sfedu.ru; доцент.

Семенова Марина Максимовна – e-mail: bogomolova@sfedu.ru; студент.

Zaruba Darya Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: dzaruba@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; assistant.

Kuliev Elmar Valerievich – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; associate professor.

Zaporozhets Dmitry Yurievich – e-mail: zaporozhets@sfedu.ru; associate professor.

Semenova Marina Maximovna – e-mail: bogomolova@sfedu.ru; student.

УДК 004.891.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-128-144

А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых

АЛГОРИТМ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРАВЛЕНИЙ В НЕСТОХАСТИЧЕСКИХ ПРИЧИННЫХ МОДЕЛЯХ В ОТСУТСТВИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ*

Рассматривается проблема репликации процесса принятия человеком управленческих решений в условиях неопределенности и неполноты исходных данных. Лицо, принимающее решение, опирается на свою систему взглядов, в которую входит общее видение системы, относительно которой принимается решение. Система представлена в виде причинной модели, созданной на основе ментальных представлений человека. Эти модели представляют собой направленные графы, на дугах которых причинность выражена в виде меток, которые имеют знак, определяющий направление изменений состояния системы. Вершины этого направленного графа представляют собой концепты высокого уровня абстракции. Такой граф моделирует функционирование реальной системы. Таким образом, мы исследуем проблему предсказания и управления действиями человека на основе нестохастических причинных моделей в отсутствие наблюдаемых переменных для использования в системах поддержки принятия решений и экспертных системах. Принятие решений рассматривается с точки зрения выбора объектов приложения управленческих воздействий – факторов модели. В настоящем исследовании мы показываем, что применение предложенного алгоритма может облегчить принятие решений относительно выбора управляющих воздействий, которые поддерживают достижение тактических и стратегических целей лица, принимающего решения. Следует отметить, что алгоритм реализует автоматизированный подбор параметра регуляризации, что делает доступным разработку и применение пред-

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда фундаментальных исследований № 19-01-00109.

ложенного алгоритма для пользователей, не имеющих достаточной математической подготовки. Сходимость последовательности множителя Лагранжа алгоритма эффективных управлений доказана. Доказана теорема о резонансе в нестохастической причинной модели, представленной направленным графом, который определяется областью допустимых значений коэффициента демпфирования в модели управления. Ожидается, что внедрение этого инструмента в системы поддержки принятия решений повысит надежность решений, принимаемых в отношении работы системы в целом. Выбор управляющих воздействий с использованием предложенного алгоритма имеет высокую эффективность и производительность. Таким образом, результаты, представленные в исследовании, могут быть полезны для разработки приложений в интеллектуальных системах.

Эффективное управление; причинные модели; принятие управленческих решений; оптимизационные методы; направленный взвешенный знаковый граф.

A.N. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh

ALGORITHM OF EFFECTIVE CONTROLS FOR NONSTOCHASTIC CAUSAL MODELS IN THE ABSENCE OF OBSERVABLE VARIABLES FOR SYSTEMS OF DECISION MAKING CONTROL

The paper deals with the problem of reproducing the decision-making process by a person under conditions of uncertainty and incompleteness of the initial data. The decision-maker relies on his belief system, which includes a shared vision of the system in relation to which the decision is being made. The system is presented in the form of a causal model created on the basis of human mental representations. These models are directed graphs, on the arcs of which the causal relationship is expressed in the form of labels with a sign that determines the direction of change in the state of the system. The vertices of this directed graph are high-level abstraction concepts. This graph simulates the functioning of a real system. Thus, we investigate the problem of predicting and controlling human actions based on non-stochastic causal models in the absence of observable variables for use in decision support systems and expert systems. Decision-making is considered from the point of view of the choice of objects of application of managerial influences - the factors of the model. In this study, we show that the application of the proposed algorithm can facilitate decision-making regarding the choice of control actions that support the achievement of the tactical and strategic goals of the decision maker. It should be noted that the algorithm implements an automatic selection of the regularization parameter, which makes the development and application of the proposed algorithm available to users who do not have sufficient mathematical training. The convergence of the sequence of Lagrange multipliers of an effective control algorithm is proved. The theorem on resonance in a non-stochastic causal model, represented by a directed graph, which is determined by the range of admissible values of the damping coefficient in the control model, is proved. It is expected that the introduction of this tool into decision support systems will increase the reliability of decisions regarding the operation of the system as a whole. The choice of control actions using the proposed algorithm has high efficiency and productivity. Thus, the results presented in the study can be useful for developing applications in intelligent systems.

Effective control; causal models; decision-making; optimization methods; directed weighted signed graph.

1. Введение. Данное исследование адресуется к проблеме репликации процесса принятия управленческих решений человеком как части системы искусственного интеллекта, которая стремится воспроизвести этот процесс. Роботизация этого процесса в социальных, политических и социально-экономических системах является ключевой проблемой управления в организациях. В отличие от роботизированной автоматизации разных рабочих процессов в управлении организацией (robotic process automation, RPA), которые, по сути, представляют собой сбор, сортировку и организацию соответствующих данных для повторяющихся процедур, и которые можно достаточно точно описать, процесс принятия управленческих решений отличается высокой степенью неопределенности и никогда не повторяется в точности.

Лицо, принимающее решение (ЛПР), опирается на свою систему взглядов, в которую входит видение системы, относительно которой принимается управленческое решение. Система может быть представлена в виде причинной модели, создаваемой на основе человеческих ментальных репрезентаций. Эти модели представляют собой направленный граф, на дугах которого причинность выражена в виде некоторых меток, которые имеют знак, определяющий направление изменений состояния следствий. Вершины этого направленного графа представляют собой комплексные концепты высокого уровня абстракции в моделируемой системе. Такой граф моделирует функционирование реальной системы.

Мы исследуем проблему предсказания и управления действиями ЛПР на основе нестохастических причинных моделей (СМ) в отсутствии наблюдаемых переменных в системах поддержки принятия управленческих решений и экспертных системах. Принятие решений рассматривается с точки зрения выбора объектов приложения управленческих воздействий – факторов модели. По сути, требуется получить ответ на вопрос «Что делать?».

В настоящее время проблема максимизации влияния получила широко изучается в последнее десятилетие [1] и находит приложения в разных областях, таких как вирусный маркетинг [2], распространение информации [3], рекомендации специалистов [4], системы сообществ [5], управление взаимоотношениями с клиентами в социальных сетях [6], теория перколяции [7], теория кооперативных игр [8], стратегии поиска [9], коллективное принятие решений [9], центральность сетей [10] и др.

Однако в этих работах решается задача выбора нескольких узлов (факторов, пользователей) с целью наиболее широкого распространения влияния, т.е. максимизации количества узлов, получивших отклик системы. При этом не ставится никакой цели по мощности этого влияния на конкретные узлы и систему в целом. Поэтому выбор наиболее оптимального воздействия требует полного перебора всех вариантов, что является очень трудоемкой и затратной задачей. При принятии же управленческого решения ставится совершенно иная задача – выбор узлов (оптимальных), воздействие на которые приведет к максимальному отклику конкретных целевых узлов и системы в целом.

В данном исследовании представляется алгоритм эффективных управлений на основе передачи причинных влияний с целью выбора оптимальных управляющих воздействий для максимального отклика целевых факторов модели. Поскольку причинные модели социальных, политических и социально-экономических систем содержат сложные комплексные факторы, которые не могут (в силу своей природы) иметь непосредственно наблюдаемые переменные, то уравнение управления содержит как управляющее воздействие, так и результирующий отклик в виде неизвестных переменных. Проблема поиска оптимального управления на графах решается как задача оптимизации максимизации целевой функции влияния, которая ранжирует факторы модели на основе их вклада в вектор направленности развития системы и предоставляет инструмент для определения наиболее продуктивных факторов СМ.

2. Обзор публикаций, связанных с темой исследования. Проблема максимизации влияния была впервые определена как проблема дискретной оптимизации в известной работе 2003 года [11]. С тех пор было разработано множество предложений, чтобы попытаться решить проблему как можно лучше с точки зрения точности, временной сложности, пространственной сложности или масштабируемости [12].

Существуют две хорошо известные модели для представления феномена распространения влияния через социальные сети: модель линейного порога (LT-модель), основанная на некоторых идеях коллективного поведения, и модель независимого

каскада. (IC-модель), основанная на маркетинговых идеях [11]. Независимо от рассматриваемой модели распространения влияния, проблема максимизации влияния остается следующей: для данного графа влияния найти минимальное начальное число узлов (начальная активация), которые максимизируют распространение влияния по сети. Проблема решалась со следующими целями: максимизация распространения влияния (по охвату узлов) с учетом размера их начального числа [11], либо, минимизация начального набора узлов с фиксированным количеством узлов отклика [13].

Выбор динамической модели является определяющим для выявления влиятельных узлов. В целом, используются два типа моделей динамики: модели возбудимых сред [11, 14, 15] и модели с внешними воздействиями [16, 17]. Главным различием в этих подходах является наличие переменной воздействия (управления) в уравнении динамики. В модели возбудимых сред отсутствует переменная управления, поэтому определить ее математически в результате решения оптимизационной задачи не представляется возможным. Основным ограничивающим требованием в моделях управления [16, 17] является требование точного уравнения динамики, описывающего поведение системы. При принятии управленческих решений требуется воздействие не на все, а на наиболее влияющие вершины, однако применяемая методология не предполагает введение ограничений к состоянию и управлению. Кроме того, методы выявления влиятельных узлов в сетях, в основном, базируются на топологических характеристиках сети, а также случайном характере и информационной природе типа распространения влияния по сети [18]. Следствием этого является то, что матрица смежности графа сети является стохастической матрицей [19, 20]. Исследуемые причинные модели, представленные направленными графами, имеют матрицу нестохастической природы. Поэтому вышеперечисленные методы, используемые для сетей, не могут быть применены для рассматриваемых моделей и требуется разработка новых подходов и алгоритмов.

3. Описание метода. Мы рассматриваем нестохастические каузальные модели, которые имеют (1) качественную и нечисловую природу узлов и связей; (2) ненаблюдаемые переменные; (3) плохоформализуемые узлы; and (4) отсутствие и невозможность получения данных временных рядов. Эти характеристики требуют рассматривать задачу управления в параметрах воспроизводимого тренда для состояний узлов модели, в отличие от традиционных подходов, когда прогнозируются физические (наблюдаемые и измеряемые) показатели состояний концептов модели. Мы исследуем процесс принятия решений с позиций выбора управляющих воздействий лицом, принимающим решения. Далее рассматривается следующая модель эффективного управления.

3.1. Постановка задачи эффективного управления в нестохастических причинных моделях. Рассмотрим граф $G = \langle W, E \rangle$, представляющий качественную СМ, где $W = \{W_1, W_2, \dots, W_N\}$ – набор вершин; $E \in W \times W$ – набор дуг. Граф определяется матрицей смежности A^T , где $a_{i,j}; 1 \leq i, j \leq n$ – весовой элемент матрицы $A = (a_{i,j})_{n \times n}$. Рассмотрим следующую модель управления:

$$\xi_i^{s+1} = \xi_i^s + u_i^s + \delta \sum_{j=1}^n a_{i,j} (\xi_j^s - \xi_j^{s-1}), \quad 1 \leq i \leq n, \quad s \geq 1, \quad (1)$$

где n – количество вершин сети; δ – коэффициент демпфирования; ξ_i^s – состояние i -й вершины в момент времени t_s ; u_i^s – внешнее управляющее воздействие на вершину i в интервале времени $t_s \leq t < t_{s+1}$; $a_{i,j}$ – вес на дуге. Значение веса вы-

ражает силу причинности, с которой управляющее воздействие распространяется от вершины j к вершине i . Управляющее воздействие $u_i^s = u_i$ ($1 \leq i \leq n$) не зависит от s . Тогда вектор $\mathbf{x} = (x_i)_n$ представляет собой воспроизводимый тренд, компоненты которого также не зависят от s :

$$x_i = \xi_i^{s+1} - \xi_i^s = \xi_i^s - \xi_i^{s-1}, \quad 1 \leq i \leq n. \quad (2)$$

Исходя из изложенного выше, модель управления $\mathcal{H} := (\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, \delta)$ задается следующей системой линейных уравнений (СЛАУ):

$$(\mathbf{I} - \delta \mathbf{A}) \mathbf{x} = \mathbf{u}, \quad (3)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица; $\mathbf{u} = (u_i)_n$ – вектор воздействия; $\mathbf{x} = (x_i)_n$ – вектор отклика. С учетом модели управления (3), для получения пары векторов \mathbf{x} и \mathbf{u} , выражающих эффективное управление, необходимо оптимизировать следующую задачу нелинейной оптимизации:

$$\frac{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}{\mathbf{u}^T \mathbf{u}} = \frac{\|\mathbf{x}\|^2}{\|\mathbf{u}\|^2} = \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}{\mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x}} \rightarrow \max, \quad (4)$$

где $\mathbf{B} = (\mathbf{I} - \delta \mathbf{A})^T (\mathbf{I} - \delta \mathbf{A})$ – матрица квадратичной формы.

Обозначим $N^{(0)}$, $N^{(+)}$, $N^{(-)}$ как множество индексов вершин с ограничениями на управляющие воздействия \mathbf{u} , где $N^{(0)} = \{i \mid u_i = 0; 1 \leq i \leq n\}$ – множество индексов вершин, на которых управляющее воздействие не может быть оказано (по природе этой вершины); $N^{(+)} = \{j \mid u_j \geq 0; 1 \leq j \leq n\}$ и $N^{(-)} = \{k \mid u_k \leq 0; 1 \leq k \leq n\}$ – множество индексов вершин с ограничениями на направление управляющих воздействий (положительное или отрицательное, соответственно). Матрица ограничений $\mathbf{N} = (\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \dots \quad \mathbf{n}_L)$ имеет $L = |N^{(0)}| + |N^{(+)}| + |N^{(-)}|$ столбцов и n строк, где j -й столбец матрицы \mathbf{N} определяется как $\mathbf{n}_j = \pm \delta_j^i$, где $\delta_j^i = [i = j]$ – дельта Кронекера, равная $n_j^i = \delta_j^i$ при $j \in N^{(0)}$, $j \in N^{(+)}$, и $n_j^i = -\delta_j^i$ при $j \in N^{(-)}$. Учитывая (3), запишем ограничения в матричной нотации $\mathbf{C} = (\mathbf{N}^T \mathbf{N})^{-1} \mathbf{N}^T (\mathbf{I} - \delta \mathbf{A})$.

Задача (4) сводится к задаче квадратичного программирования (5) относительно вектора \mathbf{x} (или \mathbf{u}) при линейных ограничениях $\mathbf{C} \mathbf{x} \geq \mathbf{0}$ и условии нелинейной нормировки $\mathbf{x}^T \mathbf{x} = 1$:

$$\mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} \rightarrow \min, \quad \mathbf{x}^T \mathbf{x} = 1, \quad \mathbf{C} \mathbf{x} \geq \mathbf{0}. \quad (5)$$

Получаем $\{\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k\}$, $1 \leq k \leq m$ что удовлетворяет условиям ортогональности $(\mathbf{u}^l)^T \mathbf{u}^k = 0$, $l \neq k$, $1 \leq k, l \leq m$, где k, l (в верхнем индексе) – индексы ортогональных управлений, m – количество ортогональных управлений. Эти решения могут представлять самостоятельный интерес. Кроме того, получение нескольких последовательностей решений необходимо для уверенного выбора нужной пары векторов в случае относительно жестких условий $\mathbf{C} \mathbf{x} \geq \mathbf{0}$. В этом случае для задачи (5) получаем последовательность задач (6):

$$(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{B} \mathbf{x}^k \rightarrow \min, (\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k = 1, \mathbf{C}_k \mathbf{x}^k \geq \mathbf{0}, 1 \leq k \leq m, \quad (6)$$

где $(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k = 1$ – нелинейные ограничения; $(\mathbf{u}^j)^T \mathbf{u}^k = (\mathbf{x}^j)^T \mathbf{B} \mathbf{x}^k = 0$ – условия ортогональности, последовательно расширяющие систему ограничений $\mathbf{C}_k \mathbf{x}^k \geq \mathbf{0}$.

3.2. Алгоритм эффективных управлений. Функция Лагранжа для задачи (6) имеет вид

$$L_k = \frac{1}{2} (\mathbf{x}^k)^T \mathbf{B} \mathbf{x}^k + \frac{1}{2} \lambda_0 (1 - (\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k) - (\mathbf{x}^k)^T \mathbf{C}_k^T \mathbf{y} \rightarrow \min, 1 \leq k \leq m, \quad (7)$$

где λ_0 – множитель Лагранжа, соответствующий нелинейному ограничению $(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k = 1$; \mathbf{y} – вектор множителей y_j Лагранжа, соответствующих остальным ограничениям; \mathbf{C}_k – матрица ограничений. Матрица \mathbf{C}_k включает ограничения нахождения управления \mathbf{u}^k в допустимом конусе, образованном линейно-независимыми векторами \mathbf{w}^j ($1 \leq j \leq i$), т.е.:

$$\mathbf{u}^k = \eta_1^k \mathbf{w}^1 + \eta_2^k \mathbf{w}^2 + \dots + \eta_i^k \mathbf{w}^i, \eta_1^k \geq 0, \eta_2^k \geq 0, \dots, \eta_i^k \geq 0,$$

где η_j^k ($1 \leq j \leq i$) – коэффициенты разложения, что может быть выражено матричным покомпонентным неравенством (математический вывод см. [21]):

$$(\mathbf{w}^T \mathbf{w})^{-1} \mathbf{w}^T \mathbf{u}^k = (\mathbf{w}^T \mathbf{w})^{-1} \mathbf{w}^T \mathbf{z} \mathbf{x}^k \geq \mathbf{0}, \quad (8)$$

где $\mathbf{W} = (\mathbf{w}^1 \mid \mathbf{w}^2 \mid \dots \mid \mathbf{w}^i)$ – матрица, столбцами которой являются векторы \mathbf{w}^j ($1 \leq j \leq i$). В частности, если набор векторов \mathbf{w}^j ($1 \leq j \leq i$) состоит только из базисных векторов пространства управлений \mathbf{u}^k , то неравенства (8) сводятся к неравенствам вида:

$$u_j^k \leq 0, u_j^k = 0, u_j^k \geq 0.$$

Если требуется обеспечить превосходство выходного значения x_j^k фактора j над выходным значением x_q^k фактора q , то матрица \mathbf{C}_k дополняется ограничениями частичного порядка $|x_q^k| \leq x_j^k$ при положительном ожидаемом выходе x_j^k или $|x_q^k| \leq -x_j^k$ при отрицательном ожидаемом выходе x_j^k , т.е.:

$$x_q^k \leq x_j^k, -x_q^k \leq x_j^k \quad \text{или} \quad x_q^k \geq x_j^k, -x_q^k \geq x_j^k.$$

По мере нахождения решений $\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k$ матрица \mathbf{C}_k дополняется ограничениями попарной ортогональности различных управлений:

$$(\mathbf{u}^j)^T \mathbf{u}^k = (\mathbf{x}^j)^T \mathbf{B} \mathbf{x}^k = 0, 1 \leq j < k.$$

Необходимые условия минимума функций (7) представляют собой систему:

$$\begin{cases} \nabla_{\mathbf{x}} L = \frac{1}{2}(\mathbf{B} + \mathbf{B}^T)\mathbf{x}^k - \lambda_0 \mathbf{x}^k - \mathbf{C}_k^T \mathbf{y} = \mathbf{0}, \\ \nabla_{\lambda_0} L = \frac{1}{2}(1 - (\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k) = 0, \\ \mathbf{C}_k \mathbf{x}^k \geq \mathbf{0}. \end{cases} \quad (9)$$

С учётом $\mathbf{B}^T = \mathbf{B}$, $\frac{1}{2}(\mathbf{B} + \mathbf{B}^T) = \mathbf{B}$ линеаризованная система (9) [22] представляет следующую итерационную схему:

$$\begin{cases} (\mathbf{B} + \alpha \mathbf{I})\hat{\mathbf{x}}^k - \lambda_0 \hat{\mathbf{x}}^k - \hat{\lambda}_0 \mathbf{x}^k - \mathbf{C}_k^T \hat{\mathbf{y}} = (\alpha - \lambda_0)\mathbf{x}^k, \\ (\mathbf{x}^k)^T \hat{\mathbf{x}}^k = \frac{1}{2}(1 + (\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k), \\ \tilde{\mathbf{C}}_k \hat{\mathbf{x}}^k = \mathbf{0}, \end{cases} \quad (10)$$

где α – параметр регуляризации (по А.Н. Тихонову [23]), $\tilde{\mathbf{C}}_k$ – матрица, образованная активными ограничениями. С учётом $(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k = 1$ система уравнений (10) может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}^k = \mathbf{G}\tilde{\mathbf{y}}, \\ \mathbf{G}^T \hat{\mathbf{x}}^k = \mathbf{r}, \end{cases}$$

где $\beta = \alpha - \lambda_0$; $\mathbf{H} = \mathbf{B} + \beta \mathbf{I}$; $\hat{y}_0 = \hat{\lambda}_0 + \beta = \hat{\lambda}_0 - \lambda_0 + \alpha$; $\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}^k \\ \tilde{\mathbf{C}}_k^T \end{pmatrix}$, $\tilde{\mathbf{y}} = \begin{pmatrix} \hat{y}_0 \\ \hat{\mathbf{y}}^T \end{pmatrix}$;
 $\mathbf{r} = (1 \ 0 \ \dots \ 0)^T$.

Решение задач (7) может быть найдено с помощью следующего алгоритма. Алгоритм представлен в табл. 1, его встроенная функция GSBOP представлена в табл. 2. Алгоритм использует следующие обозначения:

\mathbf{A}^T – матрица смежности графовой причинной модели;

δ – демпинг-фактор;

V_e – множество индексов строк матрицы \mathbf{C} , которые соответствуют ограничениям в форме равенств;

V_i – множество индексов строк матрицы \mathbf{C} , которые соответствуют ограничениям в форме неравенств;

V – множество активных ограничений (ограничения в форме равенств активны всегда).

Q – множество неактивных ограничений;

$V \cup Q = V_e \cup V_i$, $V_e \subseteq V$, $Q \subseteq V_i$.

$\mathbf{c}_j = (c_{j,1} \ c_{j,2} \ \dots \ c_{j,n})$ – j -я строка матрицы \mathbf{C} .

Изначально матрица \mathbf{C} имеет l строк, соответствующим ограничениям в форме равенств и в форме неравенств: $|V_e| + |V_i| = l$.

$\tilde{\mathbf{C}} = (c_{j,l})_{j \in V, 1 \leq l \leq n}$ – матрица, составленная из строк матрицы \mathbf{C} , соответствующих активным ограничениям $\mathbf{C}\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$.

λ_0 – множитель Лагранжа, соответствующий нелинейному ограничению $(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k = 1$.

\mathbf{y} – вектор множителей y_j Лагранжа, соответствующих остальным ограничениям;

e – норма невязки;
 ε – порог снижения невязки;
 p – параметр квадратичного штрафа;
 \mathbf{D} – матрица двойственной задачи;
 \mathbf{r} – вектор правой части двойственной задачи;
 $\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k$ ($1 \leq k \leq m$) – пары эффективных управлений;
 α – параметр регуляризации (по А.Н. Тихонову).

Таблица 1

**Алгоритм эффективных управлений на основе передачи влияний
в нестохастических причинных моделях**

1:	Input: $\mathbf{A}, \delta, \mathbf{C}, V_e, V_i;$
2:	$\mathbf{Z} = \mathbf{I} - \delta \mathbf{A};$
3:	$\mathbf{B} \leftarrow \mathbf{Z}^T \mathbf{Z};$
4:	$\mathbf{C}_1 \leftarrow \mathbf{C};$
5:	$k \leftarrow 1;$
6:	while $k \leq m$ do
7:	$\alpha \leftarrow 10^4$
8:	initialization $\mathbf{x}^k;$
9:	GSBOP;
10:	$\lambda_0 \leftarrow 0;$
11:	$\mathbf{y} \leftarrow (0 \ 0 \ \dots \ 0)^T;$
12:	$e \leftarrow \varepsilon;$
13:	while $e \geq \varepsilon$ do
14:	$V \leftarrow V_e; Q \leftarrow \emptyset;$
15:	for $j \in V_i$ do
16:	if $\mathbf{c}_j \mathbf{x}^k \geq y_j / p$ then
17:	$y_j \leftarrow 0; Q \leftarrow Q \cup \{j\};$
18:	else
19:	$V \leftarrow V \cup \{j\};$
20:	endif
21:	endfor
22:	$\beta \leftarrow \alpha - \lambda_0;$
23:	$\mathbf{H} \leftarrow \mathbf{B} + \beta \mathbf{I};$
24:	$\mathbf{G} \leftarrow (\mathbf{x}^k \ \tilde{\mathbf{C}}_k^T);$
25:	$\mathbf{T} \leftarrow \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G};$
26:	$\mathbf{D} \leftarrow \mathbf{G}^T \mathbf{T};$
27:	$\mathbf{r} \leftarrow (1 \ 0 \ \dots \ 0)^T;$
28:	$\tilde{\mathbf{y}} = (y_0 \ \mathbf{y}^T)^T \leftarrow \mathbf{D}^{-1} \mathbf{r};$

29:	$\mathbf{x}^k \leftarrow \mathbf{T}\tilde{\mathbf{y}};$
30:	GSBOP;
31:	$\lambda_0 \leftarrow y_0 - \beta;$
32:	$\mathbf{G} \leftarrow (\mathbf{x}^k \parallel \tilde{\mathbf{C}}_k^T);$
33:	$e \leftarrow y_0 - \alpha = \left(\ \mathbf{H}\mathbf{x}^k - \mathbf{G}\tilde{\mathbf{y}}\ ^2 + \ \mathbf{G}^T \mathbf{x}^k - \mathbf{r}\ ^2 \right)^{1/2};$
34:	endwhile
35:	$\mathbf{u}^k \leftarrow \mathbf{Z}\mathbf{x}^k;$
36:	$\mathbf{c}_{l+k} \leftarrow (\mathbf{x}^k)^T \mathbf{B};$
37:	$V_e \leftarrow V_e \cup \{l+k\};$
38:	$k \leftarrow k + 1;$
39:	$\alpha \leftarrow 0.5\alpha$
40:	endwhile
41:	Output: $\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k$ ($1 \leq k \leq m$);

Таблица 2

Алгоритм встроенной функции GSBOP.

1:	for $j := 1$ to $k - 1$ do
2:	$\gamma \leftarrow \mathbf{c}_{l+j} \mathbf{x}^k / \mathbf{c}_{l+j} \mathbf{c}_{l+j}^T;$
3:	$\mathbf{x}^k \leftarrow \mathbf{x}^k - \gamma \mathbf{c}_{l+j}^T;$
4:	endfor
5:	$\mathbf{x}^k \leftarrow \mathbf{x}^k / \ \mathbf{x}^k\ ;$
6:	end function GSBOP;

3.3. Теорема о резонансе в причинной модели, представленной направленным графом. Любую матрицу можно представить в виде суммы симметричной $\mathbf{A}_s = \frac{1}{2}(\mathbf{A} + \mathbf{A}^T)$ и антисимметричной $\mathbf{A}_a = \frac{1}{2}(\mathbf{A} - \mathbf{A}^T)$ матриц

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_s + \mathbf{A}_a = \frac{1}{2}(\mathbf{A} + \mathbf{A}^T) + \frac{1}{2}(\mathbf{A} - \mathbf{A}^T).$$

В отношении симметричной матрицы \mathbf{A}_s можно утверждать, что все её собственные числа вещественные, и выполняется

$$\lambda_{\min} \mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^T \mathbf{A}_s \mathbf{x} \leq \lambda_{\max} \mathbf{x}^T \mathbf{x}, \quad (11)$$

где λ_{\min} и λ_{\max} – минимальное и максимальное собственные числа матрицы \mathbf{A}_s . Утверждать, что все собственные числа одного знака можно только для знакоопределённых симметричных матриц. Возможны три случая:

$$\lambda_{\min} \leq \lambda_{\max} < 0, \quad \lambda_{\min} \leq 0 \leq \lambda_{\max}, \quad 0 < \lambda_{\min} \leq \lambda_{\max}.$$

Теорема 2. Если минимальное собственное число λ_{\min} матрицы $\mathbf{A}_s = \frac{1}{2}(\mathbf{A} + \mathbf{A}^T)$, где \mathbf{A} – матрица смежности графовой модели (3), положи-

тельно ($\lambda_{\min} > 0$), то при некотором значении δ из интервала $\lambda_{\max}^{-1} \leq \delta \leq \lambda_{\min}^{-1}$ происходит смена знака скалярного произведения оптимальных решений задачи (4) с $\mathbf{u}^T \mathbf{x} > 0$ на $\mathbf{u}^T \mathbf{x} < 0$.

Доказательство. Заметим, что при $\delta = 0$ выполняется $\mathbf{x} = \mathbf{u}$ и $\mathbf{u}^T \mathbf{x} > 0$, то есть вектор отклика \mathbf{x} тождественен вектору воздействия (управления) \mathbf{u} и, следовательно, знак проекции вектора отклика \mathbf{x} на вектор воздействия \mathbf{u} положительный.

В общем случае:

$$\mathbf{u}^T \mathbf{x} = \mathbf{x}^T (\mathbf{I} - \delta \mathbf{A}) \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{x} - \delta \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{x} - \frac{1}{2} \delta \mathbf{x}^T (\mathbf{A} + \mathbf{A}^T) \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{x} - \delta \mathbf{x}^T \mathbf{A}_s \mathbf{x}.$$

Но если $\lambda_{\min} > 0$, то при $\delta > \lambda_{\min}^{-1}$ выполняется:

$$\mathbf{u}^T \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{x} - \delta \mathbf{x}^T \mathbf{A}_s \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^T \mathbf{x} - \delta \lambda_{\min} \mathbf{x}^T \mathbf{x} = (1 - \delta \lambda_{\min}) \mathbf{x}^T \mathbf{x} < 0.$$

С другой стороны, при $0 < \delta < \lambda_{\max}^{-1}$ выполняется:

$$\mathbf{u}^T \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{x} - \delta \mathbf{x}^T \mathbf{A}_s \mathbf{x} \geq \mathbf{x}^T \mathbf{x} - \delta \lambda_{\max} \mathbf{x}^T \mathbf{x} = (1 - \delta \lambda_{\max}) \mathbf{x}^T \mathbf{x} > 0.$$

Поэтому в интервале $\lambda_{\max}^{-1} \leq \delta \leq \lambda_{\min}^{-1}$ происходит смена знака с $\mathbf{u}^T \mathbf{x} > 0$ на $\mathbf{u}^T \mathbf{x} < 0$, то есть положительный знак проекции вектора отклика \mathbf{x} на вектор воздействия \mathbf{u} сменяется отрицательным.

Теорема доказана.

Следствие 1. Если максимальное собственное число λ_{\max} матрицы \mathbf{A}_s положительно, то в интервале $0 \leq \delta < \lambda_{\max}^{-1}$ сохраняется положительный знак проекции вектора отклика \mathbf{x} на вектор воздействия \mathbf{u} . В противном случае положительный знак проекции вектора отклика \mathbf{x} на вектор воздействия \mathbf{u} сохраняется при $0 \leq \delta < +\infty$.

Следствие 2. На решениях задач оптимизации (4), (5) (условной или безусловной) границы (11) сужаются, следовательно, границы $0 \leq \delta < \lambda_{\max}^{-1}$, в которых сохраняется положительный знак проекции вектора отклика \mathbf{x} на вектор воздействия \mathbf{u} , расширяются.

Теорема 3. Если матрица \mathbf{A}^T модели имеет ненулевое действительное собственное число $\lambda \neq 0$ (простое или кратное), то при $\delta = \lambda^{-1}$ на собственном векторе \mathbf{e} матрицы \mathbf{A}^T , соответствующем собственному числу λ , достигается нулевое значение минимума квадратичной формы (5) и, соответственно, бесконечный разрыв целевой функции (4).

Доказательство. Если матрица \mathbf{A}^T имеет ненулевое действительное собственное число $\lambda \neq 0$ (простое или кратное), то в любом случае (матрица приводится к диагональной или приводится только к нормальной Жордановой форме) может быть указан хотя бы один собственный вектор \mathbf{e} , соответствующий этому собственному числу.

Тогда матрица $\mathbf{I} - \delta \mathbf{A}^T$ имеет собственное число $1 - \delta \lambda$ и соответствующий ему собственный вектор \mathbf{e} . При $\delta = \lambda^{-1}$ собственное число $1 - \delta \lambda$ оказывается нулевым, и на собственном векторе \mathbf{e} достигается нулевое значение квадратичной формы (5), и, соответственно, бесконечный разрыв целевой функции (4).

Теорема доказана.

Следствие 3. Если матрица \mathbf{A}^T модели имеет действительное собственное число $\lambda > 1$, то бесконечный разрыв целевой функции (4) происходит в интервале $0 < \delta < 1$.

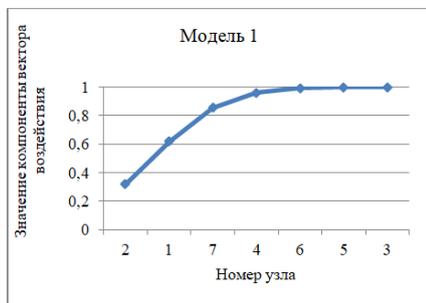
Следствие 4. В случае комплексного собственного числа $\lambda \neq 0$ матрицы \mathbf{A}^T целевая функция (4) в окрестности значения $\delta = 1/\text{Re} \lambda$ будет иметь не бесконечный разрыв, а конечный максимум.

4. Эксперимент. Реализуемость предлагаемого алгоритма была проверена на тестовых моделях, параметры которых и ограничения моделирования приведены в табл. 3. Как показано на рис. 1, вклады компонентов вектора воздействия, сгенерированные алгоритмом, уверенно определяют истинный рейтинг вершин во всех тестовых случаях. Четкая идентификация влиятельных узлов исследуемых моделей происходит за счет резкого изменения угла кривой, который соответствует границам областей скачкообразных изменений показателя эффективности.

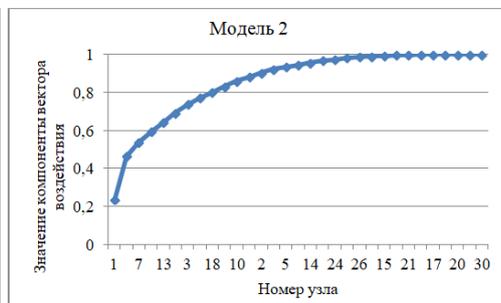
Таблица 3

Параметры тестовых моделей

№	Источник	Наименование модели	Параметр регуляризации α	Демпинг-фактор δ	Ограничения для узлов на параметры функционирования модели:	
					$u_i = 0$	$x_i \leq 0$
1	2	3	4	5	6	7
	[29]	Преступление и наказание, 7x7	3000	1,0	3	4, 6, 7
	[30]	Южная Корея, 31x31	70	0,4	8, 20, 23, 29, 30	-
	[32]	Корпоративный менеджмент, 75x75	250	0,2	1,2,59,60,62,63, 65-75	
	[33]	Инженерное образование, 15x15.	50	0,2	6,7,13,15	12



а



б

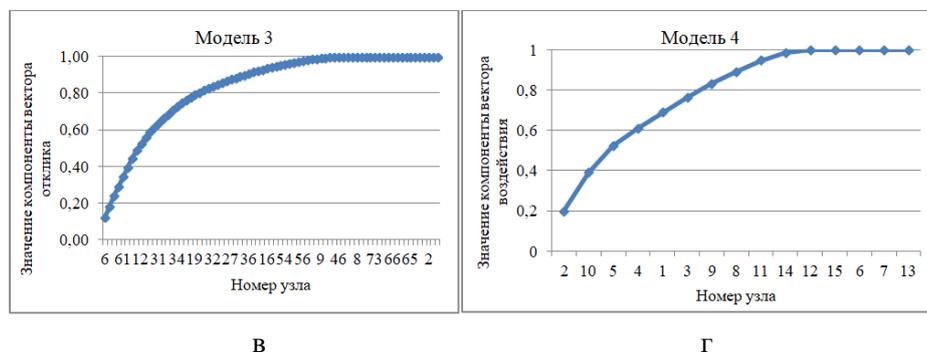


Рис. 1. Компоненты вектора эффективных управлений (управляющих воздействий). Легенда: а – для модели 1, б – для модели 2, в – для модели 3, г – для модели 4 (табл. 3)

5. Анализ полученных результатов. Технические параметры алгоритма оценивались по критерию сходимости, времени работы и автоматизации параметра регуляризации α .

5.1. Теорема о сходимости последовательности множителя Лагранжа алгоритма эффективных управлений. Для задачи оптимизации (5)

$$\mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} \rightarrow \min ; \mathbf{x}^T \mathbf{x} = \|\mathbf{x}\|^2 = 1, \mathbf{C} \mathbf{x} \geq \mathbf{0}.$$

Построим функцию Лагранжа

$$L = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \lambda (1 - \mathbf{x}^T \mathbf{x}) - \mathbf{x}^T \mathbf{C}^T \boldsymbol{\mu} \rightarrow \min . \quad (12)$$

Необходимые условия минимума будут иметь вид:

$$\begin{cases} \nabla_{\mathbf{x}} L = \bar{\mathbf{B}} \mathbf{x} - \lambda \mathbf{x} - \mathbf{C}^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}, \\ \nabla_{\lambda} L = \frac{1}{2} (1 - \mathbf{x}^T \mathbf{x}) = 0, \\ \nabla_{\boldsymbol{\mu}} L = \tilde{\mathbf{C}} \mathbf{x} = \mathbf{0}. \end{cases}$$

где $\bar{\mathbf{B}} = \frac{1}{2} (\mathbf{B} + \mathbf{B}^T)$. Итерационный процесс основан на линеаризованной системе уравнений:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{x}} - \hat{\lambda} \tilde{\mathbf{x}} - \lambda \tilde{\mathbf{x}} + \lambda \mathbf{x} - \tilde{\mathbf{C}}^T \hat{\boldsymbol{\mu}} = \mathbf{0}, \\ \frac{1}{2} (1 - \mathbf{x}^T \tilde{\mathbf{x}}) - \mathbf{x}^T (\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) = 0, \\ \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \\ \hat{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{x}} / \|\tilde{\mathbf{x}}\|. \end{cases}$$

Будем различать $\tilde{\mathbf{x}}_s$ полученное в результате решения системы на итерации s , и нормализованное $\hat{\mathbf{x}}_s = \tilde{\mathbf{x}}_s / \|\tilde{\mathbf{x}}_s\|$. В этом случае после каждой итерации поддерживается $\hat{\mathbf{x}}_s^T \hat{\mathbf{x}}_s = \|\hat{\mathbf{x}}_s\|^2 = 1$. Тогда итерационная схема с регуляризацией по А.Н. Тихонову имеет вид

$$\begin{cases} \overline{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \lambda_{s+1}\mathbf{x}_s - \lambda_s\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} + \lambda_s\mathbf{x}_s + \alpha(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) - \tilde{\mathbf{C}}_s^T\hat{\boldsymbol{\mu}}_{s+1} = \mathbf{0}, \\ \frac{1}{2}(\mathbf{1} - \mathbf{x}_s^T\mathbf{x}_s) - \mathbf{x}_s^T(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) = 0, \\ \tilde{\mathbf{C}}_s\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} = \mathbf{0}, \\ \mathbf{x}_{s+1} = \tilde{\mathbf{x}}_{s+1}/\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\|. \end{cases} \quad (13)$$

Если множество индексов $A_{s+1} = \{k | \mathbf{c}_k\mathbf{x}_s < \mu_{k,s}/p\}$ ограничений в виде равенства активны (\mathbf{c}_k – k -я строка матрицы \mathbf{C} , p – параметр квадратичного штрафа), то $\tilde{\mathbf{C}}_s$ не зависит от s , то есть $\tilde{\mathbf{C}}_s = \tilde{\mathbf{C}}$.

Теорема 1. Если множество индексов A_s ограничений в форме равенства активны, то последовательность множителя Лагранжа $\{\lambda_s\}$, соответствующая нелинейным ограничениям, является сходящейся при $\alpha \geq \lambda_{\max}$ (λ_{\max} – максимальное собственное число матрицы $\overline{\mathbf{B}}$).

Доказательство. В силу $\mathbf{x}_s^T\mathbf{x}_s = 1$, второе уравнение системы (13) может быть записано в одной из форм:

$$\frac{1}{2}(\mathbf{1} - \mathbf{x}_s^T\mathbf{x}_s) - \mathbf{x}_s^T(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) = \frac{1}{2}(\mathbf{1} + \mathbf{x}_s^T\mathbf{x}_s) - \mathbf{x}_s^T\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} = 1 - \mathbf{x}_s^T\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} = -\mathbf{x}_s^T(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) = 0. \quad (14)$$

В силу неравенства Коши-Буняковского выполняется:

$$(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}, \tilde{\mathbf{x}}_{s+1}) = \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\|^2 \geq 1.$$

Поскольку $\|\mathbf{x}_s\| = 1$, $\mathbf{x}_s^T\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} = 1$, и $\mathbf{x}_s^T\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} \leq \|\mathbf{x}_s\|\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\|$, получаем три скалярных произведения первого уравнения системы (A):

$$\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T\overline{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \lambda_{s+1}\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T\mathbf{x}_s + (\alpha - \lambda_s)\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) - \tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T\tilde{\mathbf{C}}_s^T\hat{\boldsymbol{\mu}}_{s+1} = 0,$$

$$\mathbf{x}_s^T\overline{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \lambda_{s+1}\mathbf{x}_s^T\mathbf{x}_s + (\alpha - \lambda_s)\mathbf{x}_s^T(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) - \mathbf{x}_s^T\tilde{\mathbf{C}}_s^T\hat{\boldsymbol{\mu}}_{s+1} = 0,$$

$$(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s)^T\overline{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \lambda_{s+1}(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s)^T\mathbf{x}_s + (\alpha - \lambda_s)\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 - (\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s)^T\tilde{\mathbf{C}}_s^T\hat{\boldsymbol{\mu}}_{s+1} = 0.$$

Во всех случаях последние слагаемые нулевые, поскольку не только $\tilde{\mathbf{C}}_s\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} = \mathbf{0}$, но и $\tilde{\mathbf{C}}_s\mathbf{x}_s = \tilde{\mathbf{C}}(\|\tilde{\mathbf{x}}_s\|^{-1}\tilde{\mathbf{x}}_s) = \|\tilde{\mathbf{x}}_s\|^{-1}\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}}_s = \mathbf{0}$. Вследствие (14) выполняется:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) = \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 + \mathbf{x}_s^T(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) = \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2,$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T\mathbf{x}_s = (\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s)^T\mathbf{x}_s + \mathbf{x}_s^T\mathbf{x}_s = \|\mathbf{x}_s\|^2 = 1.$$

Поэтому скалярные произведения упрощаются:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T\overline{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \lambda_{s+1} + (\alpha - \lambda_s)\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 = 0,$$

$$\mathbf{x}_s^T\overline{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \lambda_{s+1} = 0,$$

$$(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s)^T\overline{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} + (\alpha - \lambda_s)\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 = 0.$$

В силу симметрии матрицы $\overline{\mathbf{B}}$ выполняется:

$$(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s)^T \bar{\mathbf{B}}(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) + \lambda_{s+1} + (\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 = \mathbf{x}_s^T \bar{\mathbf{B}} \mathbf{x}_s.$$

За счёт выбора демпинг-фактора матрица $\bar{\mathbf{B}}$ может быть сделана положительно определённой. В этом случае, с одной стороны:

$$(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s)^T \bar{\mathbf{B}}(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s) + \lambda_{s+1} + (\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 = \mathbf{x}_s^T \bar{\mathbf{B}} \mathbf{x}_s \leq \lambda_{\max} \|\mathbf{x}_s\|^2 = \lambda_{\max}, \quad (15)$$

и, с другой стороны,

$$\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T \bar{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{x}}_{s+1} = \lambda_{s+1} - (\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 \geq \lambda_{\min} \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\|^2 \geq \lambda_{\min} > 0. \quad (16)$$

Таким образом,

$$\lambda_{s+1} + (\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 \leq \lambda_{\max},$$

$$\lambda_{s+1} - (\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 \geq \lambda_{\min} > 0,$$

и получаем двустороннее неравенство для λ_{s+1} :

$$(\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 + \lambda_{\min} \leq \lambda_{s+1} \leq \lambda_{\max} - (\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2.$$

В любом случае $(\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 \leq \frac{1}{2}(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$.

Последовательность $\{\lambda_s\}$ при $\alpha - \lambda_s \geq 0$ является ограниченной $\lambda_{\min} \leq \lambda_{s+1} \leq \lambda_{\max}$. Тогда последовательность $\{\lambda_s\}$ при $\alpha \geq \lambda_{\max}$ является ограниченной $\lambda_{\min} \leq \lambda_{s+1} \leq \lambda_{\max}$ и монотонной. Запишем квадратичную форму (16) для предыдущего шага s :

$$\mathbf{x}_s^T \bar{\mathbf{B}} \mathbf{x}_s = \|\tilde{\mathbf{x}}_s\|^{-2} \tilde{\mathbf{x}}_s^T \bar{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{x}}_s = \|\tilde{\mathbf{x}}_s\|^{-2} \left(\lambda_s - (\alpha - \lambda_{s-1}) \|\tilde{\mathbf{x}}_s - \mathbf{x}_{s-1}\|^2 \right) \leq \lambda_s - (\alpha - \lambda_{s-1}) \|\tilde{\mathbf{x}}_s - \mathbf{x}_{s-1}\|^2. \quad (17)$$

Соотношения (15) и (17) означают монотонность последовательности $\{\lambda_s\}$:

$$0 < \lambda_{\min} \leq \lambda_{s+1} \leq \lambda_s + (\alpha - \lambda_s) \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 \leq \lambda_s - (\alpha - \lambda_{s-1}) \|\tilde{\mathbf{x}}_s - \mathbf{x}_{s-1}\|^2 \leq \lambda_s. \quad (18)$$

Таким образом, монотонная и ограниченная числовая последовательность $\{\lambda_s\}$ является сходящейся:

$$0 < \lambda_{\min} \leq \lambda_{s+1} \leq \lambda_s \leq \lambda_{\max}.$$

Теорема доказана.

Следствие. Норма разности двух последовательных приближений $\|\mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s\| \rightarrow 0$.

Доказательство. С одной стороны, $\mathbf{x}_{s+1}^T \mathbf{x}_{s+1} = \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\|^{-2} \tilde{\mathbf{x}}_{s+1}^T \tilde{\mathbf{x}}_{s+1} = 1$, а с другой,

$\mathbf{x}_s^T \mathbf{x}_{s+1} = \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\|^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_s^T \tilde{\mathbf{x}}_{s+1} \leq 1$, откуда:

$$\begin{aligned} \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 &= \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_{s+1} + \mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 = \|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_{s+1}\|^2 + 2(\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_{s+1})^T (\mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s) + \|\mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 = \\ &= (\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\| - 1)^2 \|\mathbf{x}_{s+1}\|^2 + 2(\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\| - 1) \mathbf{x}_{s+1}^T (\mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s) + \|\mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2. \end{aligned}$$

В предпоследнем слагаемом

$$\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1}\| - 1 \geq 0, \quad \mathbf{x}_{s+1}^T (\mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s) = \mathbf{x}_{s+1}^T \mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_{s+1}^T \mathbf{x}_s \geq 0,$$

откуда окончательно

$$\|\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 \geq \|\mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2.$$

Неравенства (16) с учётом этого могут быть записаны в виде:

$$0 \leq (\alpha - \lambda_s) \|\mathbf{x}_{s+1} - \mathbf{x}_s\|^2 + (\alpha - \lambda_{s-1}) \|\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_{s-1}\|^2 \leq \lambda_s - \lambda_{s+1} \leq \varepsilon.$$

Следствие доказано.

5.2. Автоматизация установки параметра регуляризации в задаче оптимизации. Выбор и настройка подходящего параметра регуляризации α является сложной и трудоёмкой задачей, требующий соответствующих профессиональных знаний. Предложенный алгоритм выполняет автоматическую операцию его вычисления: $\alpha \leftarrow 0.5\alpha$. Данный подход показал быструю сходимость на тестовых моделях.

Рассматриваются два подхода к автоматизации подбора параметра регуляризации α : (1) постоянное значение и (2) изменяющееся значение. Сходимость Ньютоновских процедур критически зависит от начального приближения. Большее значение параметра регуляризации α обеспечивает более монотонную сходимость, а меньшие значения – более быструю. Для создания подходящего начального приближения используется завышенное значение параметра α . При этом в случае постоянного параметра, это приводит к более медленной сходимости. Стратегия с изменяющимся значением α , использованная в предложенном алгоритме, позволяет получить приемлемое начальное приближение с высоким значением параметра регуляризации α на начальных итерациях, и существенно более быструю сходимость (в 10^2 и 10^3 раз) на последующих итерациях при малых значениях параметра α , ограниченного снизу значением максимального собственного числа матрицы квадратичной формы \mathbf{B} (Теорема 1). Графики на рис. 2 демонстрируют преимущество стратегии с изменяющимся значением параметра регуляризации α .

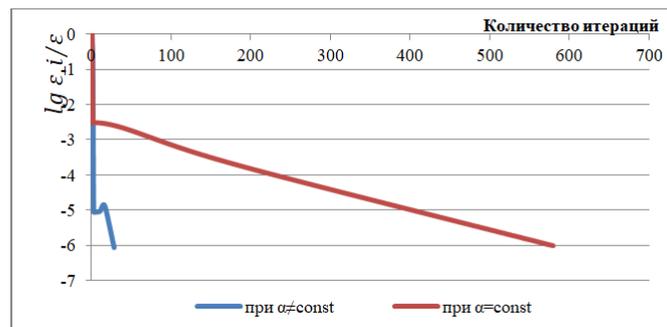


Рис. 2. Сходимость алгоритма эффективных управлений для тестовой модели 4 (табл. 3)

5.3. Время работы алгоритма. Для всех исследованных примеров на одном ядре Intel Pentium процессора CPU 4417U 2.300 ГГц время решения алгоритма не превышало 1 сек. для стратегии $\alpha \leftarrow 0.5\alpha$. Это вполне приемлемо для принятия управленческих решений, не требующих сверхбыстрой реакции.

Таблица 3

**Время работы алгоритма на тестовых моделях при разных стратегиях
вычисления параметра регуляризации α**

Модель	Размерность матриц	Достигнутое значение параметра регуляризации α	Время выполнения в сек. при стратегии	
			$\alpha = const$	$\alpha \neq const$
1	75×75	250	4,444	0,0432
2	31×31	70	0,3464	0,0142
3	15×15	50	0,0127	0,000594
4	7×7	3000	0,1415	0,000337

Заключение. В настоящем исследовании мы показываем, что применение предложенного алгоритма может облегчить принятие решений относительно выбора управляющих воздействий, которые поддерживают достижение тактических и стратегических целей лица, принимающего решения. Следует отметить, что алгоритм реализует автоматизированный подбор параметра регуляризации α , что делает доступным разработку и применение предложенного алгоритма для пользователей, не имеющих достаточной математической подготовки. Сходимость последовательности множителя Лагранжа алгоритма эффективных управлений доказана (Теорема 1). Доказана теорема о резонансе в нестохастической причинной модели, представленной направленным графом, который определяется областью допустимых значений коэффициента демпфирования в модели управления (Теоремы 2 и 3).

Ожидается, что внедрение этого инструмента в интеллектуальные системы поддержки принятия решений повысит надежность решений, принимаемых в отношении работы системы в целом. Выбор управляющих воздействий с использованием предложенного алгоритма имеет отличную эффективность и производительность. Таким образом, результаты, представленные в исследовании, могут быть полезны для разработки приложений в интеллектуальных системах поддержки принятия решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li Y., Fan J., Wang Y., and Tan K.-L. Influence Maximization on Social Graphs: A Survey, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, Oct. 2018, Vol. 30, No. 10, pp. 1852-1872.
2. Easley D. and Kleinberg J. *Networks, Crowds, and Markets*. Cambridge University Press, 2010.
3. Gruhl D., Liben-Nowell D., Guha R., and Tomkins A. Information diffusion through blogspace, *ACM SIGKDD Explor. Newsl.*, Dec. 2004, Vol. 6, No. 2, pp. 43-52.
4. Song X., Tseng B.L., Lin C.-Y., and Sun M.-T. Personalized recommendation driven by information flow, in *Proceedings of the 29th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval - SIGIR '06*, 2006, p. 509.
5. Zhang X., Zhu J., Wang Q., and Zhao H. Identifying influential nodes in complex networks with community structure, *Knowledge-Based Syst.*, Apr. 2013, Vol. 42, pp. 74-84.
6. Li J., Peng W., Li T., Sun T., Li Q., and Xu J. Social network user influence sense-making and dynamics prediction, *Expert Syst. Appl.*, Sep. 2014, Vol. 41, No. 11, pp. 5115-5124.
7. Morone F. and Makse H.A. Influence maximization in complex networks through optimal percolation, *Nature*, Aug. 2015, Vol. 524, No. 7563, pp. 65-68.
8. Molinero X., Riquelme F., and Serna M. Cooperation through social influence, *Eur. J. Oper. Res.*, May 2015, Vol. 242, No. 3, pp. 960-974.
9. Cassavia N., Masciari E., Pulice C., Sacca D., and Trubitsyna I. Evaluating the Influence of User Searches on Neighbors, in *2018 IEEE 27th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*, 2018, pp. 165-170.
10. Riquelme F., Gonzalez-Cantergiani P., Molinero X., and Serna M. The neighborhood role in the linear threshold rank on social networks, *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, Aug. 2019, Vol. 528, pp. 121430.

11. Kempe D., Kleinberg J., and Tardos É. Maximizing the spread of influence through a social network, in *Proceedings of the ninth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining - KDD '03*, 2003, p. 137.
12. Singh S.S., Kumar A., Mishra S., Singh K., and Biswas B. Influence Maximization in Social Networks,” 2019, pp. 255-267.
13. Long C. and Wong R.C.-W. Minimizing Seed Set for Viral Marketing, in *2011 IEEE 11th International Conference on Data Mining*, 2011, pp. 427-436.
14. Dickison M., Havlin S., and Stanley H.E. Epidemics on interconnected networks, *Phys. Rev. E*, Jun. 2012, Vol. 85, No. 6, p. 066109.
15. Kabir K.M.A., Kuga K., and Tanimoto J. Analysis of SIR epidemic model with information spreading of awareness, *Chaos, Solitons & Fractals*, Feb. 2019, Vol. 119, pp. 118-125.
16. Chen G. Pinning control and controllability of complex dynamical networks, *Int. J. Autom. Comput.*, Feb. 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 1-9.
17. Liu Y.-Y., Slotine J.-J., and Barabási A.-L. Controllability of complex networks, *Nature*, May 2011, Vol. 473, No. 7346, pp. 167-173.
18. Tang J. et al. Maximizing the spread of influence via the collective intelligence of discrete bat algorithm, *Knowledge-Based Syst.*, Nov. 2018, Vol. 160, pp. 88-103.
19. Chang B., Xu T., Liu Q., and Chen E.-H. Study on Information Diffusion Analysis in Social Networks and Its Applications, *Int. J. Autom. Comput.*, Aug. 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 377-401.
20. De Arruda G.F., Rodrigues F.A., and Moreno Y. Fundamentals of spreading processes in single and multilayer complex networks, *Phys. Rep.*, Oct. 2018, Vol. 756, pp. 1-59.
21. Tselykh A., Vasilev V., and Tselykh L. Management of Control Impacts Based on Maximizing the Spread of Influence, *Int. J. Autom. Comput.*, Jun. 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 341-353.
22. Bertsekas D.P. The Method of Multipliers for Equality Constrained Problems, in *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*, Elsevier, 1982, pp. 95-157.
23. Tikhonov A. and Arsenin V. *Solutions of Ill-Posed Problems*. New York: Wiley, 1977.
24. Pedrycz W. and Homenda W. From Fuzzy Cognitive Maps to Granular Cognitive Maps, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Aug. 2014, Vol. 22, No. 4, pp. 859-869.
25. Kim D.-H. Cognitive Maps of Policy Makers on Financial Crises of South Korea and Malaysia: A Comparative Study, *Int. Rev. Public Adm.*, Jan. 2004, Vol. 9, No. 2, pp. 31-38.
26. Büyükköçkan G. and Vardaloğlu Z. Analyzing of CPFR success factors using fuzzy cognitive maps in retail industry, *Expert Syst. Appl.*, Sep. 2012, Vol. 39, No. 12, pp. 10438-10455.
27. Tselykh A. and Tselykh L. Methodology for comparative cognitive modeling based on the analysis of fuzzy target and control factors, *Izv. SFedU. Eng. Sci.*, 2015, Vol. 7 (168), pp. 101-115.
28. Poczetka K., Kubuś Ł., and Yastrebov A. Analysis of an evolutionary algorithm for complex fuzzy cognitive map learning based on graph theory metrics and output concepts, *Biosystems*, May 2019, Vol. 179, pp. 39-47.

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

Целых Александр Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: ant@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; д.т.н.; профессор.

Васильев Владислав Сергеевич – e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; тел.: +79185983647; кафедра ИАСБ; к.т.н.; доцент.

Целых Лариса Анатольевна – Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ); e-mail: l.tselykh58@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185695760; кафедра экономики и предпринимательства; к.э.н.; доцент.

Tselykh Alexander Nikolayevich – Southern Federal University; e-mail: ant@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; professor.

Vasilev Vladislav Sergeevich – e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; phone: +79185983647; the department IASB; dr. of eng. sc.; the senior lecturer.

Tselykh Larisa Anatolievna – Chekhov Taganrog Institute (branch) of Rostov State University of Economics; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79185695760; the department of Economics and business; dr. of ec. sc., the senior lecturer.

Е.М. Герасименко, Е.В. Нужнов

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАХОЖДЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКА
В ЗАДАЧАХ ЭВАКУАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ
ОПЕРАТОРОВ АГРЕГИРОВАНИЯ***

Моделирование эвакуации – актуальная проблема, которая вызывает все больший интерес в последние годы. Сегодня подходы к макроскопической эвакуации, основанные на теории потока, позволяют исследователям находить решение проблем оптимизации, рассматривая пострадавших как однородную массу. Основная трудность при построении сценариев эвакуации заключается в необходимости учитывать внутреннюю неопределенность сети. В дополнение к присущей неопределенности узлы сети имеют ограниченную пропускную способность и могут хранить поток, а также направлять дополнительный поток в сток в заданном порядке. Таким образом, эксперт – это ключевая фигура в нечетком моделировании, который должен оценить порядок промежуточных узлов для получения потока. Если лицо, принимающее решение, сомневается в выборе функции принадлежности альтернативы по отношению к атрибуту из-за возможных податрибутов, он / она может изложить все возможные оценки альтернативы. Поэтому в данной статье рассматривается задача максимальной эвакуации с промежуточным хранением в узлах и составление списка-порядка укрытий. Колеблющийся нечеткий гибридный оператор агрегации с усреднением используется для определения приоритета промежуточных узлов. Этот сценарий эвакуации является наиболее безопасным, поскольку максимальное количество пострадавших может быть отправлено в наиболее безопасные убежища, используя возможности промежуточных узлов, таким образом, что величина входящего потока в промежуточном узле может превышать исходящий поток. После нахождения приоритетного списка вершин выполняется построение транспортной сети, советующей остаточной сети, поиск потока с учетом хранения потока в убежищах. Для иллюстрации предложенного алгоритма приведен численный пример.

Максимальный поток с учетом промежуточного хранения; колеблющееся нечеткое число; задачи нечеткой эвакуации.

Е.М. Gerasimenko, E.V. Nuzhnov

**SOLUTION OF THE MAXIMUM EVACUATION FLOW PROBLEM BASED
ON HESITANT FUZZY AGGREGATION OPERATORS**

Evacuation modeling is an urgent problem that has attracted more and more interest in recent years. Today, flow theory in macroscopic evacuation allows researchers to find solutions to optimization problems by treating aggrieved as a homogeneous mass. The main difficulty in constructing evacuation scenarios is the necessity to take into account the internal uncertainty of the network. In addition to the inherent ambiguity, the nodes of the network have limited capacities and can store the flow as well as direct an additional flow to a sink in a given order. Thus, an expert is a key figure in fuzzy modeling who must evaluate the order of intermediate nodes in order to obtain the flow. If the decision-maker doubts during the choice of the membership function of an alternative in relation to an attribute due to possible sub-attributes, he / she can set out all possible evaluations of the alternative. Therefore, this article discusses the problem of maximum evacuation with intermediate storage in nodes and compiling a priority of shelters. The hesitant fuzzy hybrid averaging aggregation operator is used to determine the priority of intermediate nodes. This evacuation scenario is the safest, since the maximum number of victims can be sent to the safest shelters, using the capacities of intermediate nodes, so that the amount of incoming flow at the intermediate node can exceed the outgoing flow. After finding the priority list of vertices, a

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00559 а.

transport network that is correspond to the residual network is constructed, and the flow is searched for, taking into account the storage of the flow in the shelters. A numerical example is given to illustrate the proposed algorithm.

Maximum flow with intermediate storage; hesitant fuzzy number; tasks of fuzzy evacuation.

Введение. Нечеткость и неопределённость присущи поведению и рассуждениям людей. Исследователь часто сталкивается с неопределенностью в процессе принятия решения. Из-за неточности и неопределённости мнений экспертов, а также сложности задач по принятию решений лицом, принимающему решения, трудно оперировать четкими значениями и делать точные оценки. Следовательно, теория нечеткой логики и ее расширения являются современными инструментами для решения такой проблемы.

Колеблющиеся нечеткие множества, которые были введены автором Торра [1], позволяют исследователям не выбирать конкретное значение функции принадлежности, если имеется некоторое сомнение. Основная область применения колеблющихся нечетких множеств – это принятие решений. В большинстве исследований для выбора альтернатив используются нечеткие числа. Такие альтернативы могут включать в себя выбор наиболее эффективной финансовой стратегии, выбор автомобиля, оценку лучшего инвестиционного проекта и т.д. Таким образом, и сегодняшний день исследования в области нечеткой логики больше сосредоточены на оптимизации операторов агрегирования, введении весовых коэффициентов, разработке методов для определения степеней важности и упорядочения весов [2–4], а не для разработки новых постановок задач на основе нечетких вычислений. Если лицо, принимающее решение, сомневается в выборе функции принадлежности альтернативы по отношению к атрибуту из-за возможных податрибутов, рекомендуется изложить все возможные оценки альтернативы по определенным атрибутам, известным эксперту, что выражается как колеблющийся нечеткий элемент. Часть существующих операторов агрегации только взвешивает колеблющийся нечеткий аргумент, но игнорирует важность порядка приоритета аргументов, тогда как оставшаяся часть только взвешивает упорядоченную позицию каждого данного аргумента, но игнорирует важность аргумента. Чтобы избежать этого недостатка, были введены операторы гибридной агрегации для колеблющихся нечетких аргументов, которые взвешивают все заданные аргументы и их упорядоченные позиции [5].

Задачи эвакуации при чрезвычайных ситуациях основаны на моделировании потока [6–9]. В моделях эвакуационных потоков учитываются пропускные способности дуги сетей, но с точки зрения реальной эвакуации промежуточные узлы, которые могут использоваться в качестве укрытий, могут также размещать пострадавших. Это предположение приводит к задачам максимального потока, дуги и узлы которых имеют конечную пропускную способность. В этих условиях общий входящий поток в сток может превышать поток, покидающий сток, что приводит к транспортировке еще большего числа пострадавших. Чтобы направить поток к промежуточным узлам, используются методы поиска кратчайшего пути [6, 10]. Критерием оценки является расстояние от источника: чем больше расстояние, тем безопаснее узел и тем выше его ранг. Однако такой подход не отвечает всем требованиям эвакуации. В некоторых случаях более оптимально доставить эвакуированных до ближайшего убежища, или само убежище может разместить больше пострадавших. В связи с этим в данной статье рассматриваются нечеткие колеблющиеся множества и операторы агрегации для ранжирования убежищ.

В статье представлен разработанный алгоритм принятия решений в чрезвычайных ситуациях при нечетких условиях для задачи максимальной эвакуации потока с промежуточным хранением в узлах. Предлагаемый метод обрабатывает

нечеткую сеть, узлы которой вместе с дугами имеют пропускные способности для хранения потока. На основе колеблющихся операторов нечеткого гибридного усредненного агрегирования вычисляется порядок приоритета убежищ, чтобы получить дополнительный поток, покидающий источник, который может быть дополнительно сохранен в промежуточных узлах.

Постановка задачи и разработанный алгоритм. Нечеткий поток $\xi_{ij}(\theta)$, идущий вдоль дуги (x_i, x_j) , должен удовлетворять ограничениям на пропускные способности (5). Традиционное условие сохранения потока не выполняется. Вместо этого выполняются условия (2-4), показывающие что входящий поток не равен выходящему потоку для промежуточных вершин. Целью является нахождение максимального потока $\sum_{x_j \in \Gamma(s)} \xi_{sj}$ из источника с учетом промежуточного хранения потока в транспортной сети с учетом списка приоритетов вершин (1). Промежуточные вершины ранжируются согласно оценкам экспертов с помощью нечеткого гибридного оператора среднего арифметического.

$$\tilde{v} = \sum_{x_j \in \Gamma(s)} \xi_{sj} \geq \sum_{x_k \in \Gamma^{-1}(t)} \xi_{kt} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\text{Subject to: } \sum_{x_k \in \Gamma^{-1}(i)} \xi_{ki} - \sum_{x_j \in \Gamma(i)} \xi_{ij} \geq \bar{0}, \forall (x_i, x_j) \neq s, t. \quad (2)$$

$$\sum_{x_k \in \Gamma^{-1}(i)} \xi_{ki} - \sum_{x_j \in \Gamma(i)} \xi_{ij} = \sum_{x_k \in \Gamma^{-1}(t)} \xi_{kt}, x_i = t. \quad (3)$$

$$\sum_{x_j \in \Gamma(i)} \xi_{sj} - \sum_{x_k \in \Gamma^{-1}(i)} \xi_{ks} = \sum_{x_k \in \Gamma^{-1}(t)} \xi_{kt} + \sum_{i,j \in I, q(x_i) > 0} \xi_i, x_i = s, \quad (4)$$

$$0 \leq \xi_{ij} \leq \tilde{u}_{ij}, \forall (x_i, x_j) \in \tilde{A}. \quad (5)$$

Представим базовые определения, лежащие в основе разработанного алгоритма нахождения максимального потока с учетом приоритета убежищ на основе нечеткого гибридного оператора арифметического среднего.

Определение 1. Если рассматривается нечеткий колеблющийся элемент h , то его вес $s(h)$ определяется как $s(h) = \frac{1}{l_h} \sum_{\chi \in h} \chi$, где l_h соответствует числу элементов в h .

Из Определения 1 следует, что для двух нечетких элементов h_1 и h_2 , если $s(h_1) > s(h_2)$, то h_1 превосходит h_2 , или $h_1 > h_2$. Если $s(h_1) = s(h_2)$, то h_1 индифферентен к h_2 , или $h_1 \sim h_2$ [11–14].

Определение 2. Если задан нечеткий колеблющийся элемент h , граница отклонения $\bar{\sigma}(h)$ среди всех пар элементов χ_i и χ_j в нечетком колеблющемся элементе [11–14] определяется в уравнении (6):

$$\bar{\sigma}(h) = \frac{1}{l_h} \sqrt{\sum_{\chi_i, \chi_j \in h} (\chi_i - \chi_j)^2}. \quad (6)$$

Определение 3. Пусть h_1 и h_2 два нечетких колеблющихся элемента; $s(h_1)$ и $s(h_2)$ – веса элементов; а $\bar{\sigma}(h_1)$ и $\bar{\sigma}(h_2)$ – границы отклонений h_1 и h_2 , следовательно:

- 1) Если $s(h_1) < s(h_2)$, то $h_1 < h_2$;
- 2) Если $s(h_1) = s(h_2)$, то
 - 2.1) если $\bar{\sigma}(h_1) < \bar{\sigma}(h_2)$, то $h_1 > h_2$;

- 2.2) если $\bar{\sigma}(h_1) > \bar{\sigma}(h_2)$, то $h_1 > h_2$;
 2.3) если $\bar{\sigma}(h_1) = \bar{\sigma}(h_2)$, то $h_1 = h_2$ [11 – 14].

Определение 4. Оператор нечеткого гибридного арифметического среднего в уравнении (7) определяется вектором весов $\Xi = (\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_n)^T$ с $\Xi_j \in [0,1]$ и $\sum_{j=1}^n \Xi_j = 1$ таким что:

$$HFHAA(h_1, h_2, \dots, h_n) = \frac{\bigoplus_{j=1}^n \Xi_{\sigma(j)} W_j}{\sum_{i=1}^n \Xi_{\sigma(j)} W_j}, \quad (7)$$

где $\sigma: \{1,2,\dots,n\} \rightarrow \{1,2,\dots,n\}$ – перестановка, такая что h_j является $\sigma(j)$ -ым наибольшим элементом коллекции нечётких колеблющихся элементов и $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ – это вектор весовых коэффициентов нечетких колеблющихся элементов h_j с $W_j \in [0,1], j = 1,2,\dots,n$ и $\sum_{j=1}^n W_j = 1$.

Определение 5. Агрегированное значение на операторе нечеткого гибридного арифметического среднего определяется в уравнении (8):

$$HFHAA(h_1, h_2, \dots, h_n) = \bigcup_{\chi_1 \in h_1, \chi_2 \in h_2, \dots, \chi_n \in h_n} \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n \left(1 - \chi_j^{\frac{\Xi_{\sigma(j)} W_j}{\sum_{j=1}^n \Xi_{\sigma(j)} W_j}} \right) \right\}. \quad (8)$$

Представим принятие решений в чрезвычайных ситуациях в нечетких колеблющихся условиях для решения задачи эвакуации [15–16] максимального числа пострадавших с учетом возможности хранения потока в промежуточных вершинах.

Этап 1. Найти список убежищ, расположенных в порядке их приоритетности на основе нечетких колеблющихся гибридных операторов арифметического среднего.

1.1. Построим колеблющуюся нечеткую матрицу принятия решений $D = (a_{ij})_{m \times n}$.

1.2. Применим оператор колеблющегося нечеткого гибридного арифметического среднего для вычисления колеблющихся нечётких элементов h_i ($i = 1, 2, \dots, n$) для альтернатив B_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

1.3. Найдем оценки $s(h_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) элементов h_i ($i = 1, 2, \dots, n$) в соответствии с определением 2 и границами отклонений $\bar{\sigma}(h_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) по определению 3.

1.4. Вычисляем приоритеты альтернатив A_i ($i = 1, 2, \dots, n$) путем ранжирования $s(h_i)$ и $\bar{\sigma}(h_i)$.

Этап 2. Сток d имеет наиболее высокий приоритет, тогда промежуточная вершина x_i с наивысшим рангом среди остальных и $q(x_i) > \bar{0}$ следует за d и так до последней вершины.

Этап 3. Определим модифицированную сеть без промежуточного хранения \tilde{G}^* так, чтобы $x_j \in \tilde{G}$ соответствовало вершинам x_j^+ и x_j^- in \tilde{G}^* . Дуга $(x_i^-, x_j^+) \in \tilde{G}^*$, инцидентная x_j^+ , соответствует каждой дуге $(x_i, x_j) \in \tilde{G}$, которая инцидентная x_j , а дуга $(x_j^-, x_k^+) \in \tilde{G}^*$, которая покидает x_j^- соответствует дуге $(x_j, x_k) \in \tilde{G}$, покидающей x_j . Кроме того, введем дуги между x_j^+ и x_j^- с пропускной способностью $q^*(x_i) = q(x_i)$. Каждое искусственное убежище x_i^* соответствует конкретной вершине x_i , таким образом, она имеет то же свойство, что и вершина x_i . Введем супер-сток T и соединим множество искусственных стоков I^* с исходным стоком t дугами с супер-стоком $= \{t\} \cup I^*$.

Этап 4. Ищем максимальный поток в построенной сети в соответствии с заданным приоритетом вершин.

Этап 5. Удаляем искусственные источники и стоки и переходим к исходной сети.

Численный пример. Представим численный пример, иллюстрирующий работу алгоритма нахождения максимального эвакуационного потока в чрезвычайных ситуациях в нечетких колеблющихся условиях [17–20] с учетом возможности хранения потока в промежуточных вершинах. Задача заключается в поиске максимального значения потока, который может пройти между источником и стоком в нечеткой транспортной сети, вершины которой могут хранить поток в виде пострадавших; при этом транспортировка будет осуществляться в стоки согласно списку приоритетов, полученному в соответствии с результатами применения нечетких колеблющихся гибридных операторов арифметического среднего. Рис. 1 иллюстрирует исходную нечеткую транспортную сеть, дугам которой приписаны значения нечетких пропускных способностей, а вершинам – значения потока, который может хранить данная вершина. Основной целью эвакуации является транспортировка максимального возможного числа эвакуируемых в сток t с учетом сохранения потока в вершинах.

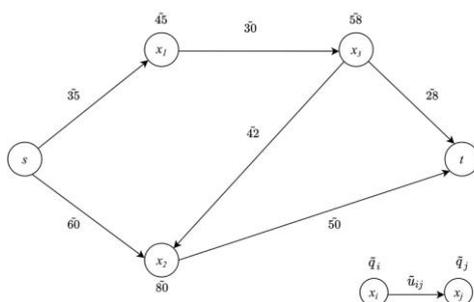


Рис. 1. Исходная сеть

Для оценки приоритета промежуточных вершин-убежищ, необходимых для размещения эвакуируемых, лицо, принимающее решение, оценивает приоритет вершин для эвакуации по трем характеристикам: уровень доступности (B_1), надежность (безопасность) B_2 и транспортные расходы B_3 , что показано в табл. 1.

Таблица 1

Матрица принятия решений эксперта, представленная в нечетких колеблющихся числах

	B_1	B_2	B_3
x_1	(0.5, 0.7)	(0.4, 0.6)	(0.4, 0.6, 0.7)
x_2	(0.5, 0.8)	(0.3, 0.5, 0.6)	(0.6, 0.8)
x_3	(0.6, 0.8)	(0.3, 0.5)	(0.4, 0.5, 0.7)

Вектор весов атрибутов степеней важности $W = (0.25, 0.4, 0.35)$, а вектор упорядочивания весов $E = (0.4, 0.3, 0.3)$.

Найдем веса и степени отклонения нечетких колеблющихся элементов, затем составим список альтернатив.

Чтобы найти ранжированный список приоритетов промежуточных узлов, применим оператор нечеткого гибридного арифметического среднего для вычисления нечетких колеблющихся элементов для каждого альтернативного промежуточного узла $A_i = \{1,2,3\}$.

Этап 1. Осуществим вычисления для альтернатив
Первая альтернатива представляется как:

$$h_1 = HFHAA(h_{11}, h_{12}, h_{13}) = HFHAA(\{0.5, 0.7\}, \{0.4, 0.6\}, \{0.4, 0.6, 0.7\}).$$

$$s(h_{11}) = \frac{0.5+0.7}{2} = 0.6, s(h_{12}) = \frac{0.4+0.6}{2} = 0.5, s(h_{13}) = \frac{0.4+0.6+0.7}{3} = 0.57,$$

тогда $s(h_{11}) > s(h_{13}) > s(h_{12})$ и $h_{11} > h_{13} > h_{12}$. Соответственно, $\sigma(11) = 1, \sigma(12) = 3, \sigma(13) = 2$.

$$\frac{\Xi_{\sigma(11)}W_1}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(1j)}W_j} = \frac{0.25 \times 0.4}{0.25 \times 0.4 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.3} = 0.308, \frac{\Xi_{\sigma(12)}W_2}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(1j)}W_j} = \frac{0.4 \times 0.3}{0.25 \times 0.4 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.3} =$$

$$0.369, \frac{\Xi_{\sigma(13)}W_3}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(1j)}W_j} = \frac{0.35 \times 0.3}{0.25 \times 0.4 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.3} = 0.323.$$

$$h_1 = HFHAA(h_{11}, h_{12}, h_{13}) =$$

$$= \bigcup_{\chi_{11} \in h_{11}, \chi_{12} \in h_{12}, \chi_{13} \in h_{13}} \{1 - (1 - \chi_{11})^{0.308} (1 - \chi_{12})^{0.369} (1 - \chi_{13})^{0.323}\}$$

$$= \{0.433, 0.502, 0.547, 0.512, 0.572, 0.610, 0.515, 0.575, 0.613, 0.583, 0.634, 0.666\}.$$

Вторая альтернатива представляется как:

$$h_2 = HFHAA(h_{21}, h_{22}, h_{23}) = HFHAA(\{0.5, 0.8\}, \{0.3, 0.5, 0.6\}, \{0.6, 0.8\}).$$

$$s(h_{21}) = \frac{0.5+0.8}{2} = 0.65, s(h_{22}) = \frac{0.3+0.5+0.6}{3} = 0.47, s(h_{23}) = \frac{0.6+0.8}{2} = 0.7,$$

тогда $s(h_{23}) > s(h_{21}) > s(h_{22})$ и $h_{23} > h_{21} > h_{22}$. Соответственно, $\sigma(21) = 2, \sigma(22) = 3, \sigma(23) = 1$.

$$\frac{\Xi_{\sigma(21)}W_1}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(2j)}W_j} = \frac{0.25 \times 0.3}{0.25 \times 0.3 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.4} = 0.224, \frac{\Xi_{\sigma(22)}W_2}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(2j)}W_j} = \frac{0.4 \times 0.3}{0.25 \times 0.3 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.4} =$$

$$0.358, \frac{\Xi_{\sigma(23)}W_3}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(2j)}W_j} = \frac{0.35 \times 0.4}{0.25 \times 0.3 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.4} = 0.418.$$

$$h_2 = HFHAA(h_{21}, h_{22}, h_{23}) =$$

$$\bigcup_{\chi_{11} \in h_{11}, \chi_{12} \in h_{12}, \chi_{13} \in h_{13}} \{1 - (1 - \chi_{21})^{0.308} (1 - \chi_{22})^{0.369} (1 - \chi_{23})^{0.323}\} =$$

$$= \{0.486, 0.615, 0.544, 0.659, 0.579, 0.685, 0.582, 0.687, 0.629, 0.722, 0.658, 0.744\}.$$

Третья альтернатива представляется как:

$$h_3 = HFHAA(h_{31}, h_{32}, h_{33}) = HFHAA(\{0.6, 0.8\}, \{0.3, 0.5\}, \{0.4, 0.5, 0.7\}).$$

$$s(h_{31}) = \frac{0.6+0.8}{2} = 0.7, s(h_{32}) = \frac{0.3+0.5}{2} = 0.4, s(h_{33}) = \frac{0.4+0.5+0.7}{3} = 0.53, \text{ тогда } s(h_{31}) >$$

$s(h_{33}) > s(h_{32})$ и $h_{31} > h_{33} > h_{32}$. Соответственно, $\sigma(31) = 1, \sigma(32) = 3, \sigma(33) = 2$.

$$\frac{\Xi_{\sigma(31)}W_1}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(3j)}W_j} = \frac{0.25 \times 0.4}{0.25 \times 0.4 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.3} = 0.308, \frac{\Xi_{\sigma(32)}W_2}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(3j)}W_j} =$$

$$\frac{0.4 \times 0.3}{0.25 \times 0.4 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.3} = 0.369, \frac{\Xi_{\sigma(33)}W_3}{\sum_{j=1}^3 \Xi_{\sigma(3j)}W_j} = \frac{0.35 \times 0.3}{0.25 \times 0.4 + 0.4 \times 0.3 + 0.35 \times 0.3} = 0.323.$$

$$h_3 = HFHAA(h_{31}, h_{32}, h_{33}) = \bigcup_{\chi_{11} \in h_{11}, \chi_{12} \in h_{12}, \chi_{13} \in h_{13}} \{1 - (1 - \chi^{310.3081} - \chi^{320.3691} - \chi^{330.323}) = 0.4440, 0.472, 0.552, 0.505, 0.533, 0.604, 0.547, 0.573, 0.638, 0.600, 0.623, 0.680\}.$$

В заключение, находим веса нечетких колеблющихся элементов и сравниваем значения. Согласно равенствам (7)-(8), $s(h_1) = 0.563$, $s(h_2) = 0.633$, $s(h_3) = 0.564$, что соответствует $s(h_2) > s(h_3) > s(h_1)$. Следовательно, полу-

чаем ранжированный список $h_2 > h_3 > h_1$. Данный факт обозначает, что промежуточная вершина x_2 имеет наивысший приоритет из промежуточных при эвакуации, а полный список приоритетов представляет собой $\{x_2, x_3, x_1\}$.

Этап 3. Переходим к построению модифицированной сети без пропускных способностей вершин, что показано на рис. 2.

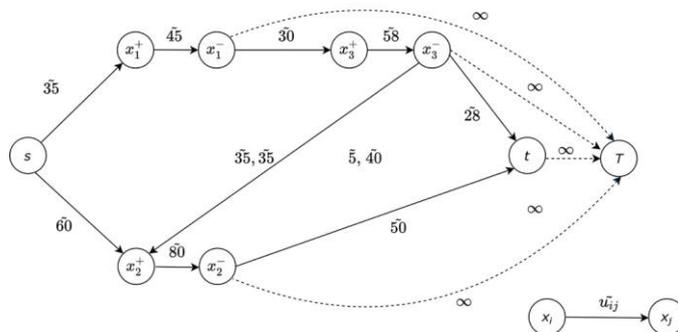


Рис. 2. Преобразованная сеть без сохранения потока

Этап 4. Ищем максимальный поток в преобразованной сети. Сначала ищем пути в сток t , затем – в соответствии с ранжированным списком.

Распределение потока показано в табл. 2.

Таблица 2

Распределение потока с учетом потока в вершинах

Путь	Отправление	Потоковое значение
$s \rightarrow x_1^+ \rightarrow x_1^- \rightarrow x_3^+ \rightarrow x_3^- \rightarrow t \rightarrow T$	t	$\bar{28}$
$s \rightarrow x_1^+ \rightarrow x_1^- \rightarrow x_3^+ \rightarrow x_3^- \rightarrow x_2^+ \rightarrow x_2^- \rightarrow t \rightarrow T$	t	$\bar{2}$
$s \rightarrow x_2^+ \rightarrow x_2^- \rightarrow T$	t	$\bar{48}$
$s \rightarrow x_2^+ \rightarrow x_2^- \rightarrow T$	x_2^-	2
$s \rightarrow x_1^+ \rightarrow x_1^- \rightarrow T$	x_1^-	$\bar{5}$
Итоговый поток с учетом промежуточных вершин		$\bar{95}$

Таким образом, максимальный поток, покидающий источник, составляет $\bar{95}$ единицы, что соответствует максимальному потоку с учетом промежуточного хранения в вершинах, как показано на рис. 3.

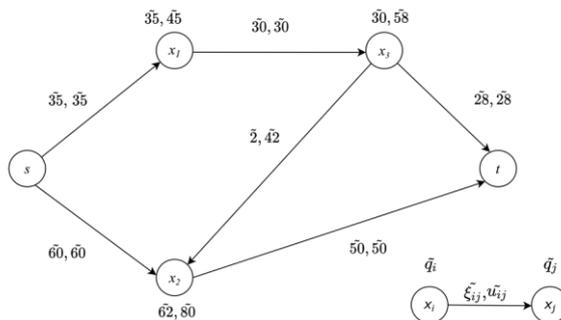


Рис. 3. Финальная сеть с потоком

Временная сложность алгоритма. Для вычисления временной сложности алгоритма была разработана программная реализация на языке C#. Оценка временной сложности разработанного алгоритма производилась с помощью измерения времени работы его программной реализации для различных входных данных. При этом оценка временная сложность проводилась по количеству ребер графа, учитывающему связи между элементами графа.

На рис. 4 приведен график зависимости времени работы алгоритма от количества ребер в графе.

При построении графика на рис. 4 в качестве времени работы алгоритма был взят 90-й перцентиль для пятидесяти итераций.



Рис. 4. Временная сложность алгоритма

Заключение. Статья иллюстрирует подход к нахождению потока минимальной стоимости в нечеткой транспортной сети с учетом реверсирования движения по дугам графа. Модель представляет собой нечеткую транспортную сеть с заданными нечеткими пропускными способностями и стоимостями перевозок. Техника реверсирования движения применяется для увеличения результирующего потока путем увеличения исходных пропускных способностей участков пути для разрешения движения в обратную сторону. Правило оперирования нечеткими значениями пропускных способностей и стоимостей, которое не приводит к сильному размытию границ чисел обеспечивает более реалистичные и чувствительные к изменениям окружающей среды решения. Предложенный подход имеет важное практическое применение при транспортном планировании и эвакуационном моделировании и оптимизации перевозок, когда необходимо перевозить грузы по оптимальным с точки зрения стоимости маршрутам или при моделировании эвакуационного сценария, когда необходимо перевести пострадавших из опасных зон в безопасные наиболее быстро, принимая параметры времени в качестве стоимостей перевозок. В будущем планируется разработка алгоритмов нахождения динамических нечетких потоков, допускающих частичное реверсирование движения в транспортных сетях.

В статье проиллюстрирован подход к задаче нахождения максимального потока для решения задачи эвакуации пострадавших в транспортной сети с учетом промежуточных убежищ, способных размещать пострадавших. Транспортировка осуществляется в порядке приоритета узлов: сток всегда имеет первый приоритет, промежуточный узел с наивысшим рангом имеет второй приоритет и так далее до узла с самым низким рангом. Чтобы оценить порядок промежуточных вершин для транспортировки, как правило, требуется много информации. В чрезвычайных ситуациях при эвакуации лицо, принимающее решение, оценивает промежуточные узлы по различным атрибутам таким как уровень доступности, надежность (безо-

пасность) и транспортные расходы. Колеблющиеся нечеткие множества используются для формализации предпочтений лица, принимающего решение, в случае сомнений, если имеется несколько возможных значений атрибутов. Выбор промежуточного узла производится в соответствии с колеблющимся нечетким гибридным оператором нахождения среднего значения. Промежуточное размещение пострадавших является желательным во время эвакуации из-за возможности транспортировки дополнительного количества эвакуированных в убежища. В промежуточных узлах условие сохранения потока нарушается, т.е. сток, выходящий из источника превышает поток, входящий в сток. Предлагаемый метод объединяет теорию колеблющихся нечетких множеств, в частности, колеблющийся нечеткий гибридный оператор нахождения среднего и поиск максимального потока с промежуточным хранением, в целостный подход к максимальной эвакуации в колеблющейся нечеткой среде. Представлен численный пример, иллюстрирующий работу алгоритма. Микроскопические модели эвакуации в неопределенных нечетких условиях будут предложены в рамках будущих исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Torra V. Hesitant fuzzy sets, *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, 25, pp. 529-539
2. Xia M., Xu Z. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making, *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, 52 (3), pp. 395-407.
3. Liao H.C., Xu Z.S., Xia M.M. Multiplicative consistency on hesitant fuzzy preference relation and the application on group decision making, *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 2014, 13, pp. 47-76.
4. Chen N., Xu Z.S., Xia M.M. Correlation coefficients of hesitant fuzzy sets and their applications to clustering analysis, *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37, pp. 2197-2211.
5. Hu Z. Hesitant Fuzzy Sets Theory. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 2014.
6. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The task of minimum cost flow finding in transportation networks in fuzzy conditions, *Proceedings of the 10th International FLINS Conf.*, 2012, Vol. 7, pp. 354-359.
7. Gerasimenko E., Kureichik V. The Maximum Lexicographic Contraflow Finding in a Fuzzy Dynamic Network Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021, Vol. 1197 AISC, pp. 981-989.
8. Gerasimenko E., Rozenberg I. Earliest arrival dynamic flow model for emergency evacuation in fuzzy conditions, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 734 (1), pp. 1-6.
9. Gerasimenko E., Kureichik V. The Maximum Lexicographic Contraflow Finding in a Fuzzy Dynamic Network, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, Vol. 1197, pp. 981-989.
10. Pyakurel U., Dempe S. Network Flow with Intermediate Storage: Models and Algorithms, *SN Operations Research Forum*. Springer, 2020, 1 (4), pp. 1-23.
11. Xia M., Xu Z. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making, *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, 52 (3), pp. 395-407.
12. Liao H.C., Xu Z.S., Xia M.M. Multiplicative consistency on hesitant fuzzy preference relation and the application on group decision making, *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 2014, 13, pp. 47-76.
13. Liao H.C., Xu Z.S. Some new hybrid weighted aggregation operators under hesitant fuzzy multi-criteria decision making environment, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2014, 26, pp. 1601-1617.
14. Xia M., Xu Z., Chen N. Some Hesitant Fuzzy Aggregation Operators with Their Application in Group Decision Making, *Group Decision and Negotiation*, 2013, 22, pp. 259-279.
15. Pyakurel U. Dhamala T.N. Dempe S. Efficient continuous contraflow algorithms for evacuation planning problems, *Ann. Oper. Res.*, 2017, Vol. 254, pp. 335-364.
16. Evacuation Planning Problems with Partial Lane Reversal, *Mathematics*, 2019, Vol. 7 (10), pp. 1-29.
17. Chen T.Y. Multi-criteria decision-making methods with optimism and pessimism based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets, *International Journal of Systems Science*, 2012, 43, pp. 920-938.

18. *Chen T.Y., Li C.H.* Determining objective weights with intuitionistic fuzzy entropy measures: A comparative analysis, *Information Sciences*, 2010, 180, pp. 4207-4222.
19. *Chiclana F., Herrera F., Herrera-Viedma E.* Integrating multiplicative preference relations in a multipurpose decision-making model based on fuzzy preference relations, *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 122, pp. 277-291.
20. *Fan Z.P., Liu Y.* An approach to solve group decision making problems with ordinal interval numbers, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B*, 2010, 40, pp. 1413-1423.

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

Герасименко Евгения Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Нужнов Евгений Владимирович – e-mail: nev@tgn.sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

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

Nyzhov Evgeniy Vladimirovich – e-mail: nev@tgn.sfedu.ru; the department of computer-aided design; professor.

Раздел IV. Анализ данных и обработка информации

УДК 004:81, 004:052, 004:056.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-155-165

Е.А. Максимова, Н.П. Садовникова

ОЦЕНКА ИНФРАСТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СУБЪЕКТА КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ*

С принятием №187 ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры», реализация которого на практике не возможна без комплексной оценки информационной безопасности (ИБ) субъектов критической информационной инфраструктуры (СКИИ). Однако, существующие в настоящее время руководящие документы регуляторов не рассматривают СКИИ с точки зрения системного подхода, не учитывается инфраструктурная составляющая СКИИ при построении системы защиты информации. В это же время, оценка ИБ СКИИ без учета влияния на состояния и поведение системы возникающих в системе межобъектных и межсубъектных связей приводит к погрешности оценки, так как сама система при определенных условиях может генерировать деструктивизм инфраструктурного характера. Таким образом, погрешность в оценке ИБ СКИИ возникает за счет не учета показателя неспособности СКИИ реализовывать свой функционал в полном объеме под воздействием рисков инфраструктурного характера, т.е. инфраструктурного деструктивизма. С точки зрения теории устойчивости, данный показатель можно соотнести с категорией «инфраструктурная устойчивость СКИИ». Предлагаемая авторами исследования модель оценки инфраструктурной устойчивости (ИУ) СКИИ представлена 1) с использованием аппарата когнитивного моделирования, 2) с использованием аппарата теории надежности технических систем. В рамках когнитивного моделирования, значение концептов задается экспертно. В представленном исследовании для данной оценки предложено использовать аппарат логико-вероятностного моделирования, путем четкой структуризации системы – СКИИ. Таким образом, оценка инфраструктурной устойчивости СКИИ характеризуется возможностью оценивания вероятности безотказной работы объектов КИИ и предотвращения сбоев в функционировании сфер КИИ, что гарантирует стабильность и требуемый уровень ИБ. Проблема оценки ИУ в данном случае приобретает ключевой характер при комплексной оценке ИБ СКИИ.

Критическая информационная инфраструктура; деструктивные воздействия; инфраструктурная устойчивость; инфраструктурный деструктивизм; надежность; субъект; объект; модель; концепт; когнитивная модель; информационная безопасность.

Е.А. Maksimova, N.P. Sadovnikova

DESTRUCTURIZATION OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE FOR ASSESSING THE INFRASTRUCTURAL STABILITY OF THE SUBJECT OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE UNDER DESTRUCTIVE INFLUENCES

With the adoption of Federal Law No. 187 "On the Security of Critical Information Infrastructure", the implementation of which in practice is not possible without a comprehensive assessment of information security (IS) of subjects of critical information infrastructure (SCII).

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ, проект № 3/2020).

However, the currently existing regulatory documents of regulators do not consider SCII from the point of view of a systematic approach, the infrastructural component of SCII is not taken into account when building an information protection system. At the same time, the assessment of IS SCII without taking into account the effect on the state and behavior of the system of inter-object and intersubject connections arising in the system leads to an error in the assessment, since the system itself, under certain conditions, can generate infrastructural destructivism. Thus, the error in assessing the ISSII arises due to the failure to take into account the indicator of the SCII's inability to implement its functionality in full under the influence of infrastructure risks, i.e. infrastructural destructivism. From the point of view of the theory of sustainability, this indicator can be correlated with the category of "infrastructure sustainability of SCII". The proposed by the authors of the study, the model for assessing the infrastructure sustainability (IS) of SCII is presented 1) using the apparatus of cognitive modeling, 2) using the apparatus of the theory of reliability of technical systems. Within the framework of cognitive modeling, the power of concepts is set by experts. In the presented study, for this assessment, it is proposed to use the apparatus of logical-probabilistic modeling, through a clear structuring of the system - SCII. Thus, the assessment of the infrastructure stability of the SCII is characterized by the possibility of assessing the probability of no-failure operation of the facilities of the CII and preventing failures in the functioning of the CII spheres, which guarantees stability and the required level of information security. In this case, the problem of assessing IS in this case acquires a key character in the comprehensive assessment of IS SCII.

Critical Information Infrastructure; destructive influences; infrastructure sustainability; infrastructural destructivism; reliability; subject; object; model; concept; cognitive model; Information Security..

Введение. В 2017 году принят №187 ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры» [1], реализация которого на практике не возможна без комплексной оценки информационной безопасности (ИБ) субъектов критической информационной инфраструктуры (СКИИ). Однако, существующие в настоящее время руководящие документы регуляторов не рассматривают СКИИ с точки зрения системного подхода, не учитывается инфраструктурная составляющая СКИИ при построении системы защиты информации. В это же время, оценка ИБ СКИИ без учета влияния на состояния и поведение системы возникающих в системе межобъектных и межсубъектных связей приводит к погрешности оценки, так как сама система при определенных условиях может генерировать деструктивизм инфраструктурного характера.

Когнитивная оценка инфраструктурного деструктивизма СКИИ. С целью повышения точности оценки ИБ СКИИ предлагается использовать методологию когнитивного моделирования [2–9]. В разработанной когнитивной модели «Оценка информационной безопасности субъекта КИИ» [10–12] кроме регулятивных составляющих, регламентированных в документе [13], предусматривается влияние на целевой концепт факторов, связанных с деструктивными воздействиями инфраструктурного характера.

К таким факторам, к примеру, отнесены ошибки инфраструктурного характера, не учет межобъектных связей в среде функционирования субъекта КИИ, наличие деструктивно-образующих межобъектных связей, факторы риска безопасности СКИИ, связанные с межсубъектными связями и др., являющиеся концептами третьего уровня обозначенной модели – составляющие оценки инфраструктурного деструктивизма (ИД) СКИИ (концепт второго уровня модели «Оценка ИБ СКИИ»). Формализация этих процессов представлена когнитивной моделью «Оценка инфраструктурного деструктивизма субъекта КИИ» (рис. 1). Составляющие данной модели - концепты: V1: «Оценка инфраструктурного деструктивизма субъекта КИИ», V1:1 «Ошибки, связанные с развитием СЗИ СКИИ на разных этапах жизненного цикла», V1:1 -1 «Ошибки, связанные с первичной разработкой информационной инфраструктуры организации (предприятия)», V1: 1-2 «Ошибки

в проектировании системы защиты СКИИ», V1:1-3 «Ошибки при реализации системы защиты субъекта КИИ», V1:1-4 «Ошибки при внедрении системы защиты субъекта КИИ», V1:1-5 «Отсутствие (не корректное построение) системы разграничения доступа в среде субъекта КИИ второго уровня», V1:2 «Инфраструктурные ошибки при развитии СКИИ», V1:2-1 «Ошибки при сопровождении субъекта КИИ», V1: 2-2 «Реализация атаки на объект КИИ», V1: 2-3 «Ошибки при анализе требований для субъекта КИИ», V1:2-4 «Ошибки, связанные с определением перечня объектов, подлежащих категорированию», V1:3 «Факторы рисков безопасности СКИИ, связанные с межобъектными связями», V1:3-1 «Ошибки инфраструктурного анализа», V1:3-2 «Не учет межобъектных связей в среде субъекта КИИ», V1:3-3 «Снижение уровня безопасности межобъектного взаимодействия», V1:3-4 «Инфраструктурное возмущение системы», V1:3-5 «Наличие деструктивно-образующих межобъектных связей», V1:3-5-1 «Наличие инфраструктурной связи типа «Облигативный симбиоз», V1:3-5-2 «Наличие инфраструктурной связи типа «Факультативный симбиоз», V1:3-5-3 «Наличие инфраструктурной связи типа «Комменсализм», V1:3-5-4 «Наличие инфраструктурной связи типа «Нейтрализм», V1:3-5-5 «Наличие инфраструктурной связи типа «Аменсализм», V1:3-5-6 «Наличие инфраструктурной связи типа «Аллелопатия», V1:3-5-7 «Наличие инфраструктурной связи типа «Конкуренция», V1:4 «Факторы рисков безопасности СКИИ, связанные с межсубъектными связями», V1:4-1 «Не учет межсубъектных отношений в среде функционирования КИИ», V1:4-2 «Снижение уровня безопасности хотя бы одного из взаимодействующих субъектов КИИ», V1:4-3 «Снижение уровня безопасности межсубъектного взаимодействия», V1:4-4 «Наличие прямых межсубъектных связей», V1:4-5 «Наличие косвенных межсубъектных связей».

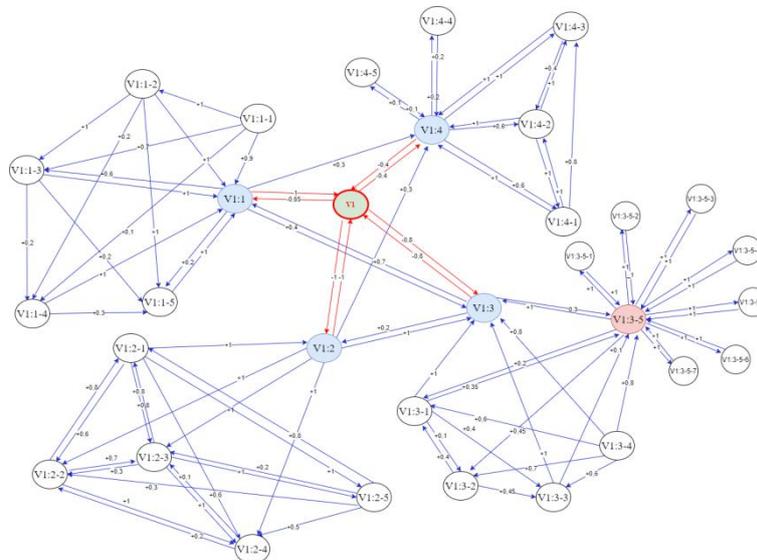


Рис. 1. Когнитивная модель «Оценка инфраструктурного деструктивизма субъекта КИИ»

Здесь, под инфраструктурным деструктивизмом СКИИ будем понимать показатель неспособности СКИИ реализовывать свой функционал в полном объеме под воздействием рисков инфраструктурного характера. С точки зрения теории устойчивости данный показатель можно соотнести с категорией «инфраструктурная устойчивость СКИИ».

Устойчивость СКИИ как системы. Теория устойчивости систем сегодня активно развивается и используется при решении широкого круга задач из разных сфер деятельности [14]. Согласно интерпретации толкового словаря Ушакова [15] «устойчивый – не поддающийся, не подверженный колебаниям и изменениям». Применительно к техническим системам «устойчивость» трактуется как возможность возврата системы в исходное состояние после воздействия на нее.

М.Д. Гродзинский (1987) выделил три формы проявления устойчивости: инертность, восстанавливаемость, пластичность. Наличие рассматриваемых форм проявления устойчивости позволяет выделить два вида устойчивости: инертную (статическую) и упругую [14]. Вид устойчивости отражает не только временной аспект, он непосредственно взаимосвязан и с характеристикой системы [16]. Таким образом, инфраструктурную устойчивость определим, как способность инфраструктуры при возмущении системы оставаться на заданном качественном уровне на фоне высокого уровня инфраструктурного деструктивизма. В качестве «возмущений системы» на уровне СКИИ, в том числе будем рассматривать изменение инфраструктуры за счет добавления (удаления) объекта (объектов) КИИ.

Инфраструктурная устойчивость СКИИ проявляется в инертной форме и в контексте когнитивного моделирования ИБ СКИИ может рассматриваться как мера силы концепта «Оценка функциональности СКИИ» [10, 11].

Оценка данного показателя в настоящее время рассматривается как самостоятельная величина. Так, например, в работе [17] представлена схема обеспечения устойчивости функционирования КИИ в условиях угроз комплексных информационно-технических воздействий и информационно-психологических воздействий, приводящих к компьютерным инцидентам в КИИ. Данная схема основана на том, что элементы КИИ являются «человеко-машинными» взаимосвязанными системами, в которых информационное воздействие на человека и/или компьютеризированные, роботизированные средства приводит к снижению эффективности КИИ в целом.

Вопросы зависимости устойчивости инфраструктуры от топологии рассмотрены в [18, 19]. Обосновано это тем, что мониторинг и оценка состояния, а также, в конечном счете, задачи более высокого порядка требуют своевременных и точных измерений. Знание текущей топологии системы имеет решающее значение для интерпретации любых таких измерений, а также требуется для оценки состояния для получения правильных результатов. Поскольку как ошибки, так и преднамеренные действия могут изменить топологию, важным шагом в любой оценке состояния является получение наиболее адекватной структуры для заданного набора измерений. Это, однако, обычно выполняется до оценки состояния. Данный подход может позволить, к примеру, сформулировать задачу оптимизации для минимизации затрат для предотвращения злоумышленных последствий и определить последствия индуцированных сбоях топологии, приводящих к атакам типа "отказ в обслуживании" вплоть до потери наблюдаемости и возможности восстановления исследования.

Определение меры инфраструктурной устойчивости. Достаточно близким к понятию «устойчивость» является понятие «надежность», но она характеризуется обычно как мера вероятности устойчивой работы, вероятности безотказной работы [14].

В контексте данного исследования, так как решается задача, связанная с определением меры инфраструктурной устойчивости, то на инфраструктурном уровне данная задача может быть решена путем оценки надежности рассматриваемой системы.

В рамках когнитивного моделирования, традиционно, значения концептов задается экспертно. В это же время, на наш взгляд, возможна ее оценка с использованием аппарата логико-вероятностного моделирования, путем четкой структуризации системы – СКИИ.

Исследование инфраструктурной устойчивости СКИИ. Структуризацию СКИИ как системы можно реализовать с помощью деструктуризации инфраструктуры соответствующего субъекта и определения топологических особенностей полученных подсистем.

При декомпозиции структуры СКИИ, согласно [20] можно выделить:

1. Односвязную декомпозицию структуры.
2. Многосвязную декомпозицию.
3. Декомпозицию, связанную с разложением по полной группе событий относительно выделенных элементов, блоков и др.
4. Логическую декомпозицию.

Применительно к КИИ возможны следующие формы декомпозиции системы:

1) на уровне КИИ – для межсубъектного взаимодействия – 1,2,4 формы декомпозиции;

2) на уровне СКИИ – только вариант 3.

Таким образом, на уровне субъекта КИИ рассматриваем три варианта декомпозиции: регулятивная декомпозиция (однослойная) – пообъектная декомпозиция СКИИ, двухслойная декомпозиция СКИИ – декомпозиция на уровне одного субъекта КИИ выполненная путем объединения взаимодействующих объектов в подсистемы. При данном варианте декомпозиции внешнее воздействие на элементы СКИИ не учитываются, двухслойная декомпозиция СКИИ – декомпозиция на уровне взаимодействующих субъектов КИИ с одновременным выполнением двухслойной декомпозиции взаимодействующих субъектов.

Для исследования инфраструктурной устойчивости СКИИ при деструктивных воздействиях кроме того необходимо сформулировать принципы выполнения декомпозиции СКИИ на подсистемы взаимодействующих объектов:

1) Принцип связности: составляющие (объекты КИИ) данной подсистемы находятся в отношении «быть связанным».

2) Принцип однозначности: в данном СКИИ нет ни одного объекта КИИ, который бы принадлежал более чем одной подсистеме взаимодействующих объектов.

3) Принцип целостности: Совокупность всех элементов подсистем взаимодействующих объектов составляет СКИИ.

4) Принцип статичности: в статичном режиме состав и структура СКИИ остается неизменной.

5) Принцип возмущения системы: возмущение системы возникает в результате изменения состава инфраструктуры субъекта.

6) Принцип инфраструктурного деструктивизма: деструктивные воздействия приводят к инфраструктурным изменениям, что проявляется на уровне уязвимой подсистемы взаимодействующих объектов и безопасности СКИИ как системы.

7) Принцип инфраструктурного единообразия: в стационарном режиме состав и структура СКИИ остаются неизменными.

8) Принцип смягчения инфраструктурного деструктивизма: инфраструктурный деструктивизм, вызванный возмущением системы, возможно «смягчить» путем инфраструктурной декомпозиции. Инфраструктурная декомпозиция в данном случае выполняется путем оптимизации «возмущенной» инфраструктуры по критериям, специфичным для данного типа «возмущения».

В теории надежности технических систем перечисленные схемы декомпозиции являются базовыми. С помощью них и при использовании аппарата структурно-логического анализа можно выйти на оценку основных характеристик надежности исследуемого объекта, где не маловажную роль играет определение его структуры.

С этой точки зрения необходимо в структуре СКИИ выделить следующие группы элементов:

- 1) отказ которых практически не влияет на работоспособность системы;
- 2) работоспособность которых практически не изменяется и вероятность их безотказной работы близка к единице;
- 3) ремонт или регулировка которых возможны в процессе работы;
- 4) отказ которых приводит к отказу системы.

При анализе инфраструктурной устойчивости системы (ИУС) имеет смысл включать в рассмотрение элементы только последней группы. При расчете вероятности безотказной работы и других характеристик инфраструктурной устойчивости целесообразно воспользоваться структурно-логическими схемами надежности, в которых учитываются взаимосвязь элементов друг с другом и их влияние на работоспособность системы.

Таким образом, оценка ИУ СКИИ характеризуется возможностью оценивания вероятности безотказной работы объектов КИИ и предотвращения сбоев в функционировании сфер КИИ, что гарантирует стабильность и требуемый уровень ИБ. Проблема оценки ИУ в данном случае приобретает ключевой характер при комплексной оценке ИБ СКИИ.

Модель оценки инфраструктурной устойчивости СКИИ при деструктивных воздействиях. ИУ СКИИ зависит от следующих факторов:

- ◆ на уровне состава элементов СКИИ и их обслуживания,
- ◆ на уровне инфраструктуры субъекта.

Отказы объектов КИИ происходят вследствие воздействия различных факторов, к которым относятся физические, физико-химические и химические, биологические и эксплуатационные факторы, а также реализация угроз ИБ [21].

Предлагаемая модель оценки инфраструктурной устойчивости субъекта критической информационной инфраструктуры на уровне состава его элементов и их обслуживания представлена следующей функцией:

$$F = F(P_{thr}, P_{reli}),$$

где P_{reli} – вектор вероятностей безотказной работы объектов КИИ;

P_{thr} – вектор вероятностей наличия деструктивных воздействий.

Элементы P_{thr} могут принимать следующие значения:

$$P_{thr} = P_{Destr_i}, \quad P_{thr} = P_{exp},$$

где P_{Destr_i} – вероятность деструктивных воздействий на разных этапах жизненного цикла КИИ; P_{exp} – экспертная оценка вероятности реализации деструктивных воздействий.

В модели оценки ИУ СКИИ на уровне состава его элементов и их обслуживания P_{Destr_i} прогнозируется методом экстраполяции наименьших квадратов на основе существующей статистики на предприятиях и в организациях, функционирующих в сферах КИИ. В случае необходимости, предусматривается возможность ввода значения P_{exp} , отличного от прогнозируемого значения P_{Destr_i} на основе существующей статистики.

Возникновение деструктивных воздействий, на разных этапах ЖЦ СЗИ субъекта КИИ порождает уязвимости в системе защиты КИИ, которые злоумышленники могут эксплуатировать для реализации угроз на СКИИ.

Для оценки P_{exp} экспертом возможно использование значения частотной вероятности реализации угроз:

$$P_{exp} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N},$$

где N – общее количество случившихся инцидентов за год; n – количество конкретных инцидентов за год.

Вероятность безотказной работы объектов КИИ P_{reli} зависит от вероятностей безотказной работы подобъектов КИИ и их взаимосвязей:

$$P_{reli} = P(InvU_1, InvU_2, InvU_3, InvU_7, InvU_9),$$

где $InvU_1$ – множество АРМ; $InvU_2$ – множество серверов; $InvU_3$ – множество АСО; $InvU_7$ – множество каналов связи; $InvU_9$ – множество подобъектов КИИ, специфичных для каждого отдельно взятого объекта КИИ.

В ходе исследования рассмотрены все показатели надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых подобъектов КИИ. Проведенный анализ показал, что для оценки надежности субъекта КИИ достаточным является показатель «вероятность безотказной работы».

Для реализации оценки надежности объектов КИИ P_{reli} рассмотрено три случая, где p_i – вероятность безотказной работы подобъектов КИИ:

1. Схема с последовательным соединением n зависимых подобъектов КИИ:

$$P_{reli} = \prod_{i=1}^n p_i(t).$$

2. Схема с параллельным соединением n зависимых подобъектов КИИ:

$$P_{reli} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i(t)).$$

3. Последовательно – параллельная схема. Для оценки надежности объектов КИИ применяется поэтапное упрощение схемы и применение формул для оценки надежности схем с последовательным и параллельным соединением.

Оценка ИУ СКИИ P_{subj} рассчитывается аналогично схемам оценки надежности объектов КИИ: с применением расчетов для параллельного и последовательного соединения объектов КИИ. После оценки надежности объектов КИИ, для оценки ИУ КИИ осуществляется формирование структурной схемы взаимосвязи объектов КИИ и, исходя из вероятностей безотказной работы объектов КИИ и вероятности реализации угроз, рассчитывается оценка ИУ СКИИ.

$$P_{subj} = P_{reli} * (1 - P_{thr}).$$

В случае, если оценка ИУ СКИИ на уровне состава его элементов и их обслуживания недостаточная ($P_{subj} < 0,5$), то необходимо для ее повышения применить дополнительные меры, например, методы резервирования.

Для повышения оценки ИУ СКИИ применяются следующие методы и расчеты для резервирования подобъектов КИИ, где p_i – вероятность безотказной работы подобъектов КИИ:

1. При применении нагруженного резервирования (для системы с последовательным соединением n подобъектов при общем резервировании с кратностью k), надежность субъекта КИИ рассчитывается следующим образом:

$$P_{subj} = 1 - (1 - P)^{k+1} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n P_i(t)\right)^{k+1}.$$

2. При применении нагруженного резервирования (для системы с последовательным соединением n объектов при раздельном резервировании с кратностью k), надежность субъекта КИИ рассчитывается следующим образом:

$$P_{subj} = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - P_i(t))^{k+1}).$$

3. При применении ненагруженного резервирования (системы с ненагруженным резервированием кратности k (всего подобъектов $k + 1$)), надежность субъекта КИИ рассчитывается следующим образом:

$$P_{subj} = 1 - \frac{1}{(K + 1)!} \prod_{i=1}^{k+1} (1 - P_i(t)).$$

По результатам оценки ИУ СКИИ до резервирования и после резервирования осуществляется расчет коэффициента выигрыша надежности:

$$G_p = \frac{P_{before}}{P_{after}},$$

где P_{before} – оценка ИУ СКИИ до резервирования; P_{after} – оценка ИУ СКИИ после резервирования.

Для оценки уровня ИУ СКИИ на уровне состава его элементов и их обслуживания в качестве порогового значения выбрано значения 0,5. В случае значения данной оценки ниже 0,5, предлагаются рекомендации по ее повышению, которые включают методы нагруженного и ненагруженного резервирования.

Заключение. Погрешность в оценке ИБ СКИИ возникает за счет не учета показателя неспособности СКИИ реализовывать свой функционал в полном объеме под воздействием рисков инфраструктурного характера, т.е. инфраструктурного деструктивизма. С точки зрения теории устойчивости, данный показатель можно соотнести с категорией «инфраструктурная устойчивость СКИИ».

Предлагаемая модель оценки инфраструктурной устойчивости субъекта критической информационной инфраструктуры на уровне состава его элементов и их обслуживания представлена функцией, зависящей от значений вероятностей безотказной работы объектов КИИ и вероятностей наличия деструктивных воздействий в среде СКИИ.

Для повышения объективности при формировании когнитивной модели предлагается оценивать концепты с использованием аппарата логико-вероятностного моделирования, путем четкой структуризации системы – СКИИ.

Полученная оценка ИУ СКИИ позволяет оценивать вероятность безотказной работы объектов КИИ и предотвращать сбои в работе КИИ, что гарантирует стабильность и требуемый уровень ИБ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: Федеральный закон от 26 июля 2017г. N 187-ФЗ (с изм. и доп.). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/.
2. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам: пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 496 с.

3. Kosko V. Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Vol. 24. – P. 65-75.
4. Ажмухамедов И.М. Информационная безопасность. Системный анализ и нечеткое когнитивное моделирование. – М.: Изд-во LAP, 2012. – 385 с.
5. Ажмухамедов И.М. Анализ и управление комплексной безопасностью на основе когнитивного моделирования // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 29. – С. 5-15.
6. Ажмухамедов И.М. Динамическая нечёткая когнитивная модель влияния угроз на информационную безопасность системы // Безопасность информационных технологий. – 2010. – № 2. – С. 8-72.
7. Садовникова Н.П., Жидкова Н.П. Выбор стратегий территориального развития на основе когнитивного анализа и сценарного моделирования // Интернет-вестник ВолГАСУ : серия Строительная информатика. – 2012. – № 7 (21). – URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SadovnikovaZhidkova-2012_7\(21\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SadovnikovaZhidkova-2012_7(21).pdf).
8. Садовникова Н. П., Киктеев А.С. Применение агентного моделирования для построения сценариев стратегического развития // Известия ВолГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – 2012. – № 4 (91). – С. 144-147.
9. Дроботов А.С., Садовникова Н.П. Применение метода имитационного моделирования для анализа рисков инновационного проекта // Системные проблемы надёжности, качества, инф.-телекоммуникац. и электрон. технологий в управл. инновационными проектами: (Инноватика-2008): Матер. междунар. конф. и рос. науч. школы. Науч. центр «АСОНИКА» [и др.]. – М., 2008. – Ч. 2. – С. 20-22.
10. Максимова Е.А. Когнитивное моделирование деструктивных злоумышленных воздействий на объектах критической информационной инфраструктуры // Тр. учебных заведений связи. – 2020. – Т. 6, № 4. – С. 91-103. – DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-91-103.
11. Максимова Е.А. Оценка информационной безопасности субъекта критической информационной инфраструктуры при деструктивных воздействиях: монография: Федер. гос. авт. образоват. учреждение высш. образования «Волгогр. гос. ун-т». – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2020. – 95 с.
12. Maksimova E.A. “Smart decisions” in development of a model for protecting information of a subject of critical information infrastructure // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 155. – P. 1213-1221.
13. Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также Перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений: Постановление Правительства РФ от 8 февраля 2018 г. № 127 (не вступил в силу). – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71776120/>.
14. Косолапов О.В., Игнатъева М.Н. Устойчивость как одна из основных характеристик системы // Известия Уральского государственного горного университета. – 2013. – № 4. – С. 77-81. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/290438>. – Загл. с экрана.
15. «Устойчивый -...». – URL: [https:// dic.academic.ru/dic.nsf/ushakov/1071254](https://dic.academic.ru/dic.nsf/ushakov/1071254).
16. Казаков Л.К. Ландшафтоведение. – М.: Изд. центр «Академия», 2011. – 336 с.
17. Климов С.М., Поликарпов С.В., Рыжов Б.С., Тихонов Р.И., Шпырня И.В. Методика обеспечения устойчивости функционирования критической информационной инфраструктуры в условиях информационных воздействий // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 6 (34). – С. 37-48.
18. Гаджиев Б.Р., Гибина Е.Ю., Прогулова Т.Б., Щетинина Д.П. Топология и устойчивость локально-мировых сетей // Программные продукты и системы. – 2009. – № 4. – С. 51-54. – URL: [https:// topologiya-i-ustoychivost-lokalno-mirovyyh-setey.pdf](https://topologiya-i-ustoychivost-lokalno-mirovyyh-setey.pdf).
19. Балашова Т.И. Обеспечение отказоустойчивости сети повышением надежности её топологии // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16846>.
20. Викторова В.С., Степанянц А.С. Многоуровневое моделирование надежности систем // Датчики и системы. – 2014. – № 6 (181). – С. 33-37.
21. Громов Ю.Ю., Иванова О.Г., Мосягина Н.Г., Набатов К.А. Надежность информационных систем. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 5 с.

REFERENCES

1. O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii: Federal'nyy zakon ot 26 iyulya 2017g. N 187-FZ (s izm. i dop.) [On the security of the critical Information Infrastructure of the Russian Federation: Federal Law No. 187-FZ of July 26, 2017 (ed. and add.)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/.
2. *Robert F.S.* Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nym, biologicheskim i ekologicheskim zadacham [Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems]: transl. from engl. Moscow: Nauka, 1986, 496 p.
3. *Kosko V.* Fuzzy Cognitive Maps, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1986, Vol. 24, pp. 65-75.
4. *Azhmuhamedov I.M.* Informacionnaya bezopasnost'. Sistemnyy analiz i nechetkoe kognitivnoe modelirovanie [Information security. System analysis and fuzzy cognitive modeling.]. Moscow: Izd-vo LAP, 2012, 385 p.
5. *Azhmuhamedov I.M.* Analiz i upravlenie kompleksnoj bezopasnost'yu na osnove kognitivnogo modelirovaniya [Analysis and management of complex security based on cognitive modeling], *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Managing large systems], 2010, Issue 29, pp. 5-15.
6. *Azhmukhamedov I.M.* Dinamicheskaya nechetskaya kognitivnaya model' vliyaniya ugroz na informatsionnyuyu bezopasnost' sistemy [Dynamic fuzzy cognitive model of the impact of threats on the information security of the system], *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Information technology security], 2010, No. 2, pp. 8-72.
7. *Sadovnikova N.P., Zhidkova N.P.* Vybora strategiy territorial'nogo razvitiya na osnove kognitivnogo analiza i stsenarnogo modelirovaniya [Selection of territorial development strategies based on cognitive analysis and scenario modeling], *Internet-vestnik VolgGASU : seriya Stroitel'naya informatika* [VolgGASU Internet Bulletin : Construction Informatics series], 2012, No. 7 (21). Available at: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SadovnikovaZhidkova-2012_7\(21\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SadovnikovaZhidkova-2012_7(21).pdf).
8. *Sadovnikova N.P., Kikteev A.S.* Primenenie agentnogo modelirovaniya dlya postroeniya stsenariya strategicheskogo razvitiya [Application of agent-based modeling to build strategic development scenarios], *Izvestiya VolgGTU. Seriya «Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh»* [Izvestiya VolgSTU. The series "Actual problems of management, computer engineering and computer science in technical systems"], 2012, No. 4 (91), pp. 144-147.
9. *Drobotov A.S., Sadovnikova N.P.* Primenenie metoda imitatsionnogo modelirovaniya dlya analiza riskov innovatsionnogo proekta [Application of the simulation modeling method for risk analysis of an innovative projec], *Sistemnye problemy nadëzhnosti, kachestva, inf.-telekommunikats. i elektron. tekhnologiy v upravl. innovatsionnymi proektami: (Innovatika-2008): Mater. mezhdunar. konf. i ros. nauch. shkoly. Nauch. tsentr «ASONIKA» [i dr.]* [Systemic problems of reliability, quality, information and telecommunication and electronic technologies in the management of innovative projects: (Innovatika-2008): Proceedings of the international conference and the Russian scientific school. Scientific Center "ASONIKA" [et al.]. Moscow, 2008, Part 2, pp. 20-22.
10. *Maksimova E.A.* Kognitivnoe modelirovanie destruktivnykh zloumyshlennykh vozdeystviy na ob"ektakh kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury [Cognitive modeling of destructive malicious influences on objects of critical information infrastructure], *Tr. uchebnykh zavedeniy svyazi* [The works of the schools of communication], 2020, Vol. 6, No. 4, pp. 91-103. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-91-103.
11. *Maksimova E.A.* Otsenka informatsionnoy bezopasnosti sub"ekta kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury pri destruktivnykh vozdeystviyakh: monografiya [Assessment of information security of a subject of critical information infrastructure under destructive influences: monograph]: Feder. gos. avt. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obrazovaniya «Volgogr. gos. un-t». Volgograd: Izd-vo VolGU, 2020, 95 p.
12. *Maksimova E.A.* "Smart decisions" in development of a model for protecting information of a subject of critical information infrastructure, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, Vol. 155, pp. 1213-1221.
13. Ob utverzhdenii Pravil kategorirovaniya ob"ektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii, a takzhe Perechnya pokazateley kriteriev znachimosti ob"ektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii i ikh znacheniy:

- Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 8 fevralya 2018 g. № 127 (ne vstupil v silu) [On approval of the Rules for Categorizing Objects of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation, as well as the List of Indicators of Criteria for the Significance of Objects of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation and their Values: Decree of the Government of the Russian Federation of February 8, 2018 No. 127 (not entered into force)]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71776120/>.
14. *Kosolapov O.V., Ignat'eva M.N.* Ustoychivost' kak odna iz osnovnykh kharakteristik sistemy [Stability as one of the main characteristics of the system], *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [Izvestiya Ural State Mining University], 2013, No. 4, pp. 77-81. Available at: <https://e.lanbook.com/journal/issue/290438>. Zagl. s ekrana.
 15. «Ustoychivyy -...» ["Steady -..."]. Available at: [https:// dic.academic.ru/dic.nsf/ushakov/1071254](https://dic.academic.ru/dic.nsf/ushakov/1071254).
 16. *Kazakov L.K.* Landshaftovedenie [Landscape studies]. Moscow: Izd. tsentr «Akademiya», 2011, 336 p.
 17. *Klimov S.M., Polikarpov S.V., Ryzhov B.S., Tikhonov R.I., Shpyrnya I.V.* Metodika obespecheniya ustoychivosti funktsionirovaniya kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury v usloviyakh informatsionnykh vozdeystviy [Methodology for ensuring the stability of the functioning of critical information infrastructure in the conditions of information impacts], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity issues], 2019, No. 6 (34), pp. 37-48.
 18. *Gadzhiev B.R., Gibina E.YU., Progulova T.B., Shchetinina D.P.* Topologiya i ustoychivost' lokal'no-mirovykh setey [Topology and stability of local-world networks], *Programmye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2009, No. 4, pp. 51-54. Available at: <https://topologiya-i-ustoychivost-lokalno-mirovyh-setey.pdf>.
 19. *Balashova T.I.* obespechenie otkazoustoychivosti seti povysheniem nadezhnosti ee topologii [Ensuring network fault tolerance by increasing the reliability of its topology], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, No. 6. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16846>.
 20. *Viktorova V.S., Stepanyants A.S.* Mnogourovnevoe modelirovanie nadezhnosti sistem [Multi-level modeling of system reliability], *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2014, No. 6 (181), pp. 33-37.
 21. *Gromov Yu.yu., Ivanova O.G., Mosyagina N.G., Nabatov K.A.* Nadezhnost' informatsionnykh system [Reliability of information systems]. Tambov: Izd-vo GOU VPO TG TU, 2010, 5 p.

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

Максимова Елена Александровна – Российский технологический университет МИРЭА (РТУ МИРЭА); e-mail: maksimova@mirea.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89616982279; к.т.н.; доцент; доцент кафедры «Прикладные информационные технологии» института комплексной безопасности и специального приборостроения.

Садовникова Наталья Петровна – Волгоградский государственный технический университет, e-mail: npsn1@yandex.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: 8917337652, д.т.н.; профессор; профессор кафедры "Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования".

Maksimova Elena Aleksandrovna – Russian Technological University MIREA (RTU MIREA), e-mail: maksimova@mirea.ru; Moscow, Russia; phone: +79616982279; the department "Applied Information Technologies" of the Institute of Integrated Security and Special Instrumentation; cand. of eng. sc.; associate professor.

Sadovnikova Natalia Petrovna – Volgograd State Technical University; e-mail: npsn1@yandex.ru; Volgograd, Russia; phone: +7917337652; the department of "Computer-aided Design and Search Design Systems"; dr. of eng. sc.; professor.

А.Н. Самойлов, Ю.М. Бородинский

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ*

С развитием возможностей мобильных устройств и повышением доступности беспроводной связи существенно расширились возможности построения промышленных систем автоматизации. Качество цифровой фотографии, получаемой с помощью камеры смартфона, позволяет строить мобильные системы, основанные на компьютерном зрении: например, системы фотограмметрии. При этом следует учитывать несколько факторов. Первый фактор – задачи обработки цифровой фотографии в промышленных целях остаются ресурсоемкими и не могут быть полноценно реализованы только на базе мобильного устройства. Следовательно, требуется перенос среды выполнения ресурсоемких задач на сторонние вычислительные мощностями, доступные по требованию. Вторым фактором – стабильность и полоса пропускания канала связи – мобильные устройства как правило нужны в отдаленных местах, где развертывание стационарных компьютеров не представляется возможным. Следовательно, использование смартфона только в качестве фотоаппарата не всегда оправдано, так как передача необработанного изображения может занять длительное время или вовсе оказаться невозможной. Третьим фактором, препятствующим широкому применению мобильных устройств в решении фотограмметрических задач, – это вариативность и постоянное появление новых методов обработки и анализа изображений. Необходимо централизованно создавать и пополнять библиотеки таких модулей. Таким образом, создание мобильных фотограмметрических измерительных систем требует объединения вычислительной мощности облачных сервисов и мобильности смартфонов. В статье предлагается метод построения фотограмметрических измерительных систем на основе мобильных облачных вычислений, который обеспечивает динамический баланс вычислительной нагрузки на узлы системы, а также вариативность функциональных возможностей на мобильных устройствах пользователей.

Фотограмметрия; облачные вычисления; сервис; трубная промышленность; лесная промышленность; мобильные технологии.

A.N. Samoylov, Yu.M. Borodyansky

MOBILE-CLOUD SYSTEM FOR SOLVING PHOTOGRAMMETRY TASKS IN INDUSTRY

With the development of the capabilities of mobile devices and the increase in the availability of wireless communication, the possibilities of building industrial automation systems have significantly expanded. The quality of digital photography obtained with a smartphone camera makes it possible to build mobile systems based on computer vision: for example, photogrammetry systems. There are several factors to consider. The first factor is that the tasks of processing digital photography for industrial purposes remain resource-intensive and cannot be fully implemented only on the basis of a mobile device. Therefore, it is required to transfer the execution environment for resource-intensive tasks to third-party computing power available on demand. The second factor is the stability and bandwidth of the communication channel - mobile devices are usually needed in remote locations where the deployment of desktop computers is not possible. Therefore, using a smartphone only as a camera is not always justified, since the transfer of an unprocessed image may take a long time or even be impossible. The third factor hindering the widespread use of mobile devices in solving photogrammetric problems is the variability and constant emergence of new methods of image processing and analysis. It is necessary to centrally create and replenish libraries of such modules. Thus, the creation of mobile photogrammetric measuring

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00577.

systems requires combining the computing power of cloud services and the mobility of smartphones. The article proposes a method for constructing photogrammetric measuring systems based on mobile cloud computing, which provides a dynamic balance of the computational load on the nodes of the system, as well as the variability of functionality on mobile devices of users.

Photogrammetry; cloud computing; service; pipe industry; forest industry; mobile technologies.

Введение. Разработка систем промышленного назначения, основанных на технологиях компьютерного зрения, является одним из активно развивающихся направлений в современной науке и практике. В рамках данного направления выделяется класс измерительных систем, основанных на методах фотограмметрии [1–5]. Преимущество использования таких систем состоит в относительно низкой себестоимости измерений при достижении приемлемого качества результатов [4, 5]. Тем не менее несмотря на развитие математического обеспечения [6], создание новых алгоритмов и технологий [7, 8], в данной области остаются нерешенными несколько важных проблем. Первой проблемой является мобильность измерительных комплексов. Как показывает практика, подавляющее большинство современных сертифицированных измерительных комплексов основываются на использовании профессиональной цифровой фототехнике и мощных переносных компьютерах. Это обуславливается ограничениями методов обработки изображений и их вычислительной сложностью. Второй проблемой является эксплуатационная сложность, которая требует от пользователя множества навыков, в том числе цифровой фотографии и использования специализированного программного обеспечения.

Решение данных проблем может быть найдено в применении комплекса, состоящего из мобильного устройства (смартфона/планшета) и облачных вычислений [9, 10]. Но появлению подобных систем препятствует ряд факторов, связанных с низкой вычислительной мощностью мобильных устройств и ограничениями каналов передачи данных, не позволяющих передавать необработанные изображения на облачный сервер [1]. Всё это приводит к проблеме поиска баланса нагрузки между мобильным устройством и облачным сервером, который в каждой отдельно взятой ситуации является уникальным. Мы можем достоверно знать только предельные его значения. Для ситуации, где скоростной доступ в интернет отсутствует, оптимальным является выполнение предварительной обработки изображений и первичного вычисления показателей на мобильном устройстве с последующей передачей результатов на облачный сервер для выполнения процедуры измерения. Это существенно сказывается на энергопотреблении мобильного устройства и скорости выполнения измерений. В случае, когда Интернет-соединение стабильное и устойчивое, а его скорость соответствует стандартам 4G/LTE, оптимальной будет конфигурация измерительной системы, при которой мобильное устройство выполняет только функции фотоаппарата, передавая цифровые изображения на облачный сервер.

Проведенные исследования показали, что в 65% случаев на местах проведения измерений Интернет-соединение является неустойчивым и не позволяет стабильно передавать данные с высокой скоростью. В то же время оно не является настолько медленным, чтобы выполнять все вычислительные операции на мобильном устройстве. Таким образом, нам требуется синтезировать измерительные системы динамически, основываясь на конкретной ситуации. Принимая во внимание то, что квалификация персонала в области ИТ, в реальности занимающегося измерительными операциями, не является высокой [2, 3], синтез должен происходить автоматически, а сама система с точки зрения эксплуатации должна оставаться неизменной. Далее в статье мы рассмотрим разработанный нами метод построения мобильно-облачных измерительных систем, который позволяет динамически синтезировать мобильно-облачные измерительные системы. Научной но-

визной является подход синтеза прикладных измерительных систем, который базируется на сочетании мобильных и облачных технологий и отличается полной автономностью и способностью адаптироваться под условия эксплуатации, в частности стабильность и скорость соединения между мобильной и облачной частями.

Особенности измерительных систем. В настоящее время программная инженерия и смежные области наук, связанные с созданием программных комплексов, на пересечении областей знаний с измерительной техникой решают задачи разработки прикладных одиночных решений.

В основе разработанного метода лежит принцип обратной связи, на основе которого обеспечивается робастность системы. Критерием робастности в данном случае является способность измерительного комплекса выдавать результаты измерения с заданной погрешностью, которая достигается при минимальной вычислительной нагрузке на мобильное устройство. Последнее является основополагающим для систем подобного рода, поскольку напрямую влияет на производительность сотрудника, выполняющего измерения. Необходимо учитывать, что реализация алгоритмов обработки и анализа изображений на мобильном устройстве отличается от реализации на облачных серверах [11, 12]. Существенная разница в вычислительной мощности требует упрощения вычислений и, как следствие, вызывает снижение точности результатов, полученных преимущественно на мобильном устройстве. Поэтому каждый раз, перед началом измерительной процедуры требуется определить пороговые значения для пропускной способности канала связи, требуемый уровень погрешности измерения и конфигурацию измерительной системы. Именно для этих целей применяется обратная связь, с помощью которой вычисляется отклонение от эталонных значений.

Серия произведенных исследований и экспериментов показала, что принятие решения о синтезе конкретной конфигурации системы только формальными математическими методами не представляется возможным [2–5]. Стохастический характер процедуры измерения не позволяет вывести уравнения, которые описывали бы процедуру выбора. В то же время принятие решения пользователем также невозможно, поскольку его квалификации для этого недостаточно. Единственный выход из данной ситуации состоял в использовании теории систем, основанных на знаниях. Эти знания должны быть заложены в базовую измерительную систему, которая принимает конечный вид для каждой измерительной процедуры путём конфигурирования [13, 14]. Структура базовой измерительной системы [15] может быть графически изображена следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Структура базовой измерительной системы

В структуре базовой измерительной системы предусмотрены все возможные варианты эксплуатации, от полного отсутствия канала мобильной связи, до ситуации с высокоскоростным стабильным соединением. В состав облачного сервера [16] включены:

1. Полные версии реализации методов для предварительной обработки и анализа изображений, а также методов выполнения измерений. Методы хранятся в виде пополняемой библиотеки для того, чтобы измерительная система могла эволюционно развиваться вместе с появлением новых разработок. Библиотека, в свою очередь, описывается онтологией методов и их комбинаций [17, 18].

2. База знаний, которая содержит паттерны для case-based reasoning (CBR), также содержащиеся в онтологии методов и их комбинаций. С помощью CBR [19, 20] мы решаем проблему невозможности математического решения задачи синтеза прикладной измерительной системы. Каждый кейс в CBR – экспертное решение проблемы синтеза. В нем содержится конкретная комбинация методов и их параметры, которые позволяют достичь наилучшего результата. Алгоритмы системы, в свою очередь, решают задачу поиска наиболее релевантного кейса к конкретной измерительной задаче. В базе знаний также содержатся производственные правила, с помощью которых происходит принятие решения о конкретной конфигурации измерительной системы в части балансировки нагрузки между мобильным устройством и сервером. Данная задача не является тривиальной, так как подсчет количества круглого лесоматериала и измерение объема металлопроката на одном и том же интернет-соединении и при одном и том же требовании к допустимой погрешности решаются по-разному. В первом случае достаточно бинаризации изображения на мобильном устройстве и подсчета областей без передачи на сервер. Во втором, наоборот, требуется серия вычислений и анализа, приводящего к наиболее точному выделению контуров объектов определению их физических размеров, что на мобильном устройстве не всегда выполнимо.

3. Модуль для синтеза конфигураций. Данный модуль осуществляет обработку онтологии методов и их комбинаций с учетом кейсов CBR, а также выполняет вычисления на основе производственных правил. Результатом работы модуля всегда является конкретный набор методов, их параметры и расположение имплементации (облачный сервер или мобильное устройство). Конфигурации, которые встречаются наиболее часто (в 80% и выше случаев), попадают в отдельную базу данных предопределенных, которая синхронизируется с мобильным устройством при каждом устойчивом соединении с сервером.

4. Модуль оценки качества соединения. С помощью модуля собираются исходные данные для принятия решения о балансировке вычислительной нагрузки. Данный модуль служит для того, чтобы определить возможность передачи данных, содержащихся в результате каждого этапа работы измерительного комплекса (фотография, предварительная обработка, анализ и измерение).

В состав мобильного устройства, в свою очередь, входят:

1. Модуль получения изображений высокого разрешения. Данный модуль базируется на разработанных нами ранее алгоритмах, позволяющих получать изображения сколь угодно высокого разрешения путем склейки фрагментов. Фрагментация и склейка базируются на принципе матрицы матриц и сеточного разбиения изображения общего плана.

2. Упрощенные реализации методов для предварительной обработки и анализа изображений, а также методов выполнения измерений. Данный набор содержит программные реализации методов, оптимизированные для выполнения на мобильном устройстве. Оптимизация в подавляющем большинстве случаев достигается путем снижения точности результатов, поэтому данные методы относятся к классу «упрощенных».

3. Набор предопределенных конфигураций измерительной системы. Это обновляемая база данных конфигураций, в которых содержится необходимый для автономного принятия решения набор данных. С помощью данного компонента

измерительная система способна при полном отсутствии Интернет-соединения с облачным сервером выполнять свои функции. Единственным ограничением является точность решения задач, так как встроенный в мобильное приложение набор реализаций методов является упрощённым.

4. Модуль оценки качества соединения. С помощью модуля собираются исходные данные для принятия решения о балансировке вычислительной нагрузки. Данный модуль служит для того, чтобы определить возможность передачи данных, содержащихся в результате каждого этапа работы измерительного комплекса (фотография, предварительная обработка, анализ и измерение)

5. Графический интерфейс пользователя с инструкциями по применению.

Базовая измерительная система не может напрямую применяться для решения измерительных задач. Она является основой для синтеза прикладной измерительной системы [15]. Пример такой системы показан на рис. 2. Здесь для условий низкоскоростного 3G-соединения и задачи подсчета количества круглого лесоматериала синтезирована система, которая на мобильном устройстве выполняет предварительную обработку изображения, а затем передает результат на облачный сервер, где выполняется анализ и измерение (в данном случае – подсчет количества).

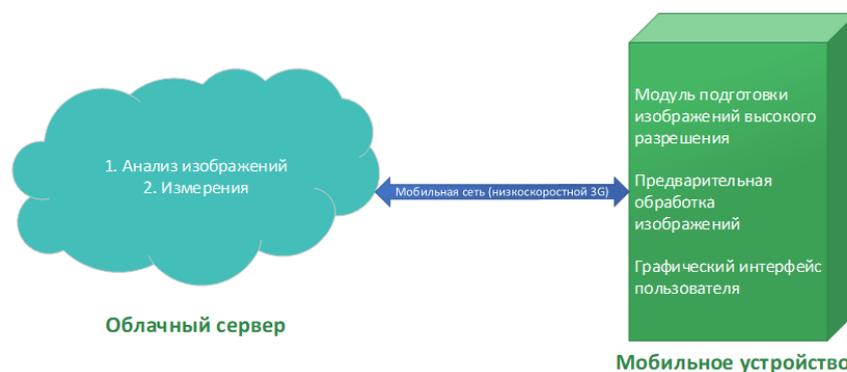


Рис. 2. Структура синтезированной прикладной измерительной системы

Синтез или построение измерительной системы происходит для каждой измерительной задачи, которую инициирует пользователь. Синтез также может выполняться, если по результатам работы модуля оценки качества соединения, который работает на постоянной основе, скорость соединения изменяется более чем на 15 % и это изменение сохраняется более чем на 30 секунд.

Метод построения фотограмметрических измерительных систем. Описав принципиальную структуру базовой и прикладной измерительных систем, перейдем к формулировке метода их построения, основанного на мобильно-облачных вычислениях.

Метод разделяется на два крупных этапа, внутри которых происходит сначала разработка базовой измерительной системы, а затем разработка синтезированных прикладных измерительных систем.

Первый этап: Разработка базовой измерительной системы.

Шаг 1. Определение перечня измерительных задач. На данном шаге требуется принятие решения о том, какие классы измерений может проводить измерительная система. К ним могут относиться: подсчет количества, измерение площади, измерение объема. Каждый класс измерений определяется в контексте объекта измерения – например, лес или металлопрокат.

Шаг 2. Определение методов, применимых для решения каждой измерительной задачи и их программная реализация. Данный этап является самым трудоёмким, поэтому нами была разработана и ранее опубликована онтология методов и комбинаций методов, которая является пополняемой и может лежать в основе любой базовой измерительной системы.

Шаг 3. Исследование влияния Интернет-соединения на качество и скорость получения результатов. На данном этапе требуется определить пороговые значения, которые будут влиять на принятие решения о переносе задачи либо на серверную часть, либо на мобильное устройство. Данная задача решается исходя из определенных минимальных требований к мобильному устройству.

Шаг 4. Программная реализация серверной части и мобильного приложения. В рамках данного этапа разрабатываются программные реализации всех описанных в предыдущем пункте компонентов.

Шаг 5. Предварительное обучение системы. На данном этапе происходит наполнение базы кейсов СВР и выработка продукционных правил. Система в следящем режиме фиксирует действия пользователя-эксперта, формируя на их основе свою базу знаний. Данный шаг, как и шаг 2 является весьма трудоёмким и, по этой причине, также реализован в виде компонента онтологии методов и их комбинаций. При создании реальных версий базовых измерительных систем за основу будет браться полученная нами ранее онтология, что потребует от разработчиков только её дополнения и уточнения с учетом выбранных классов измерительных задач.

Второй этап: Синтез прикладной измерительной системы

Шаг 1. Определение характеристик Интернет-соединения. Если Интернет-соединение устойчиво и его скорость не ниже соответствующей стандарту 2G/EDGE дальнейший процесс синтеза осуществляется облачным сервером. Если параметры соединения ниже или оно отсутствует, дальнейшее конфигурирование осуществляется мобильным устройством.

Дальнейшие шаги будем рассматривать для двух случаев (отсутствующего или приемлемого качества Интернет-соединения.) В первом случае каждый шаг обозначим буквой (а), во втором – буквой (b).

Шаг 2. Определение перечня методов и их комбинаций исходя из измерительной задачи. На основании выбранной пользователем задачи, которые может выполнять базовая измерительная система, определяется полный цикл обработки и анализа изображений. (а) Мобильное устройство осуществляет поиск наиболее релевантного варианта в наборе предопределенных конфигураций измерительной системы. (b) Облачный сервер осуществляет выборку из базы знаний с целью определения подходящей комбинации методов.

Шаг 3. Выбор конфигурации имплементации измерительной системы. (а) Мобильное устройство выполняет инициализацию выбранных методов из локальной копии. (b) Облачный сервер, основываясь на оценках качества соединения, полученных от мобильного устройства и от собственного модуля, осуществляет вычисления на основе продукционных правил, в результате чего определяется место имплементации методов предварительной обработки, анализа изображений и методов измерения.

Шаг 4. Мониторинг устойчивости соединения. В случае изменения характеристик канала связи более чем на 15% и сохранения этого изменения в течение более чем 30 секунд измерительная система по окончании очередного расчета переходит на шаг 3 и выполняет заново выбор конфигурации имплементации измерительной системы.

Заключение. Представленный в данной статье метод построения фотограмметрических измерительных систем на основе мобильных облачных вычислений предлагает принципиально иной подход к решению задачи. Во-первых, известные на сегодняшний день методы мобильно-облачных систем общего назначения предполагают разработку сразу конкретных решений, что в условиях неустойчивого Интернет-соединения, динамики развития и появления новых методов делает их не гибкими и затрудняет их совершенствование. Во-вторых, известные на сегодняшний день методы построения измерительных систем на основе фотограмметрии сводятся к разработке автономных решений, мобильность которых ввиду использования сложных программных и аппаратных компонентов, является крайне низкой. В отличие от этого нами предложен подход, позволяющий использовать преимущества как облачных вычислений (что даёт нам возможность постоянного совершенствования методов и алгоритмов), так и мобильных устройств (что снижает требования к пользователям и существенно повышает мобильность измерительных комплексов). Использование динамической балансировки нагрузки позволяет нивелировать недостатки мобильно-облачных технологий, связанные с неустойчивостью Интернет-соединения. Предложенный метод не лишен недостатков, однако все они сводятся к необходимости основательной подготовки в части формирования базы знаний системы и выработке продукционных правил.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Samoylov A., Borodyansky Y., Kostyuk A., Polovko I.* Mobile-cloud data processing system on digital images // IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). – 2019. – P. 1674-1678. – DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972161.
2. *Shvarts D., Tamre M.* Bulk material volume estimation method and system for logistic applications // 9th International Conference of DAAAM Baltic: Industrial Engineering; Tallinn; Estonia. – 2014. – P. 289-294.
3. *Knyaz V.A., Maksimov A.A.* Photogrammetric technique for timber stack volume control // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; Zurich; Switzerland. – 2014. – Vol. 40. – P. 157-162.
4. *Круглов А.В., Круглов В.Н., Чирыйшев Ю.В.* Способ измерения кубатуры круглого леса // Патент России №2553714. 2015. Бюл. № 17.
5. *Madeira S., Gonçalves J., Basto L.* Photogrammetric mapping and measuring application using MATLAB // Comput. Geosci. – 2010. – Vol. 36, No. 6. – P. 699-706.
6. *Song C., Yang B., Zhang, L. et al.* A handheld device for measuring the diameter at breast height of individual trees using laser ranging and deep-learning based image recognition // Plant Methods. – 2021. – Vol 17, No. 67. – <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00748-z>.
7. *Niwa H., Imai Y., Kamada M.* The effectiveness of a method that uses stabilized cameras and photogrammetry to survey the size and distribution of individual trees in a mangrove forest // Journal of Forest Research. – 2021. – No. 0 (0). – P. 1-7. – DOI: 10.1080/13416979.2021.1902069.
8. *Jin Y., Yu K.* A review of optics-based methods for thickness and surface characterization of two-dimensional materials // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – No. 39 (54). – P. 393001. – DOI:10.1088/1361-6463/ac0f1f.
9. *Dinh H.T., Lee C., Niyato D., Wang P.* A survey of mobile cloud computing: Architecture, applications, and approaches // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2013. – No. 18 (13). – DOI:10.1002/wcm.1203.
10. *Roy P., Sarker S., Razzaque M.A., Mamun-or-Rashid M., Hassan M.M., Fortino G.* Distributed task allocation in Mobile Device Cloud exploiting federated learning and subjective logic // Journal of Systems Architecture. – 2021. – Vol. (113). – P. 101972. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2020.101972>.
11. *Thieling L.* Embedded image processing system for cloud-based applications // IWSSIP 2014 Proceedings. – 2014. – P. 163-166.
12. *Yan Y., Huang L.* Large-Scale Image Processing Research Cloud // CLOUD Comput. – 2014, Fifth Int. – 2014. – P. 88-93.
13. *Кучеров С.А.* Конфигурируемые пользователем информационные системы как средство преодоления семантического разрыва // Информатизация и связь. – 2013. – № 5. – С. 135-137.

14. Aniorte P. A distributed adaptable software architecture derived from a component model // *Computer Standards & Interfaces*. – 2003. – No. 3 (25). – P. 275-282. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0920-5489\(02\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0920-5489(02)00099-5).
15. Buschmann F., Meunier R., Rohnert H., Sommerlad P., Stall M. *Pattern-Oriented Software Architecture*, Vol. 1, A System of Patterns // Wiley, August 1996. – ISBN 978-0-471-95869-7.
16. Walker G. The Basics of Cloud Computing. – <http://docshare01.docshare.tips/files/16621/166213264.pdf> (дата обращения: 20.08.2021).
17. Clouard R., Renouf A., & Revenu M. An ontology-based model for representing image processing application objectives // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. – 2010. – Vol. 24, No. 08. – P. 1181-1208.
18. Filali J., Zghal H.B., Martinet J. Ontology-Based Image Classification and Annotation // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. – 2020. – No. 11 (34). – DOI: [10.1142/S0218001420400029](https://doi.org/10.1142/S0218001420400029).
19. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches // *Artificial Intelligence Communications*. – 1994. – No. 7. – P. 39-52.
20. Puzstová L., Babič F., Paralič J. Semi-Automatic Adaptation of Diagnostic Rules in the Case-Based Reasoning Process // *Applied Sciences*. – 2021. – No. 1 (11). – DOI: [10.3390/app11010292](https://doi.org/10.3390/app11010292).

REFERENCES

1. Samoylov A., Borodyansky Y., Kostyuk A., Polovko I. Mobile-cloud data processing system on digital images, *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2019, pp. 1674-1678. DOI: [10.1109/INDIN41052.2019.8972161](https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972161).
2. Shvarts D., Tamre M. Bulk material volume estimation method and system for logistic applications, *9th International Conference of DAAAM Baltic: Industrial Engineering; Tallinn; Estonia*, 2014, pp. 289-294.
3. Knyaz V.A., Maksimov A.A. Photogrammetric technique for timber stack volume control, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; Zurich; Switzerland*, 2014, Vol. 40, pp. 157-162.
4. Kruglov A.V., Kruglov V.N., Chiryshv Yu.V. Sposob izmereniya kubatury kruglogo lesa [Method for measuring the volume of roundwood]. Patent of the Russian Federation No. 2553714. 2015. Bull. No. 17.
5. Madeira S., Gonçalves J., Basto L. Photogrammetric mapping and measuring application using MATLAB, *Comput. Geosci.*, 2010, Vol. 36, No. 6, pp. 699-706.
6. Song C., Yang B., Zhang, L. et al. A handheld device for measuring the diameter at breast height of individual trees using laser ranging and deep-learning based image recognition, *Plant Methods*, 2021, Vol 17, No. 67. Available at: <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00748-z>.
7. Niwa H., Imai Y., Kamada M. The effectiveness of a method that uses stabilized cameras and photogrammetry to survey the size and distribution of individual trees in a mangrove forest, *Journal of Forest Research*, 2021, No. 0 (0), pp. 1-7. DOI: [10.1080/13416979.2021.1902069](https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1902069).
8. Jin Y., Yu K. A review of optics-based methods for thickness and surface characterization of two-dimensional materials, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, No. 39 (54), pp. 393001. DOI: [10.1088/1361-6463/ac0f1f](https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac0f1f).
9. Dinh H.T., Lee C., Niyato D., Wang P. A survey of mobile cloud computing: Architecture, applications, and approaches, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2013, No. 18 (13). DOI: [10.1002/wcm.1203](https://doi.org/10.1002/wcm.1203).
10. Roy P., Sarker S., Razzaque M.A., Mamun-or-Rashid M., Hassan M.M., Fortino G. Distributed task allocation in Mobile Device Cloud exploiting federated learning and subjective logic, *Journal of Systems Architecture*, 2021, Vol. (113), pp. 101972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2020.101972>.
11. Thieling L. Embedded image processing system for cloud-based applications, *IWSSIP 2014 Proceedings*, 2014, pp. 163-166.
12. Yan Y., Huang L. Large-Scale Image Processing Research Cloud, *CLOUD Comput.*, 2014, Fifth Int., 2014, pp. 88-93.
13. Kucherov S.A. Konfiguriruemye pol'zovatelem informatsionnye sistemy kak sredstvo preodoleniya semanticheskogo razryva [Configurable by the user information systems as a means of overcoming the semantic gap], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2013, No. 5, pp. 135-137.

14. Aniorte P. A distributed adaptable software architecture derived from a component model, *Computer Standards & Interfaces*, 2003, No. 3 (25), pp. 275–282. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0920-5489\(02\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0920-5489(02)00099-5).
15. Buschmann F., Meunier R., Rohnert H., Sommerlad P., Stall M. Pattern-Oriented Software Architecture, Vol. 1, A System of Patterns, Wiley, August 1996. ISBN 978-0-471-95869-7.
16. Walker G. The Basics of Cloud Computing. Available at: <http://docshare01.docshare.tips/files/16621/166213264.pdf> (accessed 20 August 2021).
17. Clouard R., Renouf A., & Revenu M. An ontology-based model for representing image processing application objectives, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2010, Vol. 24, No. 08, pp. 1181-1208.
18. Filali J., Zghal H.B., Martinet J. Ontology-Based Image Classification and Annotation, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2020, No. 11 (34). DOI: 10.1142/S0218001420400029.
19. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches, *Artificial Intelligence Communications*, 1994, No. 7, pp. 39-52.
20. Pustová L., Babič F., Paralič J. Semi-Automatic Adaptation of Diagnostic Rules in the Case-Based Reasoning Process, *Applied Sciences*, 2021, No. 1 (11). DOI: 10.3390/app11010292.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.К. Лебедев.

Самойлов Алексей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: asamoylov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; зав. кафедрой.

Бородянский Юрий Михайлович – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: borodyanskyum@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123260889; кафедра безопасности информационных систем; к.т.н.; зав. кафедрой.

Samoylov Alexey Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: asamoylov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; head of department.

Borodyansky Yury Mikhailovich – Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications; e-mail: borodyanskyum@gmail.com; St. Petersburg, Russia; phone: +78123260889; the department of information systems security; cand. of eng. sc.; head of department.

УДК 004.891.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-174-187

А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых

АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ МАТРИЦЫ СМЕЖНОСТИ ПРИЧИННЫХ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ОТСУТСТВИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ*

Рассматривается проблема моделирования сложных систем при отсутствии наблюдаемых переменных. Для решения этой проблемы предлагается использовать причинные графовые модели. Класс причинных моделей, который мы здесь рассматриваем, определяется как нестохастические причинные модели с ненаблюдаемыми переменными. Эти модели представляются в виде направленного графа, создаваемого на основе человеческих ментальных репрезентаций. При этом на дугах причинность выражена в виде некоторых меток, которые имеют знак, определяющий направление изменений состояния системы. Рассматриваемые причинные модели включают неоднородные, сложные и качественные

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда фундаментальных исследований № 19-01-00109.

типы переменных, иллюстрирующие нечисловую природу узлов и связей, а, следовательно, отсутствие и невозможность получения временных рядов данных. В условиях отсутствия наблюдаемых переменных и невозможности проведения экспериментов, проблема реконструкции матрицы смежности графовой причинной модели становится гораздо более сложной. Требуется получить модель с определенным спектральным разложением, которое реализует основную функцию моделируемой системы. На основе этой концепции предлагается новый метод реконструкции матрицы смежности, реализованный на соответствующей матрице причинного распространения или передаточной матрице. Идея состоит в том, чтобы использовать комбинаторную оптимизацию на основе спектральной теории графов для генерации данных из качественной нестохастической причинной модели и реконструировать матрицу смежности, используя эти данные. В этом случае собственные векторы идентифицируются как ключевые цели процесса реконструкции матрицы, что постулирует фундаментальный подход, основанный на спектральных свойствах графа. Результаты вычислительных экспериментов решения задачи реконструкции матрицы смежности для причинных графовых моделей в отсутствие наблюдаемых переменных с использованием разработанного алгоритма показали, что алгоритм эффективно реконструирует матрицы в заданных параметрах с допустимыми показателями схожести. Доказана сходимость приближения к решению алгоритма реконструкции матриц не медленнее, чем со скоростью геометрической прогрессии. С технической точки зрения, преимуществом алгоритма является реализация инструмента автоматической настройки параметра регуляризации, пригодного для пользователей без предварительных математических знаний.

Реконструкция матриц; эффективное управление; причинные модели; принятие управленческих решений; оптимизационные методы; направленный взвешенный знаковый граф.

A.N. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh

**THE ADJACENCY MATRIX RECONSTRUCTION ALGORITHM FOR
CAUSAL GRAPH MODELS IN THE ABSENCE OF OBSERVABLE
VARIABLES**

The paper deals with the problem of modeling complex systems in the absence of observable variables. To solve this problem, it is proposed to use causal graph models. The class of causal models considered here is defined as non-stochastic causal models with unobservable variables. These models are presented in the form of a directed graph, created on the basis of human mental representations. In this case, on the arcs, causality is expressed in the form of some marks with a sign that determines the direction of change in the state of the system. The considered causal models include heterogeneous, complex and qualitative types of variables that illustrate the non-numerical nature of nodes and links and, as a consequence, the absence and impossibility of obtaining time series data. In the absence of observable variables and the impossibility of conducting experiments, the problem of reconstructing the adjacency matrix of the causal graph model becomes much more complicated. It is required to obtain a model with a certain spectral decomposition that implements the main function of the modeled system. Based on this concept, a new method for reconstructing the adjacency matrix is proposed, implemented on the basis of the corresponding causal propagation matrix or transmission matrix. The idea is to use combinatorial optimization based on spectral graph theory to generate data from a qualitative non-stochastic causal model and reconstruct an adjacency matrix using that data. In this case, the eigenvectors are identified as key objectives of the matrix reconstruction process, which postulates a fundamental approach based on the spectral properties of the graph. The results of computational experiments on solving the problem of reconstructing the adjacency matrix for causal graph models in the absence of observable variables using the developed algorithm have shown that the algorithm effectively reconstructs matrices from the given parameters with admissible similarity indices. The convergence of the approximation to the solution of the matrix reconstruction algorithm is proved no slower than with the speed of a geometric progression. From a technical point of view, the advantage of the algorithm is the implementation of a tool for automatic adjustment of the regularization parameter, suitable for users without prior mathematical knowledge.

Matrix reconstruction; effective control; causal models; control decision-making; optimization methods; directed weighted signed graph.

1. Введение. Данное исследование адресуется к проблеме роботизации процесса принятия управленческих решений на основе нестохастических причинных моделей (СМ) в сложных системах (социальных, политических и социально-экономических системах).

Класс причинных моделей, который мы здесь рассматриваем, определяется как нестохастические причинные модели с ненаблюдаемыми (по своей природе) переменными. Несмотря на существование других типов причинных моделей сложных систем, наша работа охватывает широкую область, исследования в которой находятся в 'младенческой' стадии. Моделирование исследуемых систем осуществляется через экспертные суждения, получаемые непосредственно от человека, либо собираемые из его опубликованных мнений. Причинность здесь рассматривается как в работе [1]. Эти модели представляются в виде направленного графа, создаваемого на основе человеческих ментальных репрезентаций. При этом на дугах причинность выражена в виде некоторых меток, которые имеют знак, определяющий направление изменений состояния следствий. Рассматриваемые причинные модели включают неоднородные, сложные и качественные типы переменных, иллюстрирующие нечисловую природу узлов и связей, а, следовательно, отсутствие и невозможность получения временных рядов данных. В условиях отсутствия наблюдаемых переменных и невозможности проведения экспериментов, проблема реконструкции матрицы смежности графовой причинной модели становится гораздо более сложной.

С точки зрения сетевого отображения [2], исследуемые модели относятся к определенным статическим сетям с нестохастическими ребрами. Существующие методы реконструкции сетевой структуры используют статистические данные (полные, частичные, локальные) из наблюдаемого состояния узлов [3, 4] и решают частные задачи реконструкции сети для определенных типов графов. Задача полной реконструкции матрицы смежности в отсутствии наблюдаемых переменных в обобщенной постановке не решалась и является новой.

Цель данной статьи – предоставить алгоритм реконструкции матрицы смежности нестохастических причинных графовых моделей сложных систем в отсутствии наблюдаемых переменных. Идея состоит в том, чтобы использовать комбинаторную оптимизацию на основе спектральной теории графов для генерации данных из качественной нестохастической причинной модели и реконструировать матрицу смежности, используя эти данные.

Процесс заключается в том, чтобы получить модель с определенным спектральным разложением, которое реализует основную функцию моделируемой системы и охватывает важные структуры модели, для решения проблемы управления в этой системе. На основе этой концепции предлагается новый метод реконструкции матрицы смежности, реализованный на соответствующей матрице причинного распространения или передаточной матрице. В этом случае собственные векторы идентифицируются как ключевые цели процесса реконструкции матрицы, что постулирует фундаментальный подход, основанный на спектральных свойствах графа, а спектры графа «содержат всю информацию о системе» [12].

2. Обзор публикаций по теме исследования. В настоящее время восстановление сетевой структуры из данных временных рядов стало актуальной проблемой в области эволюционных игр [5, 6], сетей распространения [7], финансовых сетей [8], социальных сетей [9, 10], сетей экспрессии генов [11], физики [12] и в других областях.

Был предложен ряд методов для восстановления сложных сетей, таких как определение структуры сети на основе реакции узлов на внешние возмущения [13], построение зеркальной системы на основе синхронизации, которая может

сходиться к исходной системе для вывода структура сети [14], и восстановление структуры сети на основе корреляции шума [15], обратный инжиниринг [16], обобщенные линейные модели [17], сжатие [18] и др.

В работах по линейной алгебре рассмотрены частные задачи реконструкции сети на знаковых нециклических невзвешенных графах [19–23], что означает, что данная область исследований находится на начальной стадии.

Анализ математических подходов и алгоритмов в задачах реконструкции сети выявило следующие перспективные методы для рассматриваемого случая: метод матричной факторизации [10], положительные полуопределенные ограничения на матрицу переменных [24], метод минимизации матричной нормы методом множителей Лагранжа [25], матрица передаточной функции [26].

Однако следует отметить, что единой исследовательской парадигмы для реконструкции сети (даже на основе данных) не существует. Таким образом, решенные задачи реконструкции матрицы смежности графовой модели в отсутствии наблюдаемых переменных требует применения новых подходов и решений.

3. Описание метода.

3.1. Задача реконструкции матрицы смежности в обобщенной постановке. Здесь мы представляем постановку задачи управления (прямую и обратную) для причинных моделей сложных систем в отсутствии наблюдаемых переменных. Мы рассматриваем нестохастические каузальные модели, которые имеют (1) качественную и нечисловую природу узлов и связей; (2) ненаблюдаемые переменные; (3) плохоформализуемые узлы; and (4) отсутствие и невозможность получения данных временных рядов. Эти характеристики требуют рассматривать задачу управления в параметрах воспроизводимого тренда для состояний узлов модели, в отличие от традиционных подходов, когда прогнозируются физические (наблюдаемые и измеряемые) показатели состояний концептов модели.

Мы исследуем процесс принятия решений с позиций выбора управляющих воздействий лицом, принимающим решения. Учитывая вышеприведенное, далее рассматривается задача реконструкции матрицы смежности в обобщенной постановке на основе следующей модели управления.

Рассмотрим граф $G = \langle W, E \rangle$, представляющий качественную СМ, где $W = \{W_1, W_2, \dots, W_N\}$ – набор вершин; $E \in W \times W$ – набор дуг. Граф определяется матрицей смежности \mathbf{A}^T , где $a_{i,j}; 1 \leq i, j \leq n$ – весовой элемент матрицы $\mathbf{A} = (a_{i,j})_{n \times n}$. Рассмотрим следующую модель управления:

$$\xi_i^{s+1} = \xi_i^s + u_i^s + \delta \sum_{j=1}^n a_{i,j} (\xi_j^s - \xi_j^{s-1}), \quad 1 \leq i \leq n, \quad s \geq 1, \quad (1)$$

где n – количество вершин сети; δ – коэффициент демпфирования; ξ_i^s – состояние i -й вершины в момент времени t_s ; u_i^s – внешнее управляющее воздействие на вершину i в интервале времени $t_s \leq t < t_{s+1}$; $a_{i,j}$ – вес на дуге. Значение веса выражает силу причинности, с которой управляющее воздействие распространяется от вершины j к вершине i . Управляющее воздействие $u_i^s = u_i$ ($1 \leq i \leq n$) не зависит от s . Тогда вектор $\mathbf{x} = (x_i)_n$ представляет собой воспроизводимый тренд, компоненты которого также не зависят от s :

$$x_i = \xi_i^{s+1} - \xi_i^s = \xi_i^s - \xi_i^{s-1}, \quad 1 \leq i \leq n. \quad (2)$$

Исходя из изложенного выше, модель управления $\mathcal{H} := (\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, \delta)$ задается следующей системой линейных уравнений (СЛАУ):

$$(\mathbf{I} - \delta \mathbf{A}) \mathbf{x} = \mathbf{u}, \quad (3)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица; $\mathbf{u} = (u_i)_n$ – вектор воздействия; $\mathbf{x} = (x_i)_n$ – вектор отклика. С учетом модели управления (3), для получения пары векторов \mathbf{x} и \mathbf{u} , выражающих эффективное управление, необходимо оптимизировать следующую задачу нелинейной оптимизации:

$$\frac{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}{\mathbf{u}^T \mathbf{u}} = \frac{\|\mathbf{x}\|^2}{\|\mathbf{u}\|^2} = \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}{\mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x}} \rightarrow \max, \quad (4)$$

где $\mathbf{B} = (\mathbf{I} - \delta \mathbf{A})^T (\mathbf{I} - \delta \mathbf{A})$ – матрица квадратичной формы.

Обозначим $N^{(0)}$, $N^{(+)}$, $N^{(-)}$ как множество индексов вершин с ограничениями на управляющие воздействия \mathbf{u} , где $N^{(0)} = \{i \mid u_i = 0; 1 \leq i \leq n\}$ – множество индексов вершин, на которых управляющее воздействие не может быть оказано (по природе этой вершины); $N^{(+)} = \{j \mid u_j \geq 0; 1 \leq j \leq n\}$ и $N^{(-)} = \{k \mid u_k \leq 0; 1 \leq k \leq n\}$ – множество индексов вершин с ограничениями на направление управляющих воздействий (положительное или отрицательное, соответственно). Матрица ограничений $\mathbf{N} = (\mathbf{n}_1 \ \mathbf{n}_2 \ \dots \ \mathbf{n}_L)$ имеет $L = |N^{(0)}| + |N^{(+)}| + |N^{(-)}|$ столбцов и n строк, где j -й столбец матрицы \mathbf{N} определяется как $\mathbf{n}_j = \pm \delta_j^i$, где $\delta_j^i = [i = j]$ – дельта Кронекера, равная $n_j^i = \delta_j^i$ при $j \in N^{(0)}$, $j \in N^{(+)}$, и $n_j^i = -\delta_j^i$ при $j \in N^{(-)}$. Учитывая (3), запишем ограничения в матричной нотации $\mathbf{C} = (\mathbf{N}^T \mathbf{N})^{-1} \mathbf{N}^T (\mathbf{I} - \delta \mathbf{A})$.

Задача (4) сводится к задаче квадратичного программирования (5) относительно вектора \mathbf{x} (или \mathbf{u}) при линейных ограничениях $\mathbf{C} \mathbf{x} \geq \mathbf{0}$ и условии нелинейной нормировки $\mathbf{x}^T \mathbf{x} = 1$:

$$\mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} \rightarrow \min, \quad \mathbf{x}^T \mathbf{x} = 1, \quad \mathbf{C} \mathbf{x} \geq \mathbf{0}. \quad (5)$$

Получаем $\{\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k\}$, $1 \leq k \leq m$ что удовлетворяет условиям ортогональности $(\mathbf{u}^l)^T \mathbf{u}^k = 0$, $l \neq k$, $1 \leq k, l \leq m$, где k, l (в верхнем индексе) – индексы ортогональных управлений, m – количество ортогональных управлений. Эти решения могут представлять самостоятельный интерес. Кроме того, получение нескольких последовательностей решений необходимо для уверенного выбора нужной пары векторов в случае относительно жестких условий $\mathbf{C} \mathbf{x} \geq \mathbf{0}$. В этом случае для задачи (5) получаем последовательность задач (6):

$$(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{B} \mathbf{x}^k \rightarrow \min, \quad (\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k = 1, \quad \mathbf{C}_k \mathbf{x}^k \geq \mathbf{0}, \quad 1 \leq k \leq m, \quad (6)$$

где $(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{x}^k = 1$ – нелинейные ограничения; $(\mathbf{u}^l)^T \mathbf{u}^k = (\mathbf{x}^l)^T \mathbf{B} \mathbf{x}^k = 0$ – условия ортогональности, последовательно расширяющие систему ограничений $\mathbf{C}_k \mathbf{x}^k \geq \mathbf{0}$.

Сформулируем задачу восстановления матрицы смежности, которая имеет m пар векторов откликов и воздействий $\{\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k\}$ ($1 \leq k \leq m$).

По определению, $\mathbf{Z} = \mathbf{I} - \delta \mathbf{A}$, где $\mathbf{Z} = (z_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n}$ – передаточная матрица. Подставляя $\mathbf{Z}\mathbf{x}$ для \mathbf{u} в (4) и учитывая, что $\|\mathbf{Z}\|$ – матричная норма, согласованная с векторной нормой $\|\mathbf{x}\|$, получаем задачу оптимизации для \mathbf{Z} :

$$\frac{\|\mathbf{x}\|^2}{\|\mathbf{u}\|^2} = \frac{\|\mathbf{x}\|^2}{\|\mathbf{Z}\mathbf{x}\|^2} \geq \frac{\|\mathbf{x}\|^2}{\|\mathbf{Z}\|^2 \|\mathbf{x}\|^2} = \frac{1}{\|\mathbf{Z}\|^2} \rightarrow \max, \quad (7)$$

Задача (7) в форме задачи квадратичного программирования имеет вид:

$$\|\mathbf{Z}\|^2 \rightarrow \min, \quad \mathbf{S} \leq \mathbf{Z} \leq \mathbf{T}, \quad \mathbf{Z}\mathbf{X} = \mathbf{U}, \quad (8)$$

где $\mathbf{S} = (s_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n}$ – матрица нижних границ для ограничений переменных ($s_{i,j} \leq z_{i,j}$, $1 \leq j \leq n$); $\mathbf{T} = (t_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n}$ – матрица верхних границ для переменных ($z_{i,j} \leq t_{i,j}$, $1 \leq j \leq n$), $\mathbf{U} = (u_{i,k})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq m}$ и $\mathbf{X} = (x_{i,k})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq m}$ – матрицы векторов воздействий и откликов (k -й столбец $\mathbf{u}^k = (u_{1,k} \ u_{2,k} \ \dots \ u_{n,k})^T$ матрицы \mathbf{U} , и k -й столбец $\mathbf{x}^k = (x_{1,k} \ x_{2,k} \ \dots \ x_{n,k})^T$ матрицы \mathbf{X} составляет k -ю пару векторов воздействий и откликов). Задача (8) решается для n параллельных задач с функцией Лагранжа. Необходимые условия минимума i -й задачи составляют итерационную схему по Бергсекасу [27]:

$$\begin{cases} (1 + \alpha) \hat{\mathbf{z}}_i - \mathbf{y}_i \mathbf{X}^T - \hat{\mathbf{w}}_i + \hat{\bar{\mathbf{w}}}_i = \alpha \mathbf{z}_i, \\ \mathbf{u}_i - \mathbf{z}_i \mathbf{X} = \mathbf{0}, \\ \begin{cases} \hat{\bar{w}}_{i,j} = 0, & \text{if } z_{i,j} < t_{i,j} - \bar{w}_{i,j}/p, \\ \hat{z}_{i,j} = t_{i,j}, & \text{if } z_{i,j} \geq t_{i,j} - \bar{w}_{i,j}/p, \end{cases} & \text{if } |z_{i,j} - s_{i,j}| > |t_{i,j} - z_{i,j}|, \\ \begin{cases} \hat{w}_{i,j} = 0, & \text{if } z_{i,j} > s_{i,j} + w_{i,j}/p, \\ \hat{z}_{i,j} = s_{i,j}, & \text{if } z_{i,j} \leq s_{i,j} + w_{i,j}/p, \end{cases} & \text{if } |z_{i,j} - s_{i,j}| \leq |t_{i,j} - z_{i,j}|, \end{cases} \end{cases} \quad 1 \leq i, j \leq n, \quad (9)$$

где $\mathbf{z}_i = (z_{i,1} \ z_{i,2} \ \dots \ z_{i,n})$, $\mathbf{s}_i = (s_{i,1} \ s_{i,2} \ \dots \ s_{i,n})$, $\mathbf{t}_i = (t_{i,1} \ t_{i,2} \ \dots \ t_{i,n})$, $\mathbf{u}_i = (u_{i,1} \ u_{i,2} \ \dots \ u_{i,m})$ и $\mathbf{x}_i = (x_{i,1} \ x_{i,2} \ \dots \ x_{i,m})$ – i -е строки матриц \mathbf{Z} , \mathbf{S} , \mathbf{T} , \mathbf{U} и \mathbf{X} ; $\mathbf{y}_i = (y_{i,1} \ y_{i,2} \ \dots \ y_{i,m})$ и $\mathbf{w}_i = (w_{i,1} \ w_{i,2} \ \dots \ w_{i,n})$, $\bar{\mathbf{w}}_i = (\bar{w}_{i,1} \ \bar{w}_{i,2} \ \dots \ \bar{w}_{i,n})$ – векторы множителей Лагранжа, соответствующие ограничениям в форме равенств и в форме двусторонних неравенств, p – параметр квадратичного штрафа; α – параметр регуляризации по А.Н.Тихонову [28]. Поскольку решаются задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями, то правилом остановки является «уверенное» соблюдение всех ограничений и неотрицательность всех множителей Лагранжа, соответствующих ограничениям в виде неравенств, что контролируется булевой переменной q . Далее, чтобы найти \mathbf{A} , подставим \mathbf{Z} из решения (8) в уравнение $\mathbf{A} = \delta^{-1}(\mathbf{I} - \mathbf{Z})$ и решим относительно \mathbf{A} .

3.2. Алгоритм реконструкции матрицы в обобщенной постановке. Последовательность решений n параллельных задач оптимизационной задачи (8) реализуется алгоритм реконструкции матрицы на основе передачи причинных влияний (табл. 1). Введем следующие обозначения для каждой строки (\mathbf{z}_i ($1 \leq i \leq n$)) матрицы \mathbf{Z} :

m – количество векторных пар, используемых для задачи оптимизации;

ε – порог «уверенного» соблюдения ограничений из-за накопления ошибок округления при вычислениях с плавающей запятой;

$\mathbf{c} = (c_j)_{1 \leq j \leq n} = (c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n)$ – вектор обновленных значений элементов в строке \mathbf{z}_i ;

V – множество индексов столбцов в строке \mathbf{z}_i , соответствующий неактивным ограничениям переменных ($s_{i,j} < z_{i,j} < t_{i,j}$, $1 \leq j \leq n$), $V \subseteq \{1; 2; \dots; n\}$;

Q – множество индексов столбцов в строке \mathbf{z}_i , которые соответствуют активным ограничениям переменных ($z_{i,j} = s_{i,j}$ или $z_{i,j} = t_{i,j}$, но одновременно только в случае $s_{i,j} = t_{i,j}$, $1 \leq j \leq n$), $Q \subseteq \{1; 2; \dots; n\}$;

$\tilde{\mathbf{X}} = (x_{j,k})_{j \in V, 1 \leq k \leq m}$ – матрица, состоящая из строк $\mathbf{x}_j = (x_{j,1} \quad x_{j,2} \quad \dots \quad x_{j,m})$ матрицы \mathbf{X} , которая соответствует неактивным ограничениям переменных ($s_{i,j} < z_{i,j} < t_{i,j}$, $1 \leq j \leq n$);

$\mathbf{b} = (b_j)_{1 \leq k \leq m} = (b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_m)$ – вектор правой части двойственной задачи;

$\mathbf{y} = (y_j)_{1 \leq k \leq m} = (y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_m)$ – вектор множителей Лагранжа, соответствующий столбцам ограничений $\mathbf{u}_i = (u_{i,j})_{1 \leq j \leq m} = (u_{i,1} \quad u_{i,2} \quad \dots \quad u_{i,m})$ в форме равенств $\mathbf{Z}\mathbf{X} = \mathbf{U}$ ($\mathbf{z}_i\mathbf{X} = \mathbf{u}_i$, $1 \leq i \leq n$);

$\mathbf{x}_j\mathbf{y}^T = \sum_{k=1}^m x_{j,k} y_k$ – скалярное произведение;

α – параметр регуляризации по А.Н.Тихонову [28];

o – логическая переменная продолжения цикла.

Когда множества V и Q получены, Q является дополнением V до множества всех индексов $V \cup Q = \{1; 2; \dots; n\}$.

Таблица 1

Алгоритм реконструкции матрицы на основе передачи причинных влияний (APM)

1:	Input: $n, m, \mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{U}, \mathbf{X}, p, \varepsilon, \alpha$;
2:	for $i := 1$ to n do
3:	$\mathbf{z}_i \leftarrow (0 \quad 0 \quad \dots \quad 0)$; $\mathbf{w} \leftarrow (0 \quad 0 \quad \dots \quad 0)$;
4:	$\alpha + 1.0$;
5:	$o \leftarrow TRUE$;

6:	$\alpha \leftarrow \sqrt{MaxFloat} \sim 10^{19}$
7:	while (o)
8:	$\mathbf{c} \leftarrow (0 \ 0 \ \dots \ 0); \mathbf{y} \leftarrow (0 \ 0 \ \dots \ 0);$
9:	$Q \leftarrow \{j (z_{i,j} \leq s_{i,j} + w_j/p) \vee (z_{i,j} \geq t_{i,j} - w_j/p)\};$
10:	$V \leftarrow \{1, 2, \dots, n\} \setminus Q;$
11:	if $V \neq \emptyset$ then
12:	$\forall 1 \leq j \leq m : b_j \leftarrow (1 + \alpha) \left(u_{i,j} - \sum_{k \in Q} c_k x_{k,j} \right) - \alpha \sum_{k \in V} z_{i,k} x_{k,j};$
13:	$\mathbf{y} \leftarrow \mathbf{b}(\tilde{\mathbf{X}}^T \tilde{\mathbf{X}})^{-1};$
14:	$\forall j \in V : c_j \leftarrow (1 + \alpha)^{-1} (\alpha z_{i,j} + \mathbf{x}_j \mathbf{y}^T);$
15:	endif
16:	$\forall j \in Q : w_j \leftarrow \begin{cases} (1 + \alpha) s_{i,j} - \alpha z_{i,j} - \mathbf{x}_j \mathbf{y}^T, & \text{if } z_{i,j} \leq s_{i,j} + w_j/p; \\ \alpha z_{i,j} + \mathbf{x}_j \mathbf{y}^T - (1 + \alpha) t_{i,j}, & \text{if } z_{i,j} \geq t_{i,j} - w_j/p \end{cases};$
17:	$o \leftarrow FALSE;$
18:	if ($\exists 1 \leq j \leq n : (c_j < s_{i,j} - \varepsilon) \text{OR} (c_j > t_{i,j} + \varepsilon) \text{OR} (w_j < -\varepsilon)$) then
19:	$o \leftarrow TRUE;$
20:	endif
21:	$\mathbf{z}_i \leftarrow \mathbf{c};$
22:	$\alpha \leftarrow 0.5\alpha;$
23:	endwhile
24:	endfor
25:	Output: Z .

4. Эксперимент. Реализуемость предлагаемого подхода была проверена на тестовых примерах, параметры которых приведены в таблице 2. Мы провели численный эксперимент и сравнили результаты по коэффициентам схожести для полученных результатов по вектору отклика, вектору воздействия и собственно реконструированной матрицы. Матрица реконструировалась при ограничениях для узлов на параметры функционирования модели (столбцы 6 и 7 табл. 2) в заданном диапазоне изменений значений элементов матрицы (столбец 8 табл. 2). Как показано в табл. 3, алгоритм реконструировал матрицы в заданных параметрах с допустимыми показателями схожести. Коэффициент схожести рассчитывался путем вычисления проекции соответствующего результирующего вектора на исходный вектор.

Таблица 2

Параметры тестовых моделей

№	Источник	Наименование модели	Демпинг-фактор δ	Ограничения для узлов на параметры функционирования модели:		Ограничения на диапазон значений весов на дугах
				$u_i = 0$	$x_i \leq 0$	
1	2	3	5	6	7	8
1.	[29]	Преступление и наказание, 7x7	1,0	3	4, 6, 7	$b = 0,5$ ¹ $c = 1,5$ ²
2.	[30]	Южная Корея, 31x31	0,4	8, 20, 23, 29, 30	-	
3.	[31]	Обмен информацией в ритейле, 41x41	0,25	30	7, 9, 29, 37	
4.	[32]	Корпоративный менеджмент, 75x75	0,2	1,2,59,60,62,63, 65-75		
5.	[33]	Инженерное образование, 15x15.	0,2	6,7,13,15	12	

¹ b – коэффициент нижней границы ограничений для значений переменных

² c – коэффициент верхней границы ограничений для значений переменных

Таблица 3

Результаты, полученные для тестовых моделей

№	Источник	Наименование модели	Коэффициент схожести		
			вектора отклика	вектора управления	реконструированной матрицы
1	2	3	6	7	8
6.	[29]	Преступление и наказание, 7x7	0,998578	0,978479	0,909535
7.	[30]	Южная Корея, 31x31	0,999772	0,998739	0,957863
8.	[31]	Обмен информацией в ритейле, 41x41	0,998603	0,993521	0,950762
9.	[32]	Корпоративный менеджмент, 75x75	0,999681	0,996544	0,976193
10.	[33]	Инженерное образование, 15x15.	0,999572	0,994686	0,917693

5. Анализ полученных результатов. Оценка технических параметров алгоритма приведена ниже.

5.1. Теорема сходимости итерационного процесса алгоритма реконструкции матрицы. Задача минимизации матричной нормы, согласованной с Евклидовой векторной нормой распадается на n задач для каждой строки \mathbf{z}_i , $1 \leq i \leq n$ матрицы \mathbf{Z} :

$$\|\mathbf{z}_i\|^2 \rightarrow \min; \mathbf{z}_i \mathbf{X} = \mathbf{u}_i; \mathbf{s}_i \leq \mathbf{z}_i \leq \mathbf{t}_i. \quad (10)$$

Функция Лагранжа для задачи (10) имеет вид

$$L = \frac{1}{2} \|\mathbf{z}_i\|^2 + (\mathbf{u}_i - \mathbf{z}_i \mathbf{X}) \mathbf{y}_i + (\mathbf{s}_i - \mathbf{z}_i) \boldsymbol{\mu}_i^{(-)} + (\mathbf{z}_i - \mathbf{t}_i) \boldsymbol{\mu}_i^{(+)} \rightarrow \min .$$

Решение задачи (10) может быть найдено с помощью следующего итерационного процесса

$$\begin{cases} (1 + \alpha) \hat{\mathbf{z}}_i^T - \mathbf{X} \hat{\mathbf{y}}_i - \hat{\boldsymbol{\mu}}_i^{(-)} + \hat{\boldsymbol{\mu}}_i^{(+)} = \alpha \mathbf{z}_i^T, \\ \mathbf{u}_i - \hat{\mathbf{z}}_i \mathbf{X} = \mathbf{0}, \\ \begin{cases} \hat{\boldsymbol{\mu}}_{k,i}^{(-)} = 0, & \text{if } z_{i,k} > s_{i,k} + \boldsymbol{\mu}_{k,i}^{(-)} / p, \\ \hat{z}_{i,k} = s_{i,k}, & \text{if } z_{i,k} \leq s_{i,k} + \boldsymbol{\mu}_{k,i}^{(-)} / p, \end{cases} & \text{if } z_{i,k} \leq \frac{1}{2} (s_{i,k} + t_{i,k}), \\ \begin{cases} \hat{\boldsymbol{\mu}}_{k,i}^{(+)} = 0, & \text{if } z_{i,k} < t_{i,k} - \boldsymbol{\mu}_{k,i}^{(+)} / p, \\ \hat{z}_{i,k} = t_{i,k}, & \text{if } z_{i,k} \geq t_{i,k} - \boldsymbol{\mu}_{k,i}^{(+)} / p, \end{cases} & \text{if } z_{i,k} > \frac{1}{2} (s_{i,k} + t_{i,k}). \end{cases} \quad (11)$$

Теорема 1. Если набор индексов $A_{r+1} = \{k | z_{i,k}^{(r)} \leq s_{i,k} + \boldsymbol{\mu}_{i,k}^{(r)} / p\} \cup \{k | z_{i,k}^{(r)} < t_{i,k} + \boldsymbol{\mu}_{i,k}^{(r)} / p\}$ ограничений в виде неравенств оценивается как неактивный, то итерационный процесс (11) сходится в области безусловной оптимизации к решению $\tilde{\mathbf{z}}_i$ задачи (10) не медленнее, чем со скоростью геометрической прогрессии.

Доказательство. Пусть приближение $\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r+1)}$ на итерации $r+1$ состоит только из компонент, которые не обретают свои значения из активных ограничений $z_{i,k}^{(r+1)} = s_{i,k}$ или $z_{i,k}^{(r+1)} = t_{i,k}$. Такой вектор удовлетворяет уравнению:

$$(1 + \alpha) \tilde{\mathbf{z}}_i^{(r+1)} = (\mathbf{y}_i^{(r+1)})^T \tilde{\mathbf{X}}^T + \alpha \tilde{\mathbf{z}}_i^{(r)}.$$

Решение $\tilde{\mathbf{z}}_i$ задачи (A) из тех же компонент удовлетворяет аналогичному уравнению, так что их разность удовлетворяет уравнению (матрица $\tilde{\mathbf{X}}$ состоит из соответствующих строк):

$$(1 + \alpha) (\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i) = (\mathbf{y}_i^{(r+1)} - \mathbf{y}_i)^T \tilde{\mathbf{X}}^T + \alpha (\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r)} - \tilde{\mathbf{z}}_i). \quad (12)$$

Отделим компоненты, получающие значения $z_{i,k}^{(r+1)} = s_{i,k}$ или $z_{i,k}^{(r+1)} = t_{i,k}$ из активных ограничений, путем корректировки правой части \mathbf{u}_i в уравнении:

$$\mathbf{z}_i^{(r+1)} \mathbf{X} = \mathbf{u}_i,$$

где разность приближения $\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r+1)}$ и решения $\tilde{\mathbf{z}}_i$ удовлетворяет уравнению:

$$(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i) \tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{0}. \quad (13)$$

Подставляя соотношение (12) в (13), получим:

$$(1 + \alpha) (\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i) \tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{0} = (\mathbf{y}_i^{(r+1)} - \mathbf{y}_i)^T \tilde{\mathbf{X}}^T \tilde{\mathbf{X}} + \alpha (\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r)} - \tilde{\mathbf{z}}_i) \tilde{\mathbf{X}},$$

Из этого следует, что

$$(\mathbf{y}_i^{(r+1)} - \mathbf{y}_i)^T = -\alpha (\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r)} - \tilde{\mathbf{z}}_i) \tilde{\mathbf{X}} (\tilde{\mathbf{X}}^T \tilde{\mathbf{X}})^{-1},$$

$$(1 + \alpha)(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i) = -\alpha(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)\tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T + \alpha(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r)} - \tilde{\mathbf{z}}_i) = \alpha(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)\left(\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\right).$$

В итоге получаем:

$$\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i = (1 + \alpha)^{-1}\alpha(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(r)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)\left(\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\right).$$

Представим норму разницы в следующем виде:

$$\begin{aligned} \|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i\|^2 &= (\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)^T = \\ &= (1 + \alpha)^{-2}\alpha^2(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)\left(\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\right)\left(\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\right)^T(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)^T = \\ &= (1 + \alpha)^{-2}\alpha^2(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)\left(\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\right)\left(\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\right)(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)^T = \\ &= (1 + \alpha)^{-2}\alpha^2(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)\left(\mathbf{E} - 2\tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T + \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\right)(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)^T = \\ &= (1 + \alpha)^{-2}\alpha^2(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)\left(\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\right)(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i)^T \leq (1 + \alpha)^{-2}\alpha^2\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i\|\|\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\|\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i\|. \end{aligned}$$

Если, применительно к единственной паре векторов воздействия и отклика, выдерживается условие нормирования $\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{x}^T\mathbf{x} = 1$, то матричная норма $\|\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\|$ может быть оценена явно в следующем виде:

$$\|\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{X}}(\tilde{\mathbf{X}}^T\tilde{\mathbf{X}})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}^T\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n x_i^2 x_k^2 - 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + n} = \sqrt{n-1}.$$

Таким образом, мы имеем:

$$\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i\| \leq (1 + \alpha)^{-1}\alpha\sqrt{n-1}\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i\|.$$

Если выбрать $0 < \alpha < 1/\sqrt[4]{n}$, то $0 < (1 + \alpha)^{-1}\alpha\sqrt{n-1} \leq q < 1$ независимо от s , что означает сходимость приближения к решению не медленнее, чем со скоростью геометрической прогрессии:

$$\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i\| \leq q\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(s)} - \tilde{\mathbf{z}}_i\|, \quad 0 < q < 1.$$

Доказательство завершено.

Замечание. Заметим, что при $\alpha = 0$ выход в область безусловной оптимизации означает воспроизводство последней итерации, как это имеет место для задач квадратичного программирования с линейными ограничениями.

5.2. Автоматизация установки параметра регуляризации в задаче оптимизации. Выбор и настройка подходящего параметра регуляризации является сложной и трудоемкой задачей, требующий соответствующих профессиональных знаний. Предложенный алгоритм выполняет автоматическую операцию его подбора: $\alpha \leftarrow 0.5\alpha$. Параметр регуляризации имеет критическое значение для сходимости алгоритма в области безусловной оптимизации. При этом значение параметра α ограничено своим естественным порогом $\alpha \geq 0$ (Теорема 1). Стартовое значение α , при котором решение сходится, имеет сравнительно высокие значе-

ния ($10^5 - 10^{18}$). Однако эти значения могут определяться одной единственной из задач квадратичного программирования. Тем не менее, эти высокие значения имеют принципиальный характер. При уменьшении их вдвое сходимость существенно замедляется или может вообще отсутствовать (не достигается правило остановки). Поскольку решаются задачи квадратичного программирования, то количество итераций не превышает 10 итераций.

5.3. Время работы алгоритма. Для всех исследованных примеров на одном ядре Intel Pentium процессора CPU 4417U 2.300 ГГц время решения алгоритма не превышало 1 сек. для обеих стратегий (табл. 4). Это вполне приемлемо для принятия управленческих решений, не требующих сверхбыстрой реакции.

Таблица 4

Время работы алгоритма на тестовых моделях при разных стратегиях вычисления параметра регуляризации α

Модель	Размерность матриц	Достигнутое значение параметра регуляризации α	Время выполнения в сек. при стратегии	
			$\alpha = const$	$\alpha \neq const$
1	75×75	5·10 ⁵	0,1896	0,1898
2	31×31	5·10 ⁸	0,0351	0,0358
3	15×15	5·10 ⁵	0,0231	0,0239
4	7×7	5·10 ⁵	0,0502	0,0153
5	41×41	5·10 ⁵	0,1104	0,0632

Заключение. В настоящем исследовании мы показываем, что результаты вычислительных экспериментов решения задачи реконструкции матрицы смежности причинных графовых моделей в отсутствие наблюдаемых переменных с использованием разработанного алгоритма показали, что алгоритм эффективно реконструирует матрицы в заданных параметрах с допустимыми показателями схожести. Доказана сходимость приближения к решению алгоритма реконструкции матриц не медленнее, чем со скоростью геометрической прогрессии. С технической точки зрения, преимуществом алгоритма является реализация инструмента автоматической настройки параметра регуляризации α , пригодного для пользователей без предварительных математических знаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pearl J. Bayesianism and Causality, or, *Why I am Only a Half-Bayesian*, 2001, pp. 19-36.
2. Pandey B. et al. A comprehensive survey of edge prediction in social networks: Techniques, parameters and challenges, *Expert Syst. Appl.*, 2019, Vol. 124, pp. 164-181.
3. Delgado F.M., Gómez-Vela F. Computational methods for Gene Regulatory Networks reconstruction and analysis: A review, *Artif. Intell. Med.*, 2019, Vol. 95, pp. 133-145.
4. Wu X. et al. Analyses and applications of optimization methods for complex network reconstruction, *Knowledge-Based Syst.*, 2020, Vol. 193, pp. 105406.
5. Han X. et al. Robust Reconstruction of Complex Networks from Sparse Data, *Phys. Rev. Lett.*, 2015, Vol. 114, No. 2, pp. 028701.
6. Wang W.-X. et al. Network Reconstruction Based on Evolutionary-Game Data via Compressive Sensing, *Phys. Rev. X*, 2011, Vol. 1, No. 2, pp. 021021.
7. Shen Z. et al. Reconstructing propagation networks with natural diversity and identifying hidden sources, *Nat. Commun.*, 2014, Vol. 5, No. 1, pp. 4323.

8. Squartini T. et al. Reconstruction methods for networks: The case of economic and financial systems, *Phys. Rep.*, 2018, Vol. 757, pp. 1–47.
9. Shahrampour S., Preciado V.M. Topology Identification of Directed Dynamical Networks via Power Spectral Analysis, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2015, Vol. 60, No. 8, pp. 2260-2265.
10. Wang W. et al. Kernel framework based on non-negative matrix factorization for networks reconstruction and link prediction, *Knowledge-Based Syst.*, 2017, Vol. 137, pp. 104-114.
11. Wang Y.X.R., Huang H. Review on statistical methods for gene network reconstruction using expression data, *J. Theor. Biol.*, 2014, Vol. 362, pp. 53-61.
12. Napolitano D., Sauer T.D. Reconstructing the topology of sparsely connected dynamical networks, *Phys. Rev. E*, 2008, Vol. 77, No. 2, pp. 026103.
13. Timme M. Revealing Network Connectivity from Response Dynamics, *Phys. Rev. Lett.*, 2007, Vol. 98, No. 22, pp. 224101.
14. Yu D., Righero M., Kocarev L. Estimating Topology of Networks, *Phys. Rev. Lett.*, 2006, Vol. 97, No. 18, pp. 188701.
15. Zhang Z. et al. Reconstruction of dynamic networks with time-delayed interactions in the presence of fast-varying noises, *Phys. Rev. E*, 2019, Vol. 99, No. 4, pp. 042311.
16. Bongard J., Lipson H. Automated reverse engineering of nonlinear dynamical systems, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2007, Vol. 104, No. 24, pp. 9943-9948.
17. Li S. et al. Network reconstruction by linear dynamics, *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 2014, Vol. 404, pp. 118-125.
18. Barranca V.J., Zhou D., Cai D. Compressive sensing reconstruction of feed-forward connectivity in pulse-coupled nonlinear networks, *Phys. Rev. E*, 2016, Vol. 93, No. 6, pp. 060201.
19. Simić S.K., Stanić Z. Polynomial reconstruction of signed graphs, *Linear Algebra Appl.*, 2016, Vol. 501, pp. 390-408.
20. Simić S.K., Stanić Z. On the polynomial reconstruction of graphs whose vertex-deleted subgraphs have spectra bounded from below by -2 , *Linear Algebra Appl.*, 2008, Vol. 428, No. 8–9, pp. 1865-1873.
21. Sciriha I. Graphs with a common eigenvalue deck, *Linear Algebra Appl.*, 2009, Vol. 430, No. 1, pp. 78-85.
22. Wang W., Xu C.-X. Some results on the spectral reconstruction problem, *Linear Algebra Appl.*, 2007, Vol. 427, No. 1, pp. 151-159.
23. Bunimovich L., Shu L. Generalized eigenvectors of isospectral transformations, spectral equivalence and reconstruction of original networks, *Linear Algebra Appl.*, 2018, Vol. 551, pp. 104-124.
24. Xu K. et al. Discovering target groups in social networking sites: An effective method for maximizing joint influential power, *Electron. Commer. Res. Appl.*, 2012, Vol. 11, No. 4, pp. 318-334.
25. Wang C.-L., Li C., Wang J. Comparisons of several algorithms for Toeplitz matrix recovery, *Comput. Math. with Appl.*, 2016, Vol. 71, No. 1, pp. 133-146.
26. Kavanagh R.J. The application of matrix methods to multi-variable control systems, *J. Franklin Inst.*, 1956, Vol. 262, No. 5, pp. 349-367.
27. Bertsekas D.P. The Method of Multipliers for Equality Constrained Problems, *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Elsevier, 1982, pp. 95-157.
28. Tikhonov A., Arsenin V. Solutions of Ill-Posed Problems. New York: Wiley, 1977.
29. Pedrycz W., Homenda W. From Fuzzy Cognitive Maps to Granular Cognitive Maps, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 2014, Vol. 22, No. 4, pp. 859-869.
30. Kim D.-H. Cognitive Maps of Policy Makers on Financial Crises of South Korea and Malaysia: A Comparative Study, *Int. Rev. Public Adm.*, 2004, Vol. 9, No. 2, pp. 31-38.
31. Büyükoğuzkan G., Vardaloğlu Z. Analyzing of CPFR success factors using fuzzy cognitive maps in retail industry, *Expert Syst. Appl.*, 2012, Vol. 39, No. 12, pp. 10438-10455.
32. Tselykh A., Tselykh L. Methodology for comparative cognitive modeling based on the analysis of fuzzy target and control factors, *Izv. SFedU. Eng. Sci.*, 2015, Vol. 7 (168), pp. 101-115.
33. Poczeita K., Kubuś L., Yastrebov A. Analysis of an evolutionary algorithm for complex fuzzy cognitive map learning based on graph theory metrics and output concepts, *Biosystems*, 2019, Vol. 179, pp. 39-47.

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

Целых Александр Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: ant@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; д.т.н.; профессор.

Васильев Владислав Сергеевич – e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; тел.: +79185983647; кафедра ИАСБ; к.т.н.; доцент.

Целых Лариса Анатольевна – Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ); e-mail: l.tselykh58@gmail.com; г. Таганрог, Россия.; тел.: +79185695760; кафедра экономики и предпринимательства; к.э.н.; доцент.

Tselykh Alexander Nikolayevich – Southern Federal University; e-mail: ant@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; professor.

Vasilev Vladislav Sergeevich – e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; phone: +79185983647; the department IASB; dr. of eng. sc.; the senior lecturer.

Tselykh Larisa Anatolievna – Chekhov Taganrog Institute (branch) of Rostov State University of Economics; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79185695760; the department of Economics and business; dr. of ec. sc., the senior lecturer.

УДК 621.396.1

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-187-199

Т.В. Шушкевич, А.А. Морозов, И.И. Турулин

**АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ (ОКОН) И ИХ
АППРОКСИМАЦИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НА ИХ ОСНОВЕ
УПРАВЛЯЕМЫХ РЕКУРСИВНЫХ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ
С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ**

Существуют различные типы весовых функций, так называемых окон, при цифровой обработке сигналов, такие как прямоугольное (окно Дирихле), треугольное (окно Бартлетта), окно Валле – Пуссена, окно Кайзера – Бесселя, окна Барсилона – Темеша, окна Ханна, Бохмана, Блэкмана, Гаусса (Вейеритрасса), Дольфа – Чебышева, Хэмминга и многие другие и идеальные характеристики стандартных фильтров, таких как фильтры нижних и верхних частот, полосовые фильтры. Целью данной обзорной статьи является определение наиболее подходящей весовой функции для реализации на её основе управляемого рекурсивного фильтра нижних частот с конечной импульсной характеристикой. В данной статье представлен анализ лишь некоторых из вышеперечисленных окон и их аппроксимаций, а именно окна Дольфа – Чебышева, окна Гаусса (Вейеритрасса) и окна Хэмминга. Помимо анализа, был рассмотрен синтез рекурсивных цифровых фильтров с КИХ для весовой обработки данных на основе выбранных окон и их аппроксимаций. Рассмотрен метод синтеза окон Дольфа-Чебышева. Рассмотрена реализация окна Гаусса (Вейеритрасса). Рассмотрены способы аппроксимации окна Хэмминга и методы и несколько алгоритмов разработки фильтров с конечной импульсной характеристикой в виде данного окна. Проведено оценивание взаимосвязи между параметрами быстрых окон, выбранных для анализа, от максимального уровня боковых лепестков. На основе полученных данных были сделаны выводы по выбору наиболее подходящих и демонстрирующих наибольшее быстродействие окон, подходящих для реализации на её основе управляемого рекурсивного фильтра нижних частот с конечной импульсной характеристикой.

Цифровая обработка сигналов (ЦОС); весовая обработка сигналов; фильтр; весовая функция (окно); аппроксимация; импульсная характеристика (ИХ); амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); конечная импульсная характеристика (КИХ).

T.V. Shushkevich, A.A. Morozov, I.I. Turulin

ANALYSIS OF CERTAIN WEIGHT FUNCTIONS (WINDOWS) AND THEIR APPROXIMATIONS FOR IMPLEMENTATION OF CONTROLLED RECURSIVE LOW-PASS FILTERS WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE ON THEIR BASIS

There are various types of weighting functions, the so-called windows in digital signal processing, such as rectangular (Dirichlet window), triangular (Bartlett window), Vallee-Poussin window, Kaiser-Bessel window, Barsilon-Temesh window, Hann, Bohman, Blackman, Gauss (Weierstrass), Dolph - Chebyshev, Hamming windows and many others and ideal characteristics of standard filters such as low-pass, high-pass, bandpass filters. The purpose of this review article is to determine the most suitable weighting function for implementation on its basis of a controlled recursive low-pass filter with a finite impulse response. This article presents an analysis of only some of the above windows and their approximations, namely the Dolph - Chebyshev window, the Gauss (Weierstrass) window and the Hamming window. In addition to the analysis, the synthesis of recursive filters with a finite impulse response for weighting data based on the selected windows and their approximations was considered. The method of synthesis of Dolph-Chebyshev windows is considered. The implementation of the Gauss (Weierstrass) window is considered. Methods for approximating the Hamming window and methods and several algorithms for developing filters with FIR in the form of this window are considered. The estimation of parameters dependencies some quick window of the maximum level of the side lobes. Based on the data obtained, conclusions were drawn about the selection of the most suitable and demonstrating maximum performance windows, suitable for implementation on its basis of a controlled recursive low-pass filter with a finite impulse response.

Digital signal processing (DSP); weight processing of signals; filter; weight function (window); approximation; impulse response (IR); amplitude-frequency response (AFR); finite impulse response (FIR).

Введение. В современной технике, в том числе радиотехнике, используются управляемые цифровые фильтры [1]. Это, в первую очередь, различные адаптивные системы. Весовая обработка сигналов может выполняться при сглаживании данных, формировании характеристик направленности антенных решеток, а также как специфические фильтры нижних частот. Цифровые фильтры могут представлять собой алгоритм для реализации на универсальном, сигнальном процессорах либо специализированном микроэлектронном устройстве [2, 3].

Так же как и нерекурсивные, рекурсивные КИХ-фильтры могут обладать линейной фазочастотной характеристикой (ФЧХ), но при значительно уменьшенной вычислительной сложности, что важно при реализации на микроконтроллерах, ПЛИС, универсальных микропроцессорах, а также в виде специализированных микросхем. При всем этом требования к качеству АЧХ (уровень пульсаций в полосах заграждения и пропускания, коэффициент прямоугольности) таких фильтров зачастую невысоки, что обеспечивает возможность использования фильтров для весовой обработки с колоколообразными АЧХ [4–6].

Чаще используются окно Блэкмана-Харриса, окно Ханна или же окно Хэмминга. Они, как и другие, дают возможность понизить пульсации и выбросы, которые из-за явления Гиббса возникают при усечении идеальной импульсной характеристики [7–9].

Далее рассмотрим окно Дольфа-Чебышева, окно Гаусса (Вейерштрасса) и окно Хэмминга в качестве основы для реализации управляемого РКИХ фильтра.

Окно Дольфа-Чебышева. Рассмотрим проектирование антенн. Функция амплитудного распределения Дольфа-Чебышева представляет из себя результат, дающий наименьшую ширину основного лепестка при назначенном уровне боковых лепестков [10]. Непрерывное решение возникшей проблемы содержит в себе выбросы на границах, из-за чего имеется возможность выполнить её при помощи

разложения в ряд Тейлора в непрерывных окнах, но лишь примерно. Дискретное окно не обладает схожими ограничениями, благодаря чему может быть реализовано точно [10]. В ЦОС эта функция используется при присутствии близкорасположенных и удаленных помех, сравнимых по силе с мощностью сигнала. Частотная характеристика описывается выражением (1) [10–12]:

$$W(\omega) = \frac{\cos \left[(N-1) \arccos \left\{ \beta \cos \left(\frac{\omega T}{2} \right) \right\} \right]}{\operatorname{ch}[(N-1) \operatorname{arch}(\beta)]}, \quad (1)$$

где $\beta = \operatorname{ch} \left[\frac{\operatorname{arch}(10^\alpha)}{(N-1)} \right]$.

С помощью обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) представляется возможным получить временные отсчеты, если применить его к частотной характеристике, а после полученные отсчеты привести к норме по отношению к максимально возможной амплитуде.

α – логарифм отношения главного максимума АЧХ к уровню боковых. $\alpha = 3$ соответствует максимально возможному уровню боковых лепестков 60 дБ.

Воспользовавшись прореживанием изначальной импульсной характеристики и восстановлением ее с помощью двух фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ, структура которых представлена на рис. 1, получим частотную характеристику, описанную выражением (2).

$$W_{\text{РЕЗ}}(\omega) = \frac{1}{iT} \sum_{n=-\infty}^{\infty} W_{\text{ИСХ}} \left(\omega - \frac{2\pi n}{iT} \right) \cdot W_{\text{Д}}^2(\omega). \quad (2)$$

Логарифмические АЧХ быстрого окна (окно с малой вычислительной сложностью) $H(\omega)$ и окна Дольфа–Чебышева 55 порядка ($\alpha=2$) $W(\omega)$ продемонстрированы на рис. 2. Быстрое окно структурно получается каскадным соединением двух фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ 5-го порядка и фильтра, обладающего прореженной импульсной характеристикой с шагом прореживания, равным пяти.

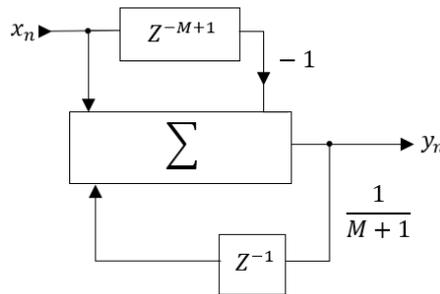


Рис. 1. Структурная схема фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ

Окна с АЧХ, схожей с равноволновой, удастся получить при небольших порядках фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ. На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) окна со структурной схемой, содержащей три фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ с длинами импульсных характеристик 5, 5 и 7, включенных каскадно [13–15]. Тем не менее в таких окнах уровень боковых лепестков менять не представляется возможным. Уровень боковых лепестков приблизительно равен – 40дБ.

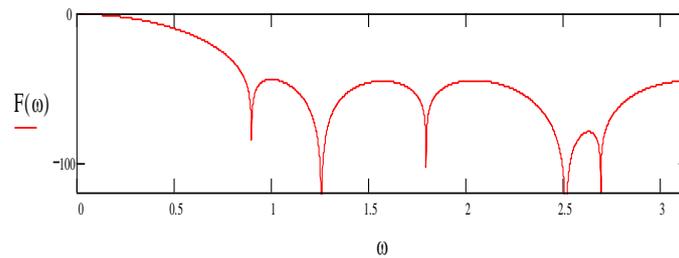


Рис. 2. АЧХ окна, структурная схема которого содержит три фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ, включенных каскадно

Окно Гаусса (Вейерштрасса). Окно Гаусса (Вейерштрасса) есть не что иное, как положительная гладкая функция с преобразованием Фурье, обладающим высокими и узкими главными лепестками [10]. Сигнал с его преобразованием Фурье синхронно ограничить не представляется возможным исходя из принципа неопределенности. $T_{cp} W_{cp} \geq \frac{1}{4\pi}$, где T_{cp} и W_{cp} – среднеквадратические длительность и полоса частот соответственно. Исходя из чего получаем, что достигается данное равенство лишь для импульса, имеющего гауссову огибающую. Следующим выражением (7) можно задать Окно Гаусса.

$$w(n) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\alpha \frac{n}{(N-1)/2}\right)^2\right], \quad n = -\frac{N-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2}. \quad (7)$$

Ширина спектра окна является величиной. Если ширина главного лепестка увеличивается, уровень боковых – падает.

Если при помощи вышеизложенного способа аппроксимировать окно Гаусса, шаг прореживания i будет обусловлен параметром α , потому что именно данный параметр фиксирует наивысший уровень боковых лепестков окна [16].

Логарифмические АЧХ окна Гаусса $W(\omega)$ 55-го порядка ($N=55$) и аппроксимирующего окна $H(\omega)$ продемонстрированы на рис. 3. Для данного случая шаг прореживания $i = 5$, параметр $\alpha = 2.5$ и кратность $r = N/i = 11$. Величина максимума боковых лепестков $W(\omega)$ составляет -44.2 дБ, а амплитуда максимального выброса $H(\omega)$ имеет значение в -45.2 дБ. Если говорить проще, амплитуду боковых лепестков $W(\omega)$ не должны превышать выбросы. Частота первого нуля аппроксимирующего окна опустилась. Её относительная погрешность теперь составляет 1.7%. Наблюдается относительное уменьшение энергии главного и боковых лепестков, имеющее значение в 2% и 35% соответственно. Но при этом длина КИХ аппроксимирующего окна повысится на $(i-1)=4$ дискреты.

На основе полученных данных, кратность должна быть не менее 11 для окна Гаусса с α 2 и 2.5. Другими словами, шаг прореживания i берётся как $i = N/11$. Как пример, первоначальную 33-элементную КИХ можно прореживать шагом $i = 3$, а шагом $i = 5$ – от 55 элементов и т.д.

При выбросы АЧХ аппроксимирующего меньше максимального уровня боковых лепестков исходных окон. Частота первого нуля аппроксимирующего окна стала меньше, а её относительная погрешность теперь составляет 1.5–2 %, наблюдается относительное снижение энергии главного лепестка и энергии бокового поля, составляющее 1.5–2 % и 35–57 % соответственно. Единовременное уменьшение энергии основного и боковых лепестков есть следствие того, что энергия исходного окна больше, чем у аппроксимирующего окна.

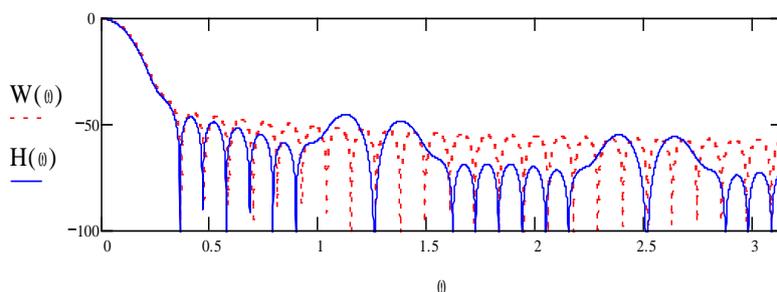


Рис. 3. Логарифмические АЧХ окна Гаусса $W(\omega)$ и аппроксимирующего окна $H(\omega)$

В конечном счете, кратность должна быть меньше для окон с $\alpha = 2$, если мы будем соблюдать только условие неперевышения максимума боковых лепестков. Между тем в прореженной импульсной характеристике с уменьшением числа дискрет структура боковых лепестков изменяется в полном объеме и растёт число выбросов АЧХ [16].

Также стоит отметить, что длина импульсной характеристики аппроксимирующего окна вырастает на величину $(i-1)$, если сравнивать с исходным окном.

При такой аппроксимации вычислительные затраты (вычислительная сложность) равняются $\left(\frac{N}{i} + 3\right)$ сложений и $\left(\frac{N/i + 1}{2}\right)$ умножений. При этом всем вы-

числительные затраты 2-ух каскадно включенных фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ, порядки которых равняются i , учитываются.

Окно Хэмминга. В весовой обработке сигналов зачастую применяют окно Дольфа–Чебышева или окно Хэмминга [17]. Окно Дольфа–Чебышева нереально аппроксимировать при значительных длинах КИХ с необходимой точностью и минимально возможными вычислительными затратами.

Разберём некоторые из способов аппроксимации окна Хэмминга [17–18].

Так как максимально возможный уровень боковых лепестков больше -50 дБ, то окно Хэмминга представляется возможным аппроксимировать достаточно просто. Хотя также можно представить и другие окна, которые имеют форму АЧХ, схожую с АЧХ окна Хэмминга [12]. При помощи следующего выражения (8) можно задать окно Хэмминга [10–11]:

$$w(n) = \alpha + (1 - \alpha) \cos\left(\frac{2\pi}{N-1} n\right), \quad n = -\frac{N-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2}. \quad (8)$$

При показателе $\alpha = \frac{25}{46} = 0.543478261$ возможно совершить идеальное подавление первого бокового лепестка при частоте $\omega T = 2.5 \frac{2\pi}{N-1}$. Ноль появляется

при $\omega T = 2.6 \left[\frac{2\pi}{N-1} \right]$, если α выставляют значение 0.54, благодаря чему достигается

значительное, хоть и неполное, понижение уровня первого бокового лепестка. Окно и будет окном Хэмминга при заданном α . Заданное значение α будет применяться в дальнейшем.

Логарифмическая АЧХ окна с малым первым боковым лепестком проиллюстрирована на рис. 4. Фильтры Хогенауэра с прямоугольной КИХ имеют порядки 13, 17, 17. В структурной схеме фильтры Хогенауэра с прямоугольной КИХ под-

ключены каскадно [13–15]. АЧХ представленного окна может использоваться для аппроксимации последнего, так как её форма аналогична АЧХ окна Хэмминга. Допустим, что мы знаем порядок окна Хэмминга, нужный нам для реализации весовой обработки, т.е. первый ноль устанавливаемой функции является известным. Данным предположением мы будем пользоваться и в дальнейшем.

Окна с подобными характеристиками возможно получить при использовании алгоритма [17–18]:

1. Указывается начальное (искомое) окно Хэмминга. Если же известен первый ноль АЧХ, то задаем его;

2. Для того, чтобы получить четное окно нужно, чтобы порядок искомого окна Хэмминга соответствовал условию $N=31+4n$, где $n \geq 0$ и целое. Вместе с тем образуются множества длин возможных импульсных характеристик. Каждое множество содержит по 7 элементов. К примеру, 1-ое множество $\{M_1\}$ находится благодаря формуле $N=31+4n$, где $0 \leq n \leq 6$, выходит $M_1=\{31, 35, 39, 43, 47, 51, 55\}$. Множество $\{M_2\}$ находится из той же формулы для $7 \leq n \leq 13$. Получаем, что множество $\{M_k\}$ можно найти по данной формуле для $7k \leq n \leq 7k+6$, при этом $k = 0, 1, 2, \dots$;

3. В каскадном соединении порядки двух звеньев устанавливаются как $M_2=M_3=(N-1)/2$;

4. Чтобы вычислить порядок 3-го звена нужно определить к какому множеству длина исходного окна Хэмминга относится. Порядок 1-го окна множества $\{M_k\}$ устанавливается как $(31+28k)$, $k \geq 0$ и целое. Множество, к которому относится длина искомого окна, разделяется на два подмножества: первое включает в себя три элемента, второе - четыре. Коэффициент первого подмножества рассчитывается по формуле $C_1=4(k+1)$, а для второго – $C_2=4(k+1)+2$. Для первого подмножества длина импульсной характеристики фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ вычисляется по формуле $M_1 = M_2 - C_1$, для второго, соответственно – $M_1=M_2-C_2$.

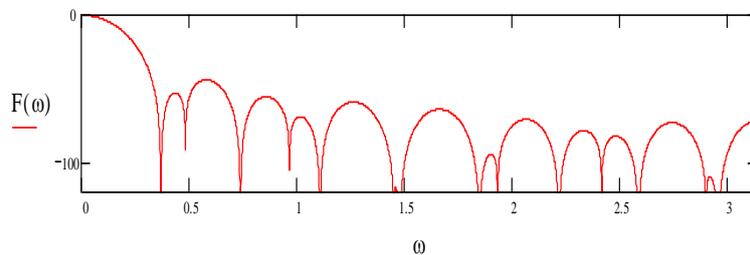
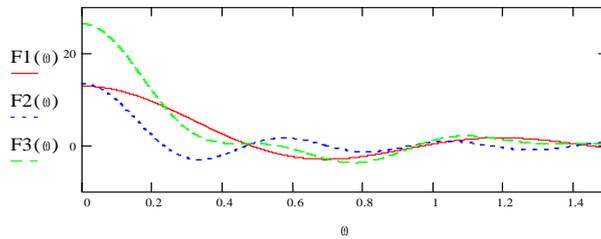


Рис. 4. Логарифмическая АЧХ окна с малым первым боковым лепестком

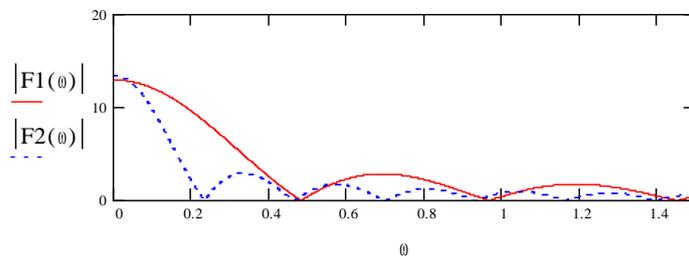
Чтобы получить окна с малым первым боковым лепестком, можно применить параллельно-каскадное соединение фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ [13–15].

Окно с малым первым боковым лепестком можно получить, если объединить параллельно два фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ, порядки которых различаются вдвое. Вдобавок нужно поставить масштабный множитель 0.5 перед звеном с большим порядком и подать на сумматор сигналы с выходов обоих фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ. Данная идея проиллюстрирована на рис. 5. На рис. 5,а $F_1(\omega)$ обозначает АЧХ фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ меньшего порядка (13), $F_2(\omega)$ является АЧХ фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ с учетом масштабного множителя 0.5 фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ большего порядка (27), а $F_3(\omega)$ представляет собой суммарную АЧХ. На рис. 5,б для наглядности продемонстрированы модули характеристик $F_1(\omega)$ и $F_2(\omega)$. Заметно,

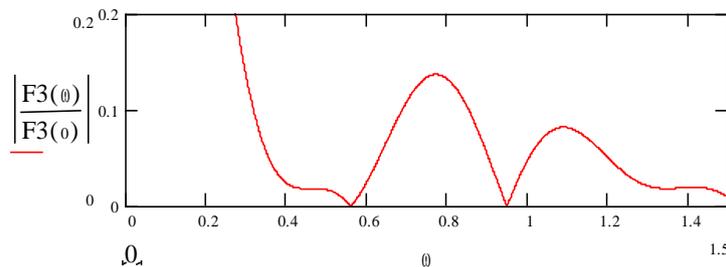
что их характеристики практически совпадают на конкретном участке, но у них разные знаки – из части основного лепестка характеристики $F1(\omega)$ вычитается первый боковой лепесток характеристики $F2(\omega)$. Итог такого сложения показан на рис. 5, в. Рис. 5 не имеет логарифмический масштаб, но характеристика $F3(\omega)$ нормирована. Перед первым боковым лепестком отлично показан промежуток характеристики. Затем через последовательное подключение с сумматором ещё одного фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ формируется первый малый боковой лепесток. Первый ноль фильтра должен попадать на начало пологого участка характеристики $F3(\omega)$. Возможно каскадно подключить еще один фильтр Хогенауэра с прямоугольной КИХ для понижения общего уровня боковых лепестков. Первая из аналогичных схем проиллюстрирована на рис. 6. Вычислительные затраты схем такого типа составляют для любых порядков фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ десять сложений и одно умножение. К этой схеме можно рекомендовать два алгоритма нахождения порядков фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ.



a – АЧХ фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ меньшего порядка $F1(\omega)$ и большего порядка $F2(\omega)$ и их суммарная АЧХ $F3(\omega)$



б – модули характеристик $F1(\omega)$ и $F2(\omega)$



в – результат сложения характеристик $F1(\omega)$ и $F2(\omega)$

Рис. 5. Параллельно-каскадное соединение фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ

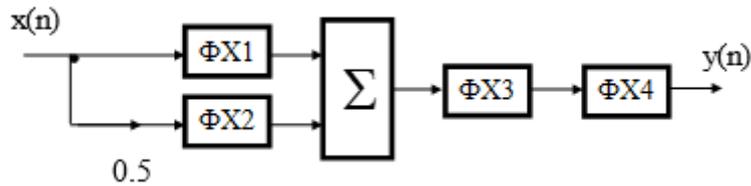


Рис. 6. Структурная схема параллельно-каскадного соединения фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ

Первый алгоритм [17–18]:

1. Сначала указывается длина N импульсной характеристики подлежащего аппроксимации окна Хэмминга;

2. Порядок первого фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ ($\Phi X1$) $M_1 = \lfloor 0.4 \cdot \lfloor N \rfloor_2 \rfloor_1$, где $\lfloor K \rfloor_1$ – операция взятия ближнего нечетного целого числа, меньшего или равного K ; $\lfloor N \rfloor_2$ – операция взятия ближнего четного целого числа, которое меньше N ;

3. Для второго фильтра Хогенауэра с прямоугольной КИХ ($\Phi X2$) $M_2 = 2M_1 + 1$. Перед данным звеном ставится множитель 0,5;

4. Последовательный третий фильтр Хогенауэра с прямоугольной КИХ ($\Phi X3$) – $M_3 = \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor_1$;

5. Последовательный четвертый фильтр Хогенауэра с прямоугольной КИХ ($\Phi X4$) – $M_4 = \left\{ \frac{M_1}{3} \right\}_1$, где $\{ \cdot \}_1$ – операция взятия ближнего нечетного целого числа.

АЧХ окна с порядками 23, 47, 29, 7, которое было построено по первому алгоритму, представлена на рис. 7.

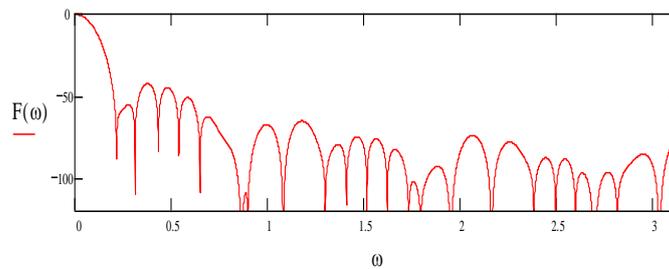


Рис. 7. АЧХ окна, построенного по первому алгоритму

Второй алгоритм по описанию аналогичен первому, поэтому далее будут представлены только выражения [17–18]:

$$1) M_1 = \lfloor 0.4 \cdot \lfloor N \rfloor_2 \rfloor_1 + 2;$$

$$2) M_2 = 2M_1 + 1;$$

$$3) M_3 = \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor_1;$$

$$4) M_4 = \left\{ \frac{M_1}{3} \right\}_1 + 4.$$

АЧХ окна с порядками 25, 51, 29, 9, которое было построено по второму алгоритму, представлена на рис. 8. Стоит сказать, что синтез окон по этим алгоритмам возможно выполнять и без использования N , поскольку третий фильтр Хогенауэра с прямоугольной КИХ устанавливает первый ноль АЧХ. Исходя из этого, можно рассчитать порядки фильтр Хогенауэра с прямоугольной КИХ, зная частоту этого нуля [19–20].

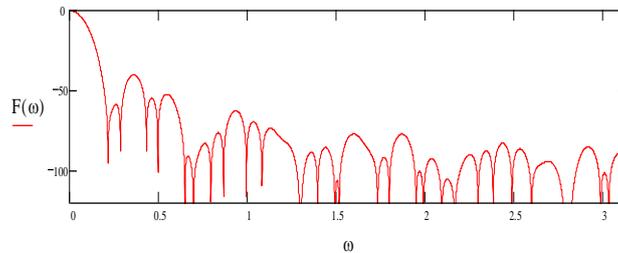


Рис. 8. АЧХ окна, построенного по второму алгоритму

Приведенную на рис. 6 схему можно слегка усложнить, добавив к ней третий параллельный фильтр Хогенауэра с прямоугольной КИХ. Этот фильтр с правильным множителем в дополнении будет убирать плоский участок характеристики $F_3(\omega)$. На рис. 9 этот фильтр 3-го порядка, а на рис. 10 – короткозамкнутая или пустая линия. У множителя имеются различные значения для окон разных порядков. Окна синтезированны в соответствии схеме с рис. 9 и по следующему алгоритму:

- 1) $M_1 = \lfloor 0.4 \cdot [N]_2 \rfloor_1$;
- 2) $M_2 = 2M_1 + 1$;
- 3) $M_3 = \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor_1$.

По сути своей алгоритм синтеза схож с алгоритмом для предыдущей схемы. На рис. 11 показана АЧХ окна с фильтрами Хогенауэра с прямоугольной КИХ с множителем $k = 0.181$ и порядками 13, 27, 17.

На рис. 12 отображена АЧХ окна, которое было построено по схеме рис. 11 с фильтрами Хогенауэра с прямоугольной КИХ, порядки которых равны 13, 27, 17, 9, а $k = 0.571$.

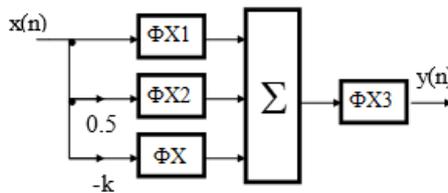


Рис. 9. Структурная схема параллельно-каскадного соединения фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ с фильтром третьего порядка

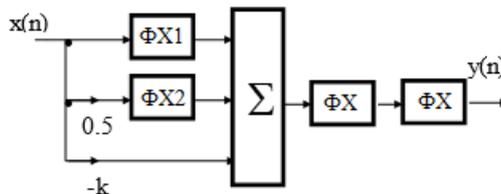


Рис. 10. Структурная схема параллельно-каскадного соединения фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ с пустой (короткозамкнутой) линией

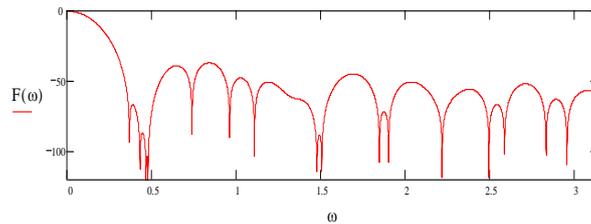


Рис. 11. АЧХ окна с фильтрами Хогенауэра с прямоугольной КИХ с множителем $k = 0.181$ и порядками 13, 27, 17

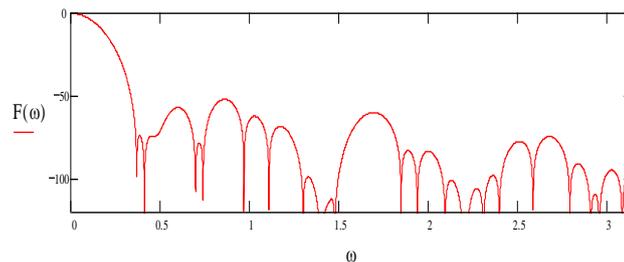


Рис. 12. АЧХ окна с фильтрами Хогенауэра с прямоугольной КИХ с множителем $k = 0.571$ и порядками 13, 27, 17, 9

Из продемонстрированных выше примеров видно, что вычислительные затраты неизменны для любой конкретной схемы соединения фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ вне зависимости от порядков результирующих окон, при этом они значительно меньше вычислительных затрат при применении аппроксимации с прореживанием и прямой реализации окна. Таким образом, для окна, которое получено последовательным соединением трех фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ, вычислительные затраты составили шесть сложений и одно или два масштабирования, если необходимо, на одну выходную дискрету. 10 сложений и 2 умножения + 1 или 2 масштабирования для схемы с рис. 10. 10 сложений и 2 умножения + от 1 до 3 масштабирования (зависит от разрядности входных чисел и порядков фильтров Хогенауэра с прямоугольной КИХ) для схемы с рис. 11. При всем этом амплитуда первого бокового лепестка может составлять $-45 \div -90$ дБ и ниже [17–18].

Выводы. По результатам проведения анализа весовых функций Дольфа – Чебышева, Гаусса и Хэмминга, стоит отметить, что для уменьшения вычислительных затрат способом прореживания выгодно аппроксимировать лишь те окна, которые имеют максимально возможный уровень боковых лепестков не менее -50 дБ, благодаря чему кратность r будет равняться 11, 15 или 30. Любую весовую функцию можно аппроксимировать с помощью фильтров Хогенауэра, если интересующими параметрами являются энергия бокового поля, максимальный уровень боковых лепестков, а не форма окна.

Схемы, которые осуществляют аппроксимацию окна Хэмминга каскадно-параллельным или каскадным способами, демонстрируют наивысшее быстроедействие.

Данный тип окон выгодно использовать для реализации на их основе управляемых рекурсивных КИХ-фильтров нижних частот для весовой обработки сигналов, поскольку частота среза фильтров определяется величиной задержки в цепях прямых связей фильтров Хогенауэра и примерно обратно пропорциональна этой задержке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Турулин И.И., Шушкевич Т.В. Основы цифровой обработки сигналов. – Таганрог: Изд-во Таганрог ин-та им. А.П. Чехова, 2015. – 88 с.
2. Турулин И.И., Олейникова Т.В. Быстродействующие рекурсивные фильтры с конечной импульсной характеристикой для весовой обработки. Деп. в ВИНТИ. – Таганрог: ТРТУ, 1998. – 26 с.
3. Олейникова Т.В., Турулин И.И. Реализация быстродействующих цифровых фильтров для весовой обработки сигналов // Тез. докл. всерос. науч. конф. “Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления”. – Таганрог, 1996. – С. 225.
4. Карташев В.Г. Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров. – М.: Высш. школа, 1982. – 109 с.
5. Турулин И.И. Метод проектирования рекурсивных фильтров общего вида с конечной импульсной характеристикой // Известия вузов. Электроника. – 2001. – № 6. – С. 97-98.
6. Турулин И.И. Расчет и применение быстродействующих цифровых рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой: монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 87 с.
7. Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.
8. Турулин И.И. Метод ограничения длины импульсной характеристики цифрового фильтра // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2000. – № 2. – С. 52-58.
9. Турулин И.И. Метод ограничения импульсной характеристики цифрового рекурсивного фильтра с помощью компенсирующих прямых связей // Радиотехника. – 2000. – № 11. – С. 36-39.
10. Хэррис Ф. Дж. Использование окон при гармоническом анализе метода дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66, № 1. – С. 60-96.
11. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
12. Буренин Н.И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. – М.: Сов. радио, 1972. – 160 с.
13. Турулин И.И. Метод каскадно-параллельной реализации цифровых рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой // Автометрия. – 2002. – № 3. – С. 113-118.
14. Турулин И.И. Каскадно-децимарная реализация цифровых фильтров с периодической импульсной характеристикой // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2000. – № 1. – С. 26-36.
15. Турулин И.И., Верич Ю.Б. Применение системы MATLAB для синтеза узкополосных нерекурсивных фильтров // Цифровая обработка сигналов. – 2003. – № 3. – С. 44-45.
16. Турулин И.И. Проектирование цифровых рекурсивных фильтров с прореженной знакочередующейся импульсной характеристикой // Известия вузов. Электроника. – 2000. – № 3. – С. 102-103.
17. Олейникова Т.В. Исследование алгоритмов рекурсивных фильтров с конечными импульсными характеристиками для весовой обработки сигналов: дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 1999. – 150 с.
18. Олейникова Т.В. Весовая обработка близкорасположенных сигнала и помехи окнами с характеристиками типа окна Хэмминга // Тез. докл. всерос. науч. конф. “Радиоэлектроника, микроэлектроника, системы связи и управления”. – Таганрог, 1997. – С. 232-233.
19. Турулин И.И. Некоторые методы синтеза рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой. Деп. в ВИНТИ. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 40 с.
20. Турулин И.И. Основные методы синтеза рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой. Деп. в ВИНТИ. – Таганрог: ТРТУ, 1998. – 111 с.

REFERENCES

1. Turulin I.I., Shushkevich T.V. Osnovy tsifrovoy obrabotki signalov [Fundamentals of digital signal processing]. Taganrog: Izd-vo Taganrog in-ta im. A.P. Chekhova, 2015, 88 p.
2. Turulin I.I., Oleynikova T.V. Bystrodeystvuyushchie rekursivnye fil'try s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy dlya vesovoy obrabotki [High speed recursive finite impulse response filters for weight processing]. Dep. v VINITI. Taganrog: TRTU, 1998, 26 p.

3. *Oleynikova T.V., Turulin I.I.* Realizatsiya bystrodeystvuyushchikh tsifrovyykh fil'trov dlya vesovoy obrabotki signalov [Implementation of high-speed digital filters for weight signal processing], *Tez. dokl. vseros. nauch. konf. "Tekhnicheskaya kibernetika, radioelektronika i sistemy upravleniya"* [Thesis of the report of the All-Russian scientific conference "Technical cybernetics, radio electronics and control systems"]. Taganrog, 1996, pp. 225.
4. *Kartashev V.G.* Osnovy teorii diskretnyykh signalov i tsifrovyykh fil'trov [Foundations of the theory of discrete signals and digital filters]. Moscow: Vyssh. shkola, 1982, 109 p.
5. *Turulin I.I.* Metod proektirovaniya rekursivnykh fil'trov obshchego vida s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy [Method of designing recursive filters of general form with finite impulse response], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2001, No. 6, pp. 97-98.
6. *Turulin I.I.* Raschet i primeneniye bystrodeystvuyushchikh tsifrovyykh rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy: monografiya [Calculation and application of high-speed digital recursive filters with finite impulse response: monograph]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999, 87 p.
7. *Khemming R.V.* Tsifrovye fil'try [Digital Filters]. Moscow: Sov. radio, 1980, 224 p.
8. *Turulin I.I.* Metod ogranicheniya dliny impul'snoy kharakteristiki tsifrovogo fil'tra [Method of limiting the length of the impulse response of a digital filter], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of Russian universities. Radio electronics], 2000, No. 2, pp. 52-58.
9. *Turulin I.I.* Metod ogranicheniya impul'snoy kharakteristiki tsifrovogo rekursivnogo fil'tra s pomoshch'yu kompensiruyushchikh pryamykh svyazey [Method of limiting the impulse response of a digital recursive filter using compensating direct connections], *Radiotekhnika* [Radiotechnic], 2000, No. 11, pp. 36-39.
10. *Kherris F.Dzh.* Ispol'zovanie okon pri garmonicheskom analize metoda diskretnogo preobrazovaniya Fur'e [Using windows in harmonic analysis of the discrete Fourier transform method], *TIER* [Proceedings of the Institute of Electronics and Radio Electronics Engineers], 1978, Vol. 66, No. 1, pp. 60-96.
11. *Marpl S.L.* TSifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow: Mir, 1990, 584 p.
12. *Burenin N.I.* Radiolokatsionnye stantsii s sintezirovannoy antennoy [Synthesized antenna radars]. Moscow: Sov. radio, 1972, 160 p.
13. *Turulin I.I.* Metod kaskadno-parallel'noy realizatsii tsifrovyykh rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy [Method of cascade-parallel implementation of digital recursive filters with finite impulse response], *Avtometriya* [Autometry], 2002, No. 3, pp. 113-118.
14. *Turulin I.I.* Kaskadno-detsimarnaya realizatsiya tsifrovyykh fil'trov s periodicheskoy impul'snoy kharakteristikoy [Cascade-decimar implementation of digital filters with periodic impulse response], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of Russian universities. Radio electronics], 2000, No. 1, pp. 26-36.
15. *Turulin I.I., Verich Yu.B.* Primeneniye sistemy MATLAB dlya sinteza uzkopolosnykh nerekursivnykh fil'trov [Application of the MATLAB system for the synthesis of narrow-band non-recursive filters], *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], 2003, No. 3, pp. 44-45.
16. *Turulin I.I.* Proektirovaniye tsifrovyykh rekursivnykh fil'trov s prorezhennoy znakochereduyushchey impulsnoy kharakteristikoy [Design of digital recursive filters with decimated alternating impulse response], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2000, No. 3, pp. 102-103.
17. *Oleynikova T.V.* Issledovaniye algoritmov rekursivnykh fil'trov s konechnymi impul'snymi kharakteristikami dlya vesovoy obrabotki signalov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Research of algorithms of recursive filters with finite impulse characteristics for weight signal processing: cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog, 1999, 150 p.
18. *Oleynikova T.V.* Vesovaya obrabotka blizkoraspolozhennykh signala i pomekhi oknami s kharakteristikami tipa okna Khemmigna [Weight processing of closely spaced signals and interference with windows with characteristics of the Hamming window type], *Tez. dokl. vseros. nauch. konf. "Radioelektronika, mikroelektronika, sistemy svyazi i upravleniya"* [Thesis of the report of the All-Russian scientific conference "Technical cybernetics, radio electronics and control systems"]. Taganrog, 1997, pp. 232-233.

19. *Turulin I.I.* Nekotorye metody sinteza rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy [Some methods of synthesis of recursive filters with finite impulse response]. Dep. v VINITI. Taganrog: TRTU, 1997, 40 p.
20. *Turulin I.I.* Osnovnye metody sinteza rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy [Basic methods of synthesis of recursive filters with finite impulse response]. Dep. v VINITI. Taganrog: TRTU, 1998, 111 p.

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

Шушкевич Татьяна Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: tvshushkevich@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371638; к.т.н.; доцент; зам. директора института нанотехнологий, электроники и приборостроения по учебной работе.

Морозов Андрей Алексеевич – e-mail: morozov@sfedu.ru; тел.: +79034538971; аспирант.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; тел.: +78634371638; д.т.н.; профессор.

Shushkevich Tatyana Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: tvshushkevich@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371638; cand. of eng. sc.; associate professor; deputy director of the Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation for academic affairs.

Morozov Andrey Alekseevich – e-mail: morozov@sfedu.ru; phone: +79034538971; postgraduate student.

Turulin Igor Ilyich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; phone: +78634371638; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.51-355.11

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-199-209

С.А. Боцвин, В.А. Хватков

ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЛИЧНОГО СОСТАВА ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ведение учета личного состава Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) осуществляется с использованием нескольких узкоспециализированных автоматизированных систем, что не позволяет решать задачи в едином информационном пространстве. В ходе исследования определены проблемные вопросы, возникающий при решении задач учета личного состава ВС РФ, такие как низкая оперативность, использование различных носителей информации, низкая достоверность информации из-за отсутствия механизмов синхронизации между системами и т.д. Выявлены основные подсистемы и определен перечень элементов для построения функциональной структуры перспективной автоматизированной системы, которая будет обеспечивать оперативный доступ неограниченного количества должностных лиц к информации и решение в автоматическом режиме задач сбора, обобщения и представления количественных (статистических) данных. На основании проведенного анализа топологической структуры кадровых органов ВС РФ предлагается для построения перспективной автоматизированной системы использовать иерархическую (древовидную) структуру и осуществлять трансфер информации между базами данных разных уровней для снижения избыточности информации и нагрузки на серверное оборудование. Приоритетный вариант организации хранения данных - распределенное хранение, который был выбран на основании требований, предъявляемых к устойчивости и надежности функционирования перспективной автоматизированной системы, особенно в военное время. При этом использование механизмов репликации позволит обеспечить мгновенную синхронизацию информации на всех уровнях. Произведен расчет требуемых ресурсов для хранения и обработки информации на различных уровнях в зависимости от количества военнослужащих по каждому уровню, частоты возникновения кадровых событий и объема памяти, необходимого для хранения персональных сведений. На основании чего оп-

ределены технические характеристики элементов перспективной системы, необходимые и достаточные для качественного функционирования, а также получены требования к техническим характеристикам серверного оборудования и системам хранения данных. Проведенные исследования позволили построить схему для перспективного облика автоматизированной системы учета личного состава и обосновать актуальность решения задачи по формированию и разработке новой автоматизированной системы. Кроме того, результаты работы позволили определить закладываемые в перспективную систему принципы, такие как построение иерархической распределенной базы данных, создание механизмов синхронизации информации между элементами системы, возможность использования имеющихся технических средств и организация информационного взаимодействия с другими автоматизированными системами.

Автоматизированная система; учет личного состава; перспективная структура; технические характеристики; элементы структуры; информационное взаимодействие; принципы построения.

S.A. Botsvin, V.A. Khvatkov

JUSTIFICATION OF THE APPEARANCE OF A PROMISING AUTOMATED SYSTEM FOR RECORDING PERSONNEL OF THE ARMED FORCES OF THE RUSSIAN FEDERATION

Accounting of personnel of the Armed Forces of the Russian Federation (AFRF) is carried out using several highly specialized automated systems, which does not allow solving tasks in a single information space. The study identified problematic issues that arise when solving the tasks of accounting personnel of the AFRF, such as low efficiency, the use of various media, low reliability of information due to the lack of synchronization mechanisms between systems, etc. The main subsystems are identified and a list of elements is defined for building the functional structure of a promising automated system that will provide operational access to information for an unlimited number of officials and automatically solve the tasks of collecting, summarizing and presenting quantitative (statistical) data. Based on the analysis of the topological structure of the personnel bodies of the AFRF, it is proposed to use a hierarchical (tree-like) structure to build a promising automated system and transfer information between databases of different levels to reduce information redundancy and load on server equipment. The priority option for organizing data storage is distributed storage, which was chosen based on the requirements for the stability and reliability of the operation of a promising automated system, especially in wartime. At the same time, the use of replication mechanisms will allow for instant synchronization of information at all levels. The calculation of the required resources for storing and processing information at various levels, depending on the number of military personnel at each level, the frequency of occurrence of personnel events and the amount of memory required for storing personal information. On the basis of which the technical characteristics of the elements of a promising system, necessary and sufficient for high-quality functioning, are determined, and the requirements for the technical characteristics of server equipment and data storage systems are obtained. The conducted research made it possible to construct a scheme for the perspective appearance of an automated personnel accounting system and to justify the relevance of solving the problem of forming and developing a new automated system. In addition, the results of the work made it possible to determine the principles laid down in the prospective system, such as the construction of a hierarchical distributed database, the creation of mechanisms for synchronizing information between system elements, the possibility of using existing technical means and the organization of information interaction with other automated systems.

Automated system; personnel accounting; perspective structure; technical characteristics; elements of the structure; information interaction; principles of construction.

Введение. Практика повседневной деятельности Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) свидетельствует, что одним из главных требований успешной реализации кадровой политики является обеспечение выполнения требуемого качества решения задач по учету личного состава (УЛС) ВС РФ.

Ведение УЛС – сложный процесс деятельности должностных лиц кадровых органов ВС РФ, в ходе которого решаются задачи по хранению, ведению и представлению персональных сведений по военнослужащим, данных о прохождении ими военной службы, их учетно-послужных документов.

В настоящее время УЛС ВС РФ ведется с использованием нескольких разрозненно функционирующих автоматизированных систем (АС), решающих частные узкоспециализированные задачи. Кроме этого, низкая оснащенность кадровых органов элементами АС и средствами информационного обмена не позволяет решать задачи УЛС в едином информационном пространстве, создать единую базу данных по всем военнослужащим.

Следствием такого подхода к автоматизации решения задач УЛС явилось появление ряда проблемных вопросов, таких как:

- ◆ низкая оперативность актуализации информации, заключающаяся в том, что от момента происхождения кадрового события до момента появления его отражения в базе данных (БД) систем может проходить от недели до месяца;
- ◆ использование как бумажных, так и электронных носителей информации для ведения УЛС, что препятствует достижению высокого уровня автоматизации;
- ◆ отсутствие отдельных категорий и групп военнослужащих в БД АС УЛС, связанная прежде всего с отсутствием развернутых элементов АС в некоторых кадровых органах ВС РФ;
- ◆ низкая достоверность информации, используемой для принятия кадрового решения, вследствие отсутствия механизмов синхронизации информации между АС.

Устранение указанных проблемных вопросов приводит к необходимости переосмысления форм и способов ведения УЛС, создания единой АС УЛС ВС РФ, оснащение всей вертикали кадровых органов элементами указанной системы, организация информационного обмена между ними в масштабе времени близкого к реальному, а также формирования и обоснования облика перспективной АС УЛС ВС РФ.

Обоснование структуры перспективной АС УЛС ВС РФ. В соответствии с принципом многоаспектности системного подхода обоснование облика перспективной АС УЛС ВС РФ, как сложной системы, предполагает ее всестороннее рассмотрение и изучение с позиций множественности его структурных представлений (полиструктурности).

Построение функциональной структуры перспективной АС (рис. 1) позволит выявить ее основные подсистемы, определить перечень элементов системы и взаимосвязи между ними в ходе решения задач УЛС.

В соответствии с приведенной схемой основным элементом перспективной системы станет база данных. Доступ к информации, хранимой в БД, и ее изменение (введение) должно осуществляться с АРМ ДЛ КО с использованием средств межмашинного информационного взаимодействия через подсистему администрирования и разграничения доступа. Кроме этого, в целях обеспечения достоверности и полноты информации, хранимой в перспективной базе данных необходимо предусмотреть возможность информационного взаимодействия с другими автоматизированными системами военного назначения (АС ВН), такими как изделие 83т645 и изделие 83т633, а также информационными системами федеральных органов исполнительной власти (ИС ФОИВ).

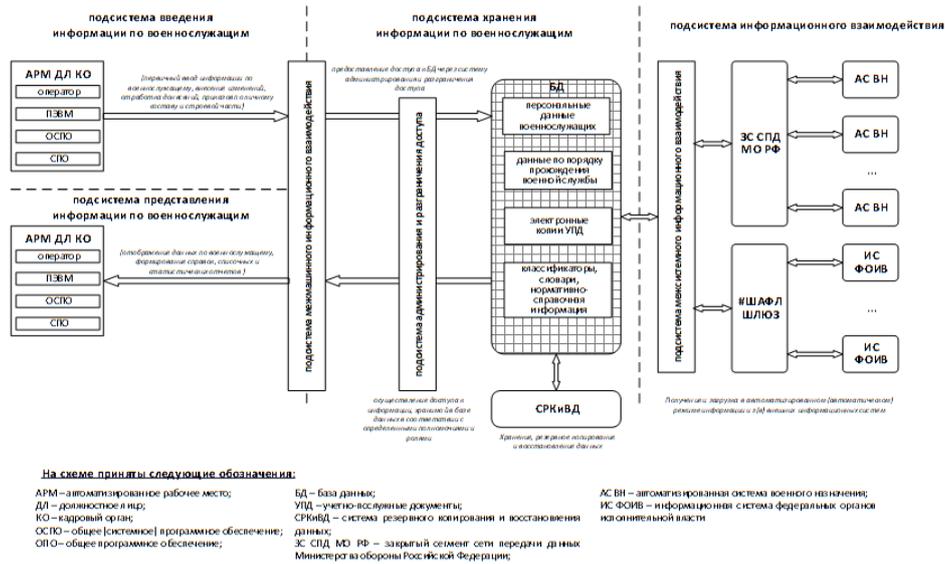


Рис. 1. Функциональная структура перспективной АС УЛС ВС РФ

Таким образом, функционально перспективную АС УЛС ВС РФ можно условно декомпозировать на четыре подсистемы: подсистема хранения данных, подсистема информационного обмена (взаимодействия), подсистемы ведения и представления данных, отражающих основные составные части задачи УЛС.

Данный подход позволит обеспечить:

- ◆ оперативный доступ неограниченного количества должностных лиц кадровых органов к информации по военнослужащим и лицам гражданского персонала;
- ◆ сбор в автоматическом режиме количественной (статистической) информации за подчиненные подразделения;
- ◆ решение в автоматическом режиме задач сбора, обобщения и представления количественных (статистических) данных.

Приведенная схема функциональной структуры перспективной АС УЛС ВС РФ (рис. 1) не позволяет учесть топологию кадровых органов ВС РФ (рис. 2) (их территориальную распределенность по территории России).

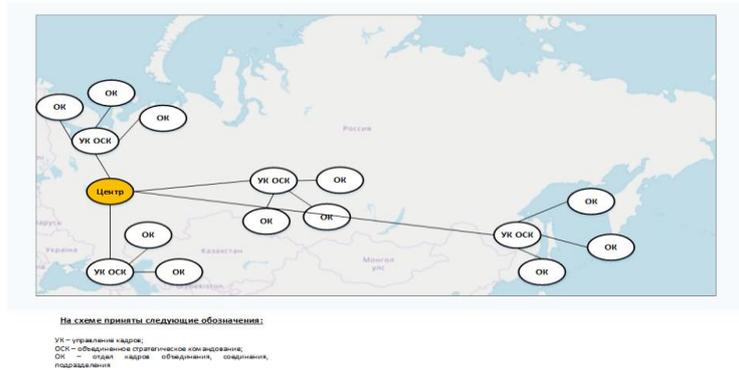


Рис. 2. Топологическая структура перспективной АС УЛС ВС РФ

Анализ топологической структуры (п. 1.3.2) позволяет предложить два варианта организации хранения данных: централизованное и распределенное. Первый вариант подразумевает использование единой базы данных на военнослужащих ВС РФ, хранящейся на серверах центрального уровня. Второй вариант подразумевает использование как серверного оборудования центрального уровня, так и серверов стратегического (регионального) уровня и оперативного уровня для отдельных воинских частей.

Анализ технических возможностей имеющихся каналов связи закрытого сегмента сети передачи данных позволяет реализовать оба эти варианта. Так, например, для расчета денежного довольствия (изделие 83т633) личному составу ВС РФ осуществляется централизованный сбор информации в единую БД, физически располагаемую в г. Москва, а для персонального учета военнослужащих (изделие 83т47) реализуется технология распределенного хранения данных.

Выбор приоритетного варианта организации хранения данных должен осуществляться из требований, предъявляемых к устойчивости и надежности функционирования перспективной АС УЛС ВС РФ, особенно в военное время. В связи с этим организация распределенного хранения данных представляется предпочтительным вариантом. При этом использование механизмов репликации позволит обеспечить мгновенную синхронизацию информационных копий по одному военнослужащему в нескольких базах данных (на всех уровнях).

Информационное взаимодействие с другими АС и ИС целесообразно осуществлять только на центральном (верхнем) уровне.

Таким образом, структура перспективной АС УЛС ВС РФ представляет собой иерархическую (древовидную) структуру (рис. 2). Каждый узел данного дерева содержит БД, синхронизированную с БД верхнего уровня.

Информационное взаимодействие с другими автоматизированными и информационными системами целесообразно осуществлять только на центральном (верхнем) уровне.

Анализ порядка хранения и обработки документов, хранящихся в перспективной базе данных, предполагает наличия избыточности, когда информация по одному военнослужащему, хранится на нескольких уровнях: уровне центрального кадрового органа, уровне управления кадров стратегического уровня и уровня кадрового органа подразделения, где военнослужащий, непосредственно проходит военную службу.

Учитывая тот факт, что военнослужащий за время службы может поменять несколько мест, целесообразно осуществлять трансфер его данных между базами данных отделов кадров подразделений и управлений кадров стратегического уровня через сервера центрального уровня, без необходимости сохранения полной информации в базе данных по предыдущему месту службы, а только части сведений необходимых для подготовки отчетностей и справок. Данный подход позволит обеспечить сокращение избыточности информации, а также снизить нагрузку на серверное оборудование и системы хранения данных.

Практика автоматизации решения задач УЛС, показывает, что в среднем для хранения информации по одному военнослужащему (включая электронные копии его УПД) составляет порядка 5 МБ.

Потребность в количестве военнослужащих, информация по которым должна храниться, составляет:

- ◆ для центрального кадрового органа (ГУК МО РФ) – более 30 млн. военнослужащих (с учетом военнослужащих, находящихся в запасе или отставке);
- ◆ для кадровых органов стратегического уровня (кадровых органов ВО и ГК (К) видов (родов войск) ВС РФ) – 100 тыс. военнослужащих;
- ◆ для кадровых органов оперативного и оперативно-тактического уровня – до 20 тыс. военнослужащих.

В среднем за сутки в ВС РФ происходит порядка нескольких тысяч кадровых событий. Определение требований по частоте синхронизации информации между БД различных уровней, а также между БД центрального уровня и внешними АС ВН и ИС ФОИВ, должны соответствовать требованиям по поддержанию информации в актуальном состоянии. Данная задача осложняется тем, что в настоящее время отсутствует методика по определению актуальности информации, ее полноты и достоверности. Сейчас в зависимости от выбранного варианта информационного обмена между кадровыми органами смежных иерархических уровней (электронный или бумажный) обновление информации в базе данных верхнего уровня может занимать от нескольких часов до месяца.

Обоснование технических характеристик (параметров) перспективной АС УЛС ВС РФ. Для представления более полного облика перспективной АС УЛС ВС РФ, целесообразно определить технические характеристики отдельных элементов, необходимые и достаточные для качественного функционирования системы.

Для решения данной задачи необходимы следующие исходные данные: вариант использования АС (централизованный, распределенный), режим работы (круглосуточный, посменный, регламент технического обслуживания, средняя суточная нагрузка и другие параметры), выбранная система управления БД (MS SQL Server, PostgreSQL или другая), используемое специальное программное обеспечение, пропускная способность каналов связи и многие другие данные. Получение точных характеристик элементов перспективной АС УЛС ВС РФ представляется сложной и трудоемкой задачей, для решения которой целесообразно создание прототипа (опытного образца) системы.

Однако, использование опыта эксплуатации АС ВН, принятых на снабжение в ВС РФ, а также статистических сведений по количеству военнослужащих и частоте возникновения кадровых событий позволяет получить приблизительную оценку технических требований, предъявляемых к серверному оборудованию.

Общее количество военнослужащих, информация по которым ведется в программном комплексе «Электронная картотека Главного управления кадров Министерства обороны Российской Федерации» составляет более 20 млн человек (с учетом военнослужащих, находящихся в запасе или отставке). Средний объем памяти, затрачиваемый на хранение персональных сведений, данных о прохождении военной службы составляет около 3 Мбайт. Таким образом, требуемый объем памяти для хранения имеющегося информационного массива по всем военнослужащим составляет порядка 60–70 Тбайт. В среднем для хранения изменений по военнослужащим, а также для первичного ввода военнослужащих, поступивших на военную службу по контракту требуется выделения еще 1–1,7 Тбайт в год.

Таким образом, при создании БД центрального уровня целесообразно выделение памяти для хранения данных в объеме 100 Тбайт, что обеспечит гарантированное хранение изменений в информации по действующим военнослужащим и сведений по военнослужащим, поступившим на военную службу, в течение 10–15 лет.

Хранение информации по ОСК может осуществляться как на серверах УК ОСК, так и на элементах территориальных центров обработки данных. В среднем на кадровом обеспечении в кадровом органе стратегического уровня состоит 100 тыс. военнослужащих, необходимый объем для их хранения составит 0,3 Тбайта, среднегодовой прирост в требуемом объеме памяти – 0,1 Тбайт. Таким образом, рациональный объем памяти, требуемый для создания БД стратегического уровня составит 10 Тбайт.

Хранение информации по военнослужащим объединения, соединения, воинской части потребует выделения памяти порядка нескольких сотен Мбайт и может быть осуществлено на ПЭВМ общего назначения без дополнительной поставки серверного оборудования.

Для реализации информационно-расчетных задач на уровне центра целесообразно использование кластерного сервера, на уровне ОСК – стоячного сервера, на уровне подразделений – ПЭВМ общего назначения.

Обобщая материал статьи, перспективный облик АС УЛС ВС РФ можно представить схематично в следующем виде:

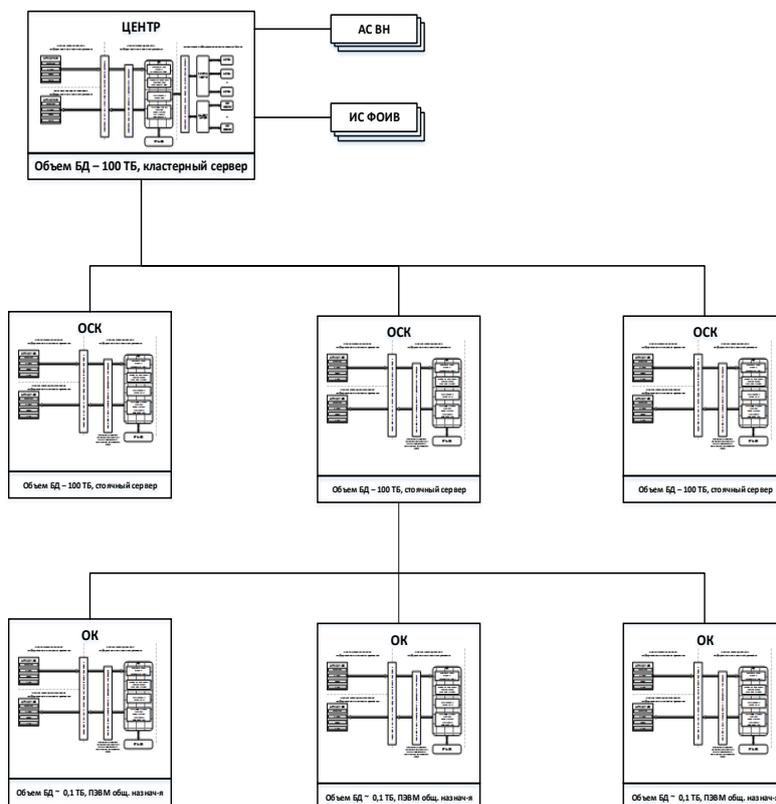


Рис. 3. Облик перспективной АС УЛС ВС РФ

Заключение. Авторами в статье обоснована актуальность решения задачи формирования и разработки облика перспективной АС УЛС ВС РФ. Предложен подход к ее решению, основанный на принципе многоаспектности системного анализа, и проанализированы функциональный и топологический аспекты функционирования указанной системы.

Результаты анализа позволили определить принципы, закладываемые в перспективную АС УЛС:

- ◆ иерархическая база данных, элементы, которой распределены по территории Российской Федерации;
- ◆ синхронизация информации между элементами базы данных по постоянно действующим каналам связи;
- ◆ необходимость обеспечения информационного взаимодействия с другими системами, хранящими информацию по личному составу;
- ◆ возможность использования имеющихся технических средств общего назначения, без дополнительной поставки серверного оборудования, что позволит автоматизировать всю вертикаль кадровых органов.

Кроме этого получены требования к техническим характеристикам серверного оборудования и системам хранения данных.

Дальнейшее направление исследования должно быть сосредоточено на обосновании технических характеристик отдельных элементов системы, выборе рационального варианта оснащённости кадровых органов разного уровня, позволяющих с одной стороны обеспечить качественное решение задач УЛС ВС РФ, а с другой минимизировать расходы на их оснащение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Горемыкин В.П.* Главное управление кадров Министерства обороны Российской Федерации: история и современность // Военная мысль. – 2013. – № 6. – С. 3-10.
2. *Боцвин С.А. и др.* Основные проблемы и тенденции развития автоматизированных систем учета личного состава Вооруженных Сил Российской Федерации // Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2020. – № 675. – С. 223-227.
3. Главному управлению кадров МО РФ: 100 лет. – Режим доступа: <http://mil.ru/100GUK/history.htm> (дата обращения: 07.11.2020).
4. *Москвин Б.В.* Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 383 с.
5. *Малин А.С., Мухин В.И.* Исследование систем управления. – Изд. дом ГУ-ВШЭ, 2004. – 400 с.
6. *Линник А.П. и др.* Общий подход к оценке эффективности функционирования автоматизированных систем управления родов авиации // Воздушно-космические силы: теория и практика. – 2017. – № 1. – С. 52-58.
7. *Мануйлов Ю.С., Кудряшов А.Н., Павлов А.Н., Петрошенко А.В., Новиков Е.А.* Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 271 с.
8. Вопросы повышения эффективности автоматизированного управления космическими средствами / под ред. Ю.С. Мануйлова. – МО РФ, 1999. – 125 с.
9. Вопросы анализа и синтеза АСУ сложными военно-техническими системами: учеб. пособие. – Л.: ВИКУ, 1991.
10. Системные проблемы связи и управления: учебное пособие. – Л.: МО РФ, 1994.
11. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
12. *Соколов Б.В.* Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ подвижными объектами. – МО РФ, 1992. – 232 с.
13. *Клыков Ю.И.* Ситуационное управление большими системами. – М.: Энергия, 1974. – 213 с.
14. *Ивахненко А.Г.* Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – Киев: Техника, 1975. – 311 с.
15. Проблемы программно-целевого планирования и управления / под ред. Г.С. Поспелова. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
16. Современное состояние и перспективы развития технологии автоматизированного управления и связи: Сб. научных трудов. Вып. 621. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 163 с.
17. *Соколов Б.В.* Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. – М.: МО СССР, 1992. – 232 с.
18. *Ростовцев Ю.Г.* Основы построения автоматизированных систем сбора и обработки информации. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 1992. – 717 с.
19. *Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В.* Оптимальное управление. – М.: Наука, 1979. – 429 с.
20. *Алексеев О.Г.* Комплексное применение методов дискретной оптимизации. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
21. *Алиев Р.А.* Методы интеграции в системах управления производством. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 271 с.

22. *Атанс М., Фалб П.* Оптимальное управление. – М.: Машиностроение, 1968. – 763 с.
23. *Багриновский К.А.* Основы согласования плановых решений. – М.: Наука, 1977. – 303 с.
24. *Болтянский В.Г.* Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1966. – 408 с.
25. *Брайсон А., Хо-Ю-Ши.* Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
26. *Булавский В.А., Звягина Р.А., Яковлева М.А.* Численные методы линейного программирования. – М.: Наука, 1977. – 308 с.
27. *Бурков В.Н., Кондратьев В.В.* Механизмы функционирования организационных систем. – М.: Наука, 1981. – 383 с.
28. *Вагнер Г.* Основы исследования операций. Т. 1. – М.: Мир, 1972. – 335 с.
29. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1980. – 520 с.
30. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. Задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
31. Военная системотехника и системный анализ: учебник / под ред. Б.В. Соколова. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 496 с.
32. *Воробьев Н.Н.* Основы теории игр. – М.: Наука, 1984. – 495 с.
33. *Воронов А.А.* Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука, 1985. – 352 с.
34. *Габасов Р., Кириллова Ф.М.* Качественная теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1971. – 508 с.

REFERENCES

1. *Goremykin V.P.* Glavnoe upravlenie kadrov Ministerstva oborony Rossiyskoy Federatsii: istoriya i sovremennost' [The Main Personnel Directorate of the Ministry of Defense of the Russian Federation: history and modernity], *Voennaya mys'* [Military Thought], 2013, No. 6, pp. 3-10.
2. *Botsvin S.A. i dr.* Osnovnye problemy i tendentsii razvitiya avtomatizirovannykh sistem ucheta lichnogo sostava Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii [The main problems and trends in the development of automated accounting systems for personnel of the Armed Forces of the Russian Federation], *Tr. Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky]. Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2020, No. 675, pp. 223-227.
3. Glavnomu upravleniyu kadrov MO RF: 100 let [The Main Personnel Department of the Ministry of Defense of the Russian Federation: 100 years]. Available at: <http://mil.ru/100GUK/history.htm> (accessed 07 November 2020).
4. *Moskvin B.V.* Teoriya prinyatiya resheniy: uchebnyk [Decision theory: textbook]. Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2005, 383 p.
5. *Malin A.S., Mukhin V.I.* Issledovanie sistem upravleniya [Research of control systems]. Izd. dom GU-VSHE, 2004, 400 p.
6. *Linnik A.P. i dr.* Obshchiy podkhod k otsenke effektivnosti funktsionirovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya rodov aviatsii [A general approach to assessing the effectiveness of the functioning of automated control systems of civil aviation], *Vozdushno-kosmicheskie sily: teoriya i praktika* [Aerospace forces: theory and practice], 2017, No. 1, pp. 52-58.
7. *Manuylov Yu.S., Kudryashov A.N., Pavlov A.N., Petroshenko A.V., Novikov E.A.* Sistemnyy analiz i organizatsiya avtomatizirovannogo upravleniya kosmicheskimi apparatami: uchebnyk [System analysis and organization of automated spacecraft control: textbook]. Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2010, 271 p.
8. Voprosy povysheniya effektivnosti avtomatizirovannogo upravleniya kosmicheskimi sredstvami [Issues of increasing the efficiency of automated control of space assets], ed. by Yu.S. Manuylova. MO RF, 1999, 125 p.
9. Voprosy analiza i sinteza ASU slozhnymi voenno-tekhnicheskimi sistemami: ucheb. posobie [Issues of analysis and synthesis of automated control systems by complex military-technical systems: textbook]. Leningrad: VIKU, 1991.
10. Sistemnye problemy svyazi i upravleniya: ucheb. posobie [System problems of communication and management: textbook]. Leningrad: MO RF, 1994.

11. *Okhtilev M.yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow: Nauka, 2006, 410 p.
12. *Sokolov B.V.* Kompleksnoe planirovanie operatsiy i upravlenie strukturami v ASU podvizhnymi ob"ektami [Comprehensive planning of operations and management of structures in the automated control system of mobile objects]. MO RF, 1992, 232 p.
13. *Klykov Yu.I.* Situatsionnoe upravlenie bol'shimi sistemami [Situational management of large systems]. Moscow: Energiya, 1974, 213 p.
14. *Ivakhnenko A.G.* Dolgosrochnoe prognozirovaniye i upravlenie slozhnymi sistemami [Long-term forecasting and management of complex systems]. Kiev: Tekhnika, 1975, 311 p.
15. Problemy programmno-tselevogo planirovaniya i upravleniya [Problems of program-target planning and management], ed. by G.S. Pospelova. Moscow: Nauka, 1981, 464 p.
16. Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya tekhnologii avtomatizirovannogo upravleniya i svyazi: Sb. nauchnykh trudov. [The current state and prospects for the development of automated control and communication technology: A collection of scientific papers]. Issue 621. Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2007, 163 p.
17. *Sokolov B.V.* Kompleksnoe planirovanie operatsiy i upravlenie strukturami v ASU aktivnymi podvizhnymi ob"ektami [Complex planning of operations and management of structures in the automated control system with active mobile objects]. Moscow: MO SSSR, 1992, 232 p.
18. *Rostovtsev Yu.G.* Osnovy postroeniya avtomatizirovannykh sistem sbora i obrabotki informatsii [Fundamentals of building automated systems for collecting and processing information]. Saint Petersburg: VIKA im. A.F. Mozhayskogo, 1992, 717 p.
19. *Alekseev V.M., Tikhomirov V.M., Fomin S.V.* Optimal'noe upravlenie [Optimal control]. Moscow: Nauka, 1979, 429 p.
20. *Alekseev O.G.* Kompleksnoe primeneniye metodov diskretnoy optimizatsii [Complex application of discrete optimization methods]. Moscow: Nauka, 1987, 248 p.
21. *Aliev R.A.* Metody integratsii v sistemakh upravleniya proizvodstvom [Methods of integration in production management systems]. Moscow: Ergoatomizdat, 1989, 271 p.
22. *Atans M., Falb P.* Optimal'noe upravlenie [Optimal control]. Moscow: Mashinostroeniye, 1968, 763 p.
23. *Bagrinovskiy K.A.* Osnovy soglasovaniya planovykh resheniy [Fundamentals of coordination of planned decisions]. Moscow: Nauka, 1977, 303 p.
24. *Boltyanskiy V.G.* Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya [Mathematical methods of optimal control]. Moscow: Nauka, 1966, 408 p.
25. *Brayson A., Kho-Yu-Shi.* Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya [Applied theory of optimal control]. Moscow: Mir, 1972, 544 p.
26. *Bulavskiy V.A., Zvyagina R.A., Yakovleva M.A.* Chislennyye metody lineynogo programmirovaniya [Numerical methods of linear programming]. Moscow: Nauka, 1977, 308 p.
27. *Burkov V.N., Kondrat'ev V.V.* Mekhanizmy funktsionirovaniya organizatsionnykh sistem [Mechanisms of functioning of organizational systems]. Moscow: Nauka, 1981, 383 p.
28. *Vagner G.* Osnovy issledovaniya operatsiy [Fundamentals of operations research]. Vol. 1. Moscow: Mir, 1972, 335 p.
29. *Vasil'ev F.P.* Chislennyye metody resheniya ekstremal'nykh zadach [Numerical methods for solving extreme problems]. Moscow: Nauka, 1980, 520 p.
30. *Ventsel' E.S.* Issledovaniye operatsiy. Zadachi, printsipy, metodologiya [Operations research. Tasks, principles, methodology]. Moscow: Nauka, 1988, 208 p.
31. Voennaya sistemotekhnika i sistemnyy analiz: uchebnyk [Military system engineering and system analysis: textbook], ed. by B.V. Sokolova. Saint Petersburg: VIKU im. A.F. Mozhayskogo, 1999, 496 p.
32. *Vorob'ev N.N.* Osnovy teorii igr [Fundamentals of game theory]. Moscow: Nauka, 1984, 495 p.
33. *Voronov A.A.* Vvedeniye v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh sistem [Introduction to the dynamics of complex controlled systems]. Moscow: Nauka, 1985, 352 p.
34. *Gabasov R., Kirillova F.M.* Kachestvennaya teoriya optimal'nykh protsessov [Qualitative theory of optimal processes]. Moscow: Nauka, 1971, 508 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.В. Суворов.

Боцвин Сергей Александрович – Главное управление кадров Министерства обороны Российской Федерации (г. Москва); e-mail: xvatkoff@mail.ru; г. Москва, Россия, тел.: 89856834525; зам. начальника.

Хватков Вадим Александрович – Военный учебный центр при Национальном исследовательском университете «Московский институт электронной техники» (г. Москва); e-mail: xvatkoff@mail.ru; г. Москва, г. Зеленоград, Россия; тел.: 89264608261; начальник учебной части – заместитель начальника.

Botsvin Sergey Aleksandrovich – The Main personnel Directorate of the Ministry of defense of the Russian Federation (Moscow); e-mail: xvatkoff@mail.ru; Moscow, Russia; phone: 89856834525; deputy chief.

Khvatkov Vadim Aleksandrovich – The military training center at the National research University "Moscow Institute of electronic technology" (Moscow); xvatkoff@mail.ru; Moscow, Zelenograd, Russia, phone: +79264608261; head of the educational department – deputy head.

УДК 681.51-355.11

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-209-219

С.А. Боцвин, В.А. Хватков

ТРАНСФОРМАЦИЯ И АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ ПРИ СОЗДАНИИ БАЗЫ ДАННЫХ УЧАСТНИКОВ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ 1941–1945 ГОДОВ МЕМОРИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ДОРОГА ПАМЯТИ» ГЛАВНОГО ХРАМА ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Сохранение исторической памяти об участниках Великой Отечественной войны 1941–1945 годов является задачей мирового уровня, которая должна сберечь правду о самой страшной войне и подвиге нашего народа. В современных условиях привлечение интереса к истории, традициям и наконец признанию своего долга перед ушедшими поколениями требует современных методов. Одним из таких методов является трансформация информации, которая позволяет представить эту информацию в таком виде, чтобы она могла быть использована наиболее эффективно. При этом основной целью при трансформации исторических данных заключается в оптимизации их представлений и форматов и не изменении информационного содержания. Представленные алгоритмы трансформации и анализа информации при создании базы данных участников Великой Отечественной войны были направлены на максимальное сохранение исторической ценности и достоверности информации. Для достижения этой цели рассмотрены компьютерные методы обработки информации для нормализации и консолидации персональных данных, полученных из различных источников. Проведен анализ содержания сведений в архивных документах с представлением статистических данных по количеству документов (записей) из различных источников (архивов, базах данных, информационных ресурсов и т.п.) и описан порядок перевода информации из архивных документов в электронный вид, который был применен на практике. На основании анализа сведений построены диаграммы содержания персональных сведений в архивных источниках, представлены этапы систематизации и приведения к единому формату записей обобщенного информационного массива, а также порядок объединения и удаления дублирующих записей. Для возможности использования в других проектах подробно изложен алгоритм консолидации данных, полученных из различных источников, и построена его блок-схема. Кроме того описаны примененные алгоритмы нечеткого поиска, которые позволили минимизировать ошибки в записях, а также алгоритмы сравнения изображений для поиска дубликатов по фотографиям. Все приведенные алгоритмы позволили собрать воедино информацию, содержащуюся на различных носителях, имеющую разные структуры и географическое положение. Созданный информационный ресурс позволяет колоссально сократить ресурсы необходимые для

поиска нужных сведений, в том числе доступ к которым был ограничен или вообще отсутствовал. Дальнейшее усовершенствование алгоритмов нормализации и консолидации информации может послужить основой для миграции данных из устаревших в перспективные системы, а также для формирования информационных ресурсов из имеющихся разнородных архивных фондов.

Трансформация и анализ информации; учет личного состава; компьютерные методы обработки информации; алгоритмы нормализации и консолидации данных.

S.A. Botsvin, V.A. Khvatkov

TRANSFORMATION AND ANALYSIS OF INFORMATION WHEN CREATING A DATABASE OF PARTICIPANTS OF THE GREAT PATRIOTIC WAR 1941–1945 IN THE MEMORIAL COMPLEX «ROAD OF MEMORY» IN THE MAIN RUSSIAN ARMED FORCES CATHEDRAL ON THE BASIS OF COMPUTER METHODS OF INFORMATION PROCESSING

Preserving the historical memory of the participants of the Great Patriotic War 1941–1945 is a world-class task that should preserve the truth about the most terrible war and the feat of our people. In modern conditions, attracting interest in history, traditions and finally recognition of one's duty to the past generations requires modern methods. One of these methods is the transformation of information, which allows you to present this information in such a way that it can be used most effectively. At the same time, the main goal in the transformation of historical data is to optimize their representations and formats and not change the information content. The presented algorithms of transformation and analysis of information when creating a database of participants of the Great Patriotic War were aimed at maximizing the preservation of historical value and reliability of information. To achieve this goal, computer methods of information processing for normalization and consolidation of personal data obtained from various sources are considered. The analysis of the content of information in archival documents with the presentation of statistical data on the number of documents (records) from various sources (archives, databases, information resources, etc.) is carried out and the procedure for translating information from archival documents into electronic form, which has been applied in practice, is described. Based on the analysis of the information, diagrams of the content of personal information in archival sources are constructed, the stages of systematization and bringing the generalized information array records to a single format are presented, as well as the procedure for combining and deleting duplicate records. For the possibility of using in other projects, an algorithm for consolidating data obtained from various sources is described in detail, and its block diagram is constructed. In addition, the applied fuzzy search algorithms are described, which made it possible to minimize errors in records, as well as image comparison algorithms for searching for duplicates from photographs. All of these algorithms have made it possible to bring together information contained on various media, having different structures and geographical location. The created information resource allows you to enormously reduce the resources needed to find the necessary information, including access to which was limited or not at all. Further improvement of algorithms for normalization and consolidation of information can serve as a basis for data migration from outdated to promising systems, as well as for the formation of information resources from existing heterogeneous archival funds.

Transformation and analysis of information; personnel accounting; computer methods of information processing; algorithms for data normalization and consolidation.

Введение. Президентом Российской Федерации 2020 год был объявлен Годом памяти и славы для сохранения исторической памяти и в ознаменование 75-летия Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 годов. Завершено строительство Главного храма Вооруженных Сил Российской Федерации в историко-мемориальном комплексе которого создана «Дорога памяти» где в мозаичных картинах о войне используются фотографии и персональные данные из базы данных участников Великой Отечественной войны 1941–1945 годов (ВОВ).

Для формирования информационного массива участников ВОВ были привлечены Центральный архив и военно-учебные заведения Минобороны России, организовано взаимодействие с краеведческими (историческими) музеями, органами местного самоуправления, ветеранскими и иными организациями. Проведена работа с министерствами обороны иностранных государств и получены сведения из Казахстана, Сербии, Молдавии, Словакии, Беларуси и др. Осуществлен сбор фотографий и информации из семейных архивов населения через пункты отбора на военную службу по контракту и военные комиссариаты. Во время выездных информационно-агитационных акций «Военная служба по контракту в Вооруженных Силах Российской Федерации – Твой выбор!», пунктами отбора на военную службу по контракту велось дополнительное информирование населения о возможности представления персональных сведений на участников ВОВ с привлечением средств массовой информации. Организована работа пунктов сбора и загрузки сведений от населения, включая оригиналы фронтовых писем, в военно-учебных заведениях и довузовских образовательных организациях.

Актуальность. В целях получения достоверной информации об участниках ВОВ, проведена кропотливая работа по анализу более 230 миллионов архивных документов из различных источников. Изучены личные дела офицеров, послужные карты военнослужащих, учетные документы политработников, учетные документы военнопленных, военно-медицинские документы, список безвозвратных потерь личного состава Красной Армии, а также учтены сведения на 2,5 миллиона персоналий из информационных ресурсов глобальной информационной сети «Интернет», объединенных баз данных «Мемориал», «Подвиг народа» и «Память народа». Кроме того, в проведенной работе использовалась информация из печатных изданий, содержащих более 600 тысяч записей об участниках ВОВ. Дополнительно, сформированы информационные массивы данных о Героях СССР, кавалерах Ордена Славы и гражданах иностранных государств, награжденных Советскими орденами и медалями.

Оцифровка архивных документов и формирование электронных ресурсов обеспечивают открытость доступа к информации и сохранность подлинников, повышают эффективность и скорость поиска, увеличивают количество и географию пользователей (читателей), при этом работа с архивными документами ВОВ является важной государственной задачей мирового уровня, направленной на сохранение общей исторической памяти, правды о страшной войне и подвига воинов нашей Родины.

Компьютерные методы обработки информации при создании базы данных участников ВОВ. В ходе обработки полученной информации, применялись инновационные методы работы с большими массивами данных, такие как программное распознавание лиц, проверка на одну и две опечатки в персональных данных и алгоритм консолидации сведений из различных источников на одного участника ВОВ, позволившие исключить возможное дублирование или некорректный ввод информации.

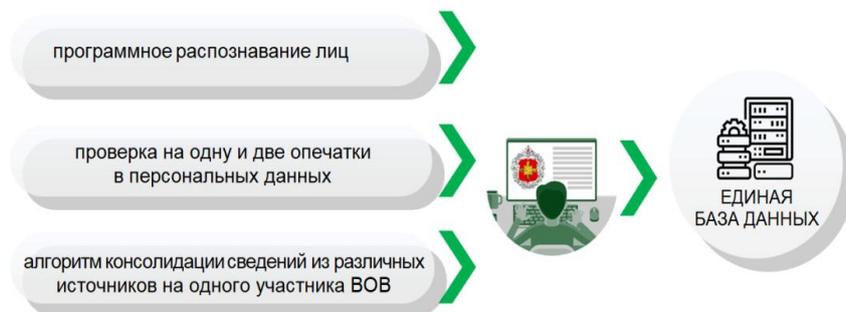


Рис. 1. Схема перевода информации из архивных документов в электронный вид

Перевод информации из архивных документов в электронный вид осуществлялся по следующему алгоритму:

- ◆ массовый перевод (сканирование) документов и картотек в электронный вид;
- ◆ систематизация отсканированных документов;
- ◆ ручная обработка персональных сведений;
- ◆ формирование классификаторов и справочников по воинским званиям, наградам, военным комиссариатам и местам рождения, в том числе с учетом изменения наименований населённых пунктов и административных делений;
- ◆ заведение информации в базу данных;
- ◆ обобщение в единую электронную базу данных;
- ◆ систематизация записей и устранение дублей.

Источниками информации для формирования единой электронной базы данных явились (рис. 2): послужные картотеки и личные дела офицерского состава более 33 млн. документов; медицинская картотека ранений, которая заполнялась в различных лечебных заведениях на больных, раненых и умерших – 25 млн. карточек; базы данных порталов «Память народа», «Мемориал», «Бессмертный полк», «Подвиг народа» более 120 млн. записей; печатные издания с биографическими сведениями участников ВОВ – 600 тыс. записей; сведения из семейных архивов, представленные родственниками – 400 тыс. записей. При этом необходимо отметить, что все источники имели различную структуру и характер содержащейся информации.

Информационный массив приведен к единому формату по тринадцати полям: номер по порядку, воинское звание, фамилия, имя, отчество, дата рождения, место рождения, дата призыва, кем призван, дата гибели (смерти), сведения о награждении, фотография и примечание.



Рис. 2. Источники данных для формирования информационного массива

Систематизация записей участников ВОВ и приведение к единому формату осуществлялись в несколько этапов. На первоначальном этапе были определены наиболее приоритетные источники информации, то есть проведена экспертная оценка достоверности, полноты и качества источников информации и выполнена их сортировка. Основой формируемого единого массива стали сведения, полученные при сканировании и распознавании личных дел и послужных картотек участников ВОВ, хранящихся в архивных фондах Минобороны России. Далее созданный

информационный массив дополнялся недостающими сведениями из источников, имеющих более низкую приоритетность, а иногда и требующих дополнительного подтверждения.

Отдельного внимания заслуживает этап объединения записей и устранения дублирующих сведений. В связи с тем, что источники информации имели различную структуру и содержание, порядок внесения сведений, даты записей, а также содержали ошибки и неточности, были применены различные компьютерные методы обработки информации. При этом наличие ошибок было обусловлено некачественным распознаванием текстов с графических образов документов и ветхого состояния оригиналов, неточностями в учетных документах и, конечно же, «человеческим фактором» при ручной обработке информации. Также нельзя забывать, что учетные документы периода ВОВ имели широкую географию и источники формирования и хранения: человек мог быть призван в Сибири (именные списки призванных, формируемых военными комиссариатами), проходить службу на Западном фронте (послужная карта, заполняемая кадровым органом войсковой части), находиться на излечении в Крыму (карточка учета поступивших в лечебное учреждение), иметь наградные материалы (наградные листы, ходатайства и т.д.), подготовленные вышестоящим командованием. Кроме того, ведение послужных картотек в тот период было организовано только для офицерского состава, учет рядового состава осуществлялся по именным спискам и приказам командиров воинских частей.

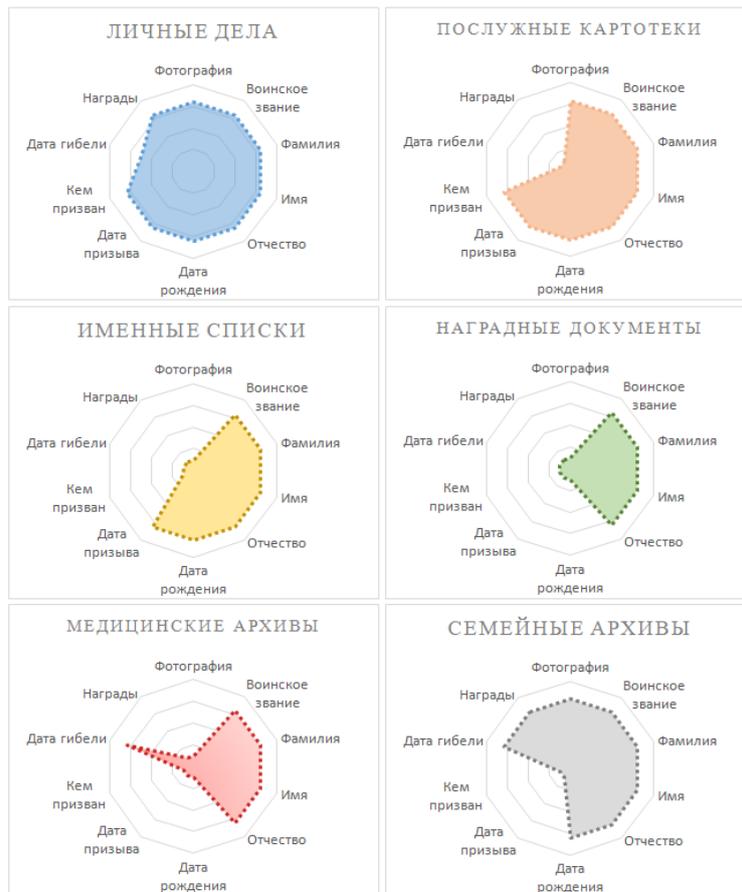


Рис. 3. Диаграммы содержания сведений в архивных источниках

Для приведения информационного массива к единому формату был проведен анализ содержания необходимых сведений по каждому классу архивных документов и составлены диаграммы в абсолютных величинах по содержанию сведений, которые представлены на рис. 3 в процентном соотношении. Необходимо отметить, что личные дела и послужные картотеки офицерского состава периода ВОВ позволили сформировать наиболее полные записи в едином массиве, а для рядового состава, чья численность значительно превышала численность офицеров – записи формировались путем объединения записей из различных источников в несколько этапов.

Алгоритм консолидации сведений из различных источников на одного участника ВОВ. После определения достоверности и приоритетности источников информации были проведены работы по формированию единого информационного массива по следующему алгоритму (рис. 4):

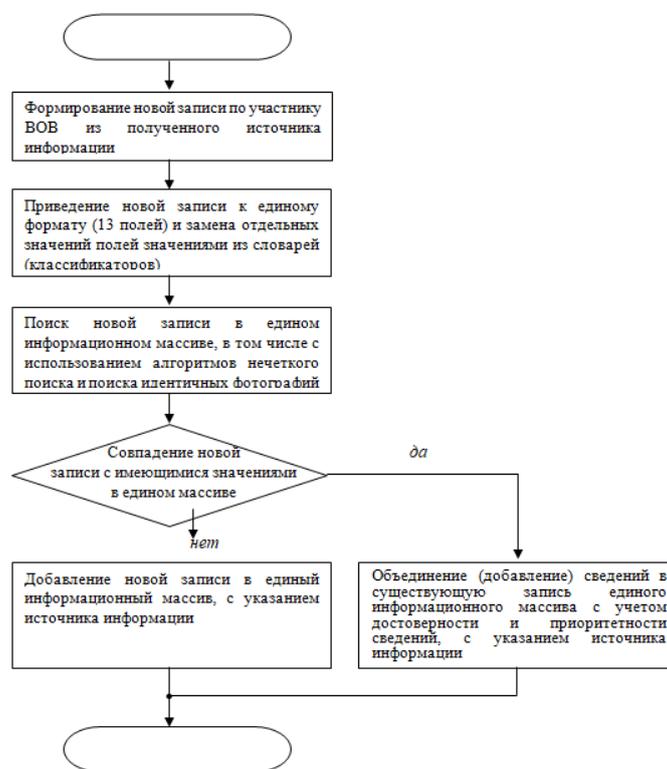


Рис. 4. Алгоритм консолидации сведений из различных источников

Использование такого алгоритма позволило организовать работу, не зависящую от сроков поступления информации, её полноты и объемов. Кроме того, этот алгоритм был неоднократно использован для поиска дублирующихся записей в едином массиве после внесения (добавления) сведений в существующие записи.

При выполнении поиска дублирующихся записей успешно были применены алгоритмы на частичное совпадение данных, то есть из подпрограмм сравнения записей попеременно исключались некоторые значения полей, а также использовались алгоритмы нечеткого поиска основанные на расстояниях Левенштейна и Дамерау – Левенштейна, которые позволили минимизировать ошибки в записях, причинами возникновения которых явились: «ручной ввод», некачественное распознавание

графических образов и наличие опечаток. Сравнение изображений (поиск дубликатов по фотографиям) осуществлялось путем приведения изображений к единому размеру (сжатию), «отбрасыванию» цветовой информации (преобразование изображения), нахождения среднеквадратической разности для каждой пары преобразованных изображений и сравнение полученной среднеквадратической разности с некоторым порогом и дополнительного обнаружения контура лица на изображении методом Виолы-Джонса и определения ключевых точек при помощи подхода, основанного на решающих обучаемых деревьях. Алгоритм поиска дубликатов по фотографиям показал высокую эффективность для людей, сменивших фамилию, имя или отчество, и особенно актуально этот вопрос был затронут при объединении записей для военнослужащих женского пола.

Выводы. Оцифровка архивных документов и формирование единых информационных ресурсов необходимы для обеспечения открытости доступа информации, уменьшения необходимого времени для её поиска, сохранения исторической памяти и увеличению количества и географии пользователей.

Работы выполненные при создании базы данных участников Великой Отечественной войны 1941–1945 годов мемориального комплекса «Дорога памяти» наглядно показывает, как с использованием компьютерных методов обработки информации возможно осуществить трансформацию и анализ информации. При этом используемая информация может содержаться на различных носителях, иметь разные структуры, объемы, географическое положение и для её поиска требуется огромное количество ресурсов, а доступ к сведениям может быть ограничен или вообще отсутствовать для обычного пользователя.

Предложенные алгоритмы обработки информации позволили в достаточно короткие сроки осуществить обработку колоссального количества сведений, содержащихся на различных носителях информации, её нормализацию и верификацию.

Дальнейшее направление исследования в этой области предлагается направить на усовершенствование алгоритмов нормализации и консолидации информации, полученной из различных источников, которые также могут послужить основой для разработки алгоритмов для миграции данных из устаревших систем в перспективные системы учета личного состава Вооруженных Сил Российской Федерации, а также при формировании информационных ресурсов, направленных на учет личного состава или создание из имеющихся фондов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы: указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919> (дата обращения: 05.04.2021).
2. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 02.05.2021).
3. *Микрин Е.А. и др.* Информационное обеспечение систем организационного управления (теоретические основы): в 3-х ч. Ч. 3. Методы повышения качества информационного обеспечения систем организационного управления / под ред. Е.А. Микрина, В.В. Кульбы. – М.: Физматлит, 2012. – 528 с.
4. Правила организации, хранения, комплектования, учета и использования документов Архивного фонда Российской Федерации и других архивных документов в государственных и муниципальных архивах, музеях и библиотеках, организациях Российской академии наук. – М., 2007.
5. Рекомендации по комплектованию, учету и организации и хранению электронных архивных документов в государственных и муниципальных архивах. – М., 2014.
6. Правила издания исторических документов в СССР. Главархив СССР, ВНИИДАД, АН СССР, Ин-т истории СССР, Археогр. Комис. ИМЛ при ЦК КПСС, Гос. ком. СССР по печати, МГИАИ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1990. – 187 с.

7. Вебер Х., Дерр М. Оцифровка как метод обеспечения сохранения // Научные и технические библиотеки. – 1998. – № 10.
8. Веретехина С.В. Оцифровка архивных документов в формате PDF/A // Инновации в науке. – 2016. – № 2 (51). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsifrovka-arhivnyh-dokumentov-v-formate-pdf-a> (дата обращения: 21.03.2021).
9. Греф Г. Информационные технологии - отстой: будущее за экономикой данных. – URL: <http://2035.media/2017/10/24/gref-future/> (дата обращения 16.05.2021).
10. Горемыкин В.П. Главное управление кадров Министерства обороны Российской Федерации: история и современность // Военная мысль. – 2013. – № 6. – С. 3-10.
11. Гусенков А.М. Интеллектуальный поиск сложных объектов в массивах больших данных // Российский научный электронный журнал. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 40-76.
12. Дюк В. Data Mining - интеллектуальный анализ данных. – Режим доступа: https://iteam.ru/publications/it/section_92/article_1448/ (дата обращения: 14.06.2021).
13. Ермолова В.В., Ермошина А.С., Ланская Д.В. Электронные документы, оцифровка и археология знаний // ЕГИ. – 2020. – № 3 (29). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnye-dokumenty-otsifrovka-i-arheologiya-znaniy> (дата обращения: 21.10.2021).
14. Кульба В.В., Мамиконов А.Г., Пелихов В.П. Методы повышения достоверности и сохранности информации в АСУ: Обзор // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 2. – С. 5-33.
15. Лисцин А.Л. Программный комплекс оцифровки документов на бумажной основе // Computational nanotechnology. – 2015. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnyy-kompleks-otsifrovki-dokumentov-na-bumazhnoy-osnove> (дата обращения: 21.10.2021).
16. Маннинг К., Рагхаван П., Шютце Х. Введение в информационный поиск. – М.: Вильямс, 2015. – 528 с.
17. Морозова Т.Ю. Базовые технологии автоматизации производства // Промышленные АСУ и контролеры. – 2013. – № 6. – С. 3-8.
18. Павельева Е.А. Использование фазовой информации в обработке изображений // Тр. международной конференции по компьютерной графике и зрению GraphiCon2016. – 2016. – С. 476-483.
19. Путин В.В. 75 лет Великой Победы: общая ответственность перед историей и будущим: официальный сайт Президента Российской Федерации // Новости, Выступления и стенограммы. 2020. – URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/63527> (дата обращения: 02.04.2021).
20. Хворова И.Е. Процесс оцифровки документов для создания электронного архива // История и архивы. – 2017. – № 2. – С. 22-29.
21. Эрнст В. Архивация: архив как хранилище памяти и его инструментализация при национал-социализме // Новое литературное обозрение. – 2005. – № 74. – URL: <http://magazines.russ.ru/nlo/2005/74/ern9.html> (дата обращения: 22.04.2021).
22. Юмашева Ю.Ю. Методические рекомендации по электронному копированию архивных документов и управлению полученным информационным массивом. – М.: ВНИИДАД, 2012. – 217 с.
23. Юмашева Ю.Ю. Научное издание исторических документов в электронной среде: проблемы источниковедения и археологии // Историческая информатика. – 2017. – № 1 (19). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnoe-izdanie-istoricheskikh-dokumentov-v-elektronnoy-srede-problemy-istochnikovedeniya-i-arheologii> (дата обращения: 21.05.2021).
24. ISO 12653-1:2007. Обработка изображений электронная. Тест-объект для черно-белого сканирования офисных документов.
25. ISO 29861:2009. Прикладные системы управления документами. Контроль качества сканирования цветных учреждений документов.
26. Aggarwal C.C. Data streams: models and algorithms. – Springer Science & Business Media, 2007. – 353 p. – DOI: 10.1007/978-0-387-47534-9.
27. Khan F.A., Ahmad A., Imran M., Alharbi M., Jan B. Efficient data access and performance improvement model for virtual data warehouse // Sustainable cities and society. – 2017. – Vol. 35. – P. 232-240. – DOI: 10.1016/j.scs.2017.08.003.

REFERENCES

1. O Strategii razvitiya informatsionnogo obshchestva v Rossiyskoy Federatsii na 2017-2030 gody: ukaz Prezidenta RF ot 09.05.2017 № 203 [Strategy of information society development in the Russian Federation for 2017-2030 years: the decree of the President of the Russian Federation dated 09.05.2017 No. 203]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919> (accessed 05 April 2021).
2. O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda: ukaz Prezidenta RF ot 07.05.2018 № 204 [On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024: Decree of the President of the Russian Federation dated 07.05.2018 No. 204]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (accessed 02 May 2021).
3. *Mikrin E.A. i dr.* Informatsionnoe obespechenie sistem organizatsionnogo upravleniya (teoreticheskie osnovy): v 3-kh ch. Ch. 3. Metody povysheniya kachestva informatsionnogo obespecheniya sistem organizatsionnogo upravleniya [Information support of organizational management systems (theoretical foundations): in 3 part. Part 3. Methods of improving the quality of information support of organizational management systems] ed. by E.A. Mikrina, V.V. Kul'by. Moscow: Fizmatlit, 2012, 528 p.
4. Pravila organizatsii, khraneniya, komplektovaniya, ucheta i ispol'zovaniya dokumentov Arkhivnogo fonda Rossiyskoy Federatsii i drugikh arkhivnykh dokumentov v gosudarstvennykh i munitsipal'nykh arkhivakh, muzeyakh i bibliotekakh, organizatsiyakh Rossiyskoy akademii nauk [Rules of organization, storage, acquisition, accounting and use of documents of the Archival Fund of the Russian Federation and other archival documents in state and municipal archives, museums and libraries, organizations of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, 2007.
5. Rekomendatsii po komplektovaniyu, uchetu i organizatsii i khraneniyu elektronnykh arkhivnykh dokumentov v gosudarstvennykh i munitsipal'nykh arkhivakh [Recommendations on the acquisition, accounting and organization and storage of electronic archival documents in state and municipal archives]. Moscow, 2014.
6. Pravila izdaniya istoricheskikh dokumentov v SSSR. Glavarkhiv SSSR, VNIIDAD, AN SSSR, In-istorii SSSR, Arkheogr. Komis. IML pri TSK KPSS, Gos. kom. SSSR po pečati, MGIAI [Rules for publishing historical documents in the USSR. Glavarkhiv of the USSR, VNIIDAD, Academy of Sciences of the USSR, Institute of History of the USSR, Archeogr. Komis. IML at the Central Committee of the CPSU, State. com. USSR Press, MGIAI]. 2nd ed. Moscow, 1990, 187 p.
7. *Veber Kh., Derr M.* Otsifrovka kak metod obespecheniya sokhraneniya [Digitization as a method of ensuring preservation], *Nauchnye i tekhnicheskie biblioteki* [Scientific and technical libraries], 1998, No. 10.
8. *Veretekhina S.V.* Otsifrovka arkhivnykh dokumentov v formate PDF/A [Digitization of archival documents in PDF format/A], *Innovatsii v nauke* [Innovations in Science], 2016, No. 2 (51). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsifrovka-arhivnyh-dokumentov-v-formate-pdf-a> (accessed 21 March 2021).
9. *Gref G.* Informatsionnye tekhnologii - otstoy: budushchee za ekonomikoy dannykh [Information technology sucks: the future belongs to the data economy]. Available at: <http://2035.media/2017/10/24/gref-future/> (accessed 16 May 2021).
10. *Goremykin V.P.* Glavnoe upravlenie kadrov Ministerstva oborony Rossiyskoy Federatsii: istoriya i sovremennost' [The Main Personnel Directorate of the Ministry of Defense of the Russian Federation: history and modernity], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2013, No. 6, pp. 3-10.
11. *Gusenkov A.M.* Intellektual'nyy poisk slozhnykh ob'ektov v massivakh bol'shikh dannykh [Intelligent search for complex objects in big data arrays], *Rossiyskiy nauchnyy elektronnyy zhurnal* [Russian Scientific Electronic Journal.], 2016, Vol. 19, No. 1, pp. 40-76.
12. *Dyuk V.* Data Mining - intellektual'nyy analiz dannykh [Data Mining - data mining]. Available at: https://iteam.ru/publications/it/section_92/article_1448/ (accessed 14 June 2021).
13. *Ermolenko V.V., Ermoshina A.S., Lanskaya D.V.* Elektronnye dokumenty, otsifrovka i arkhologiya znaniy [Documentos electrónicos, digitalización y arqueología del conocimiento], *EGI* [Investigación natural-humanitaria], 2020, No. 3 (29). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnye-dokumenty-otsifrovka-i-arheologiya-znaniy> (accessed 21 October 2021).

14. Kul'ba V.V., Mamikonov A.G., Pelikhov V.P. Metody povysheniya dostovernosti i sokhrannosti informatsii v ASU: Obzor [Métodos para aumentar la confiabilidad y la seguridad de la información en ACS: Revisión], *Avtomatika i telemekhanika* [Automatización y telemecánica], 1985, No. 2, pp. 5-33.
15. Lisitsin A.L. Programmnyy kompleks otsifrovki dokumentov na bumazhnoy osnove [Software package for digitizing paper-based documents], *Computational nanotechnology*, 2015, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnyy-kompleks-otsifrovki-dokumentov-na-bumazhnoy-osnove> (accessed 21 October 2021).
16. Manning K., Raghavan P., Shyuttse Kh. Vvedenie v informatsionnyy poisk [Introduction to information search]. Moscow: Vil'yams, 2015, 528 p.
17. Morozova T.Yu. Bazovye tekhnologii avtomatizatsii proizvodstva [Basic technologies of production automation], *Promyshlennye ASU i kontrolery* [Industrial automated control systems and controllers], 2013, No. 6, pp. 3-8.
18. Pavell'eva E.A. Ispol'zovanie fazovoy informatsii v obrabotke izobrazheniy [The use of phase information in image processing], *Tr. mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i zreniyu GraphiCon2016* [Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon2016], 2016, pp. 476-483.
19. Putin V.V. 75 let Velikoy Pobedy: obshchaya otvetstvennost' pered istoriey i budushchim: ofitsial'nyy sayt Prezidenta Rossiyskoy Federatsii [75 years of the Great Victory: shared responsibility to history and the future: official website of the President of the Russian Federation], *Novosti, Vystupleniya i stenogrammy. 2020* [News, Speeches and transcripts. 2020]. Available at: <http://kremlin.ru/events/president/news/63527> (accessed 02 April 2021).
20. Khvorova I.E. Protssess otsifrovki dokumentov dlya sozdaniya elektronnoy arkhiva [The process of digitizing documents to create an electronic archive], *Istoriya i arkhivy* [History and archives], 2017, No. 2, pp. 22-29.
21. Ernst V. Arkhivatsiya: arkhiv kak khranilishche pamyati i ego instrumentalizatsiya pri natsional-sotsializme [Archiving: archive as a storage of memory and its instrumentalization under National Socialism], *Novoe literaturnoe obozrenie* [New Literary Review], 2005, No. 74. Available at: <http://magazines.russ.ru/nlo/2005/74/ern9.html> (accessed 22 April 2021).
22. Yumasheva Yu.Yu. Metodicheskie rekomendatsii po elektronnomu kopirovaniyu arkhivnykh dokumentov i upravleniyu poluchennym informatsionnym massivom [Methodological recommendations on electronic copying of archival documents and management of the received information array]. Moscow: VNIIDAD. 2012, 217 p.
23. Yumasheva Yu.Yu. Nauchnoe izdanie istoricheskikh dokumentov v elektronnoy srede: problemy istochnikovedeniya i arkhografii [Scientific publication of historical documents in the electronic environment: problems of source studies and archeography], *Istoricheskaya informatika* [Historical Informatics], 2017, No. 1 (19). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnoe-izdanie-istoricheskikh-dokumentov-v-elektronnoy-srede-problemy-istochnikovedeniya-i-arheografii> (accessed 21 May 2021).
24. ISO 12653-1:2007. Obrabotka izobrazheniy elektronnyaya. Test-ob"ekt dlya cherno-belogo skanirovaniya ofisnykh dokumentov [ISO 12653-1:2007. Image processing is electronic. Test object for black-and-white scanning of office documents].
25. ISO 29861:2009. Prikladnye sistemy upravleniya dokumentami. Kontrol' kachestva skanirovaniya tsvetnykh uchrezhdencheskikh dokumentov [ISO 29861:2009. Applied document management systems. Quality control of scanning of color institutional documents].
26. Aggarwal C.C. Data streams: models and algorithms. Springer Science & Business Media, 2007, 353 p. DOI: 10.1007/978-0-387-47534-9.
27. Khan F.A., Ahmad A., Imran M., Alharbi M., Jan B. Efficient data access and performance improvement model for virtual data warehouse, *Sustainable cities and society*, 2017, Vol. 35, pp. 232-240. DOI: 10.1016/j.scs.2017.08.003.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.В. Суворов.

Ботвин Сергей Александрович – Главное управление кадров Министерства обороны Российской Федерации (г. Москва); e-mail: xvatkoff@mail.ru; г. Москва, Россия, тел.: 89856834525; зам. начальника.

Хватков Вадим Александрович – Военный учебный центр при Национальном исследовательском университете «Московский институт электронной техники» (г. Москва); e-mail: xvatkoff@mail.ru; г. Москва, г. Зеленоград, Россия; тел.: 89264608261; начальник учебной части – заместитель начальника.

Botsvin Sergey Aleksandrovich – The Main personnel Directorate of the Ministry of defense of the Russian Federation (Moscow); e-mail: xvatkoff@mail.ru; Moscow, Russia; phone: 89856834525; deputy chief.

Khvatkov Vadim Aleksandrovich – The military training center at the National research University "Moscow Institute of electronic technology" (Moscow); Moscow, Zelenograd, Russia, phone: +79264608261; head of the educational department – deputy head.

Раздел V. Автоматизация проектирования и сетевые технологии

УДК 621.3.049.771.14

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-220-231

Д.В. Тельпухов, Т.Д. Жукова, А.Н. Щелоков, П.Д. Кретинина

ПРИМЕНЕНИЕ КОДА ХЭММИНГА В ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ*

В настоящее время при проектировании интегральных схем разработчикам приходится учитывать очень большое количество разнородных факторов, которые связаны с обеспечением необходимых характеристик быстродействия, занимаемой площади, энергоэффективности, выходом годных, удобством последующего тестирования, требованиями к универсальности, автономности, и так далее. Одним из основных факторов является надежность функционирования при последующей эксплуатации. Этот критерий выходит на первый план для устройств ответственного применения, а также для устройств, работающих при воздействии дестабилизирующих факторов. Для обеспечения повышенной надежности используют различные методы и подходы на разных уровнях абстракции. Часть из них могут быть применены на этапе проектирования. Одним из основных методов для повышения надежности интегральных схем на этапе проектирования – это использование богатого инструментария из теории помехоустойчивого кодирования. Традиционная область применения помехоустойчивых кодов – это контроль целостности хранимой и передаваемой информации. Комбинационные схемы, напротив, изменяют информацию и не имеют в своём составе запоминающих элементов. Комбинационные схемы на вентильном уровне реализуют таблицы перекодировок, которые каждому входному воздействию однозначно ставят в соответствие некоторое выходное значение. Тем не менее, применение помехоустойчивых кодов для построения сбоеустойчивых комбинационных схем оказывается весьма эффективным. Для этого требуется введение в состав схемы дополнительных комбинационных блоков, которые обеспечивают кодирование, декодирование, контроль, а в некоторых случаях и исправление возникающих в схеме ошибок. В статье исследуется эффективность применения кодов Хэмминга для задачи построения сбоеустойчивых комбинационных схем. В работе были рассмотрены две основные модификации кодов Хэмминга для реализации сбоеустойчивых комбинационных схем. Разработаны средства для автоматизированного синтеза схем функционального контроля на основе данных кодов. Исследована структурная избыточность, а также надёжностные характеристики получаемых схем. Проведено сравнение с традиционными методами кратного резервирования. Выведены оценочные функции для избыточности и вероятности пропуска ошибки.

Сбоеустойчивость; код Хэмминга; схемы функционального контроля (СФК); комбинационные схемы.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-1414.2021.4.

D.V. Telpukhov, T.D. Zhukova, A.N. Schelokov, P.D. Kretinina

**APPLICATION OF THE HAMMING CODE IN THE PROBLEM
OF INCREASING FAULT TOLERANCE OF LOGIC CIRCUITS**

Currently, when designing integrated circuits, developers have to take into account a very large number of dissimilar factors that are associated with ensuring the necessary performance characteristics, occupied area, energy efficiency, yield, convenience of subsequent testing, requirements for universality, autonomy, and so on. One of the main factors is the reliability of operation. This criterion comes to the fore for critical applications, as well as for devices operating under the influence of destabilizing factors. To provide increased reliability, different methods and approaches are used at different levels of abstraction. Some of them can be applied at the design stage. One of the main methods for improving the reliability of integrated circuits at the design stage is the use of tools from the theory of error-correcting coding. The traditional field of application of error-correcting codes is the control of the integrity of stored and transmitted information. Combinational logic circuits, on the other hand, change information and do not have storage elements. Combinational logic circuits implement look-up tables at the gate level, which unambiguously assign a certain output value to each input action. Nevertheless, the use of error-correcting codes for constructing error-tolerant combinational circuits turns out to be very effective. This requires the introduction of additional combinational blocks into the circuit, which provide coding, decoding, control, and in some cases correction of errors arising in the circuit. The paper investigates the efficiency of using Hamming codes in relation to the construction of fault-tolerant combinational circuits. The paper considered classical Hamming code and his main modification - weighted code with summation without carries for the implementation of fault-tolerant combinational circuits. Means have been developed for the automated synthesis of fault-tolerant circuits based on these codes. Structural redundancy and reliability characteristics of the resulting circuits are investigated. Comparison with traditional method triple modular redundancy is carried out. Estimating functions are derived for redundancy and the probability of missing an error.

Fault tolerance; Hamming code, concurrent error detection (CED) circuits; combinational logic circuit.

Введение. Область применения интегральных схем в настоящее время непрерывно растет, охватывая такие сферы деятельности, в которых ошибка или случайный сбой могут привести к колоссальным убыткам или катастрофическим последствиям. Зачастую, интегральные схемы должны эксплуатироваться в условиях различных дестабилизирующих факторов включая электромагнитные помехи, высокие или низкие температуры, механические и радиационные воздействия. В ряде случаев интегральные схемы должны работать автономно, без возможности оперативного контроля или замены отказавших блоков. Эти требования должны учитываться на этапе проектирования и отладки проектов цифровых схем [1–2]. В таких условиях на первый план выходит задача создания методов и алгоритмов для разработки интегральных схем повышенной надежности на различных этапах маршрута проектирования [3].

На сегодняшний день основным подходом в области логического проектирования сбоеустойчивых СБИС и систем на кристалле является метод кратного резервирования. Недостатком этого метода является значительная структурная избыточность и отсутствие возможности гибкой настройки технических решений под конкретные задачи. Эта проблема успешно решается применением перспективного подхода на основе использования средств функционального контроля (СФК) [4–10].

Функциональный контроль обеспечивается за счет структурной избыточности схемы, т.е. за счёт добавления к основной схеме дополнительных комбинационных модулей. Состав и внутренняя структура этих модулей определяются выбором того или иного помехоустойчивого кода. Выбор конкретного помехоустойчивого кода является нетривиальной задачей, и требует учёта характеристик защищаемой комбинационной схемы, требований к надежности функционирования, требований к занимаемой площади и т.д. [11–13].

В общем случае, схема функционального контроля (СФК) имеет следующую структуру: основная схема (ОС), кодер и декодер. Кодер состоит из копии ОС и блока вычисления проверочных разрядов. На рис. 1 представлена общая структура схемы функционального контроля.

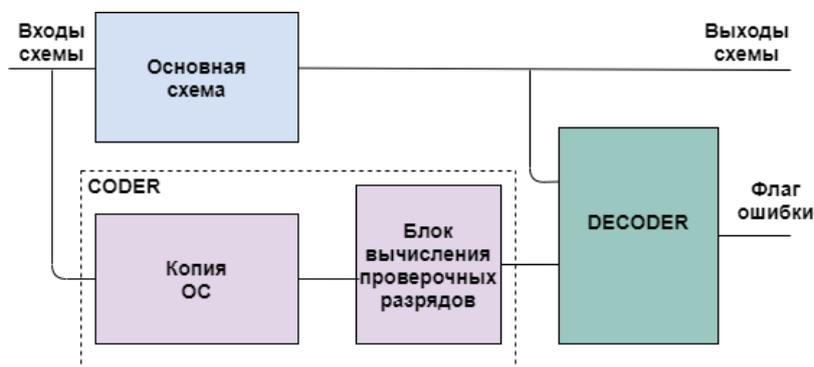


Рис. 1. Общая структура схем функционального контроля

Выходы комбинационной схемы (и ее копии) – это информационные разряды, на основе которых кодер формирует проверочные разряды. Информационные разряды комбинационной схемы и проверочные разряды кодера вместе составляют кодовое слово. Оно подается на декодер. После чего декодер формирует флаг, сообщающий о появлении или отсутствии ошибки в комбинационной схеме.

При возникновении ошибки на любом из элементов СФК на выходе может возникнуть одно из следующих состояний [14, 15]:

- ◆ маскирование, т.е. при возникновении ошибка не повлияла ни на выходы комбинационной схемы, ни на флаг ошибки;
- ◆ обнаружение, т.е. ошибка повлияла на выходы комбинационной схемы и флаг сигнализировал об этом;
- ◆ пропуск, т.е. ошибка повлияла на выходы комбинационной схемы, но флаг не сигнализировал об этом;
- ◆ ложная тревога, т.е. ошибка не повлияла на выходы комбинационной схемы, но флаг сообщил об ошибке.

В более общем случае, если допустить, что выходы СФК идут не напрямую из основной схемы, а из декодера, то можно говорить о СФК, способной также исправлять ошибку. Следовательно, появляется пятое состояние системы:

- ◆ исправление, т.е. ошибка повлияла на выходы комбинационной схемы, но декодер обнаружил это и исправил.

С другой стороны, если при этом не анализировать выходы основной схемы, то исправление ошибки будет неотличимо от маскирования. Таким образом использование СФК с возможностью исправления должно обеспечить уменьшение вероятности пропуска ошибки за счет повышения вероятности маскирования и обнаружения ошибки.

При организации схем функционального контроля, как правило, используются помехоустойчивые коды с небольшой избыточностью, которая направлена на обнаружение (и исправление) ошибок. Для оценки эффективности разрабатываемых схем следует обеспечить сравнение с традиционными мажоритарными методами, которые по сути являются вырожденными СФК, реализуя простейший код повторения.

1. Классический код Хэмминга. Это избыточный делимый код, способный исправить одну однократную ошибку и обнаружить двукратную [16, 17]. Универсальный принцип построения СФК – это формирование проверочной матрицы, которая определяет функции для вычисления проверочных разрядов. Число проверочных разрядов для кода Хэмминга вычисляется по формуле:

$$k + 1 \leq 2^n - n,$$

где k – число информационных разрядов, n – число проверочных разрядов.

Матрица $G(x)$ формируется следующим образом: столбцы матрицы заполняются номерами разрядов в двоичном представлении. Каждая строка матрицы отвечает за некоторую проверку на четность, а столбцы матрицы отвечают за проверочные g_i , если в нем содержится всего одна единица, и информационные f_i разряды. Для $H(4,3)$ порождающая матрица будет иметь следующий вид:

$$G(x) = \begin{pmatrix} g_1 & g_2 & f_1 & g_3 & f_2 & f_3 & f_4 \\ g_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ g_2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ g_1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Для вычисления проверочных разрядов составляются уравнения, в которых информационные разряды, значение которых в соответствующей строке равно единице, суммируются по модулю 2.

$$\begin{cases} g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4 \\ g_2 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4 \\ g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4 \end{cases}$$

Декодер реализован с помощью синдромного декодирования. Основная суть заключается в том, что соответствующие проверочные разряды, вычисленные в кодере g_i и декодере g'_i , складываются по модулю 2 и тем самым мы получаем наши синдромы (s_1, \dots, s_n) . Далее синдромы логически складываются, для вычисления флага ошибки.

Код Хэмминга способен исправлять ошибки, поэтому в его декодере содержится блок исправления ошибки, состоящий из дешифратора исправляющих XOR'ов и мультиплексора, выбирающего итоговые выходы схемы.

В итоге схема функционального контроля будет иметь следующий вид, представленный на рис. 2.

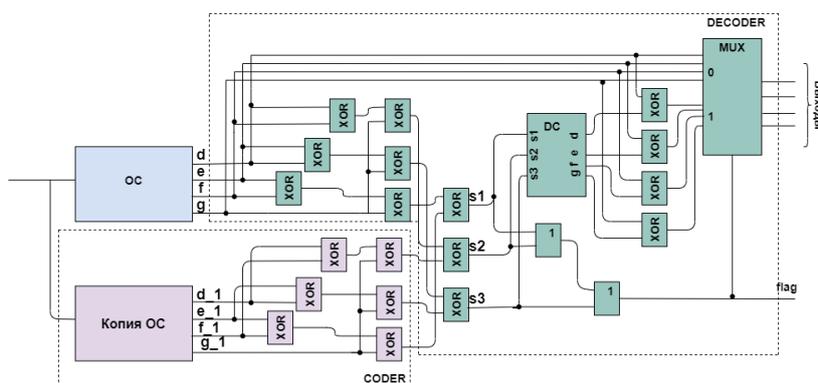


Рис. 2. СФК на основе классического кода Хэмминга для схемы $b1_synth$

Данный метод был реализован в виде программного модуля в составе программного комплекса SICADA для автоматизированного синтеза СФК [18]. Также были выведены аналитические формулы для предварительной оценки структурной избыточности (1) и вероятности пропуска ошибки (2):

$$N_{HAM} = 2N_{OC} + 2 * \sum_{i,j=0}^{n-1,k+n-2} g_{ij} + n + k(n - 3) \tag{1}$$

$$P_{HAM} = \frac{N_{OC}}{N_{CED}} p_3 + \frac{3k + 1}{N_{CED}}, \tag{2}$$

где N_{OC} – количество элементов в ОС, g_{ij} – элемент порождающей матрицы, p_3 – вероятность возникновения 3-кратной ошибки.

2. Модифицированный код Хэмминга. Данный метод был предложен в работе [19] как взвешенный код с суммированием без операций переноса. Принцип его реализации близок к классической реализации, но имеет несколько отличий. Во-первых, данный код может только обнаруживать ошибки. Во-вторых, число проверочных разрядов вычисляется по формуле:

$$n = \lceil \log_2(k + 1) \rceil,$$

где k – число информационных разрядов, n – число проверочных разрядов.

В-третьих, каждому разряду присваивается весовой коэффициент из ряда натуральных чисел в порядке возрастания от младшего разряда к старшему. На основе двоичного представления этих коэффициентов строится порождающая матрица. Столбцы матрицы заполняются весовыми коэффициентами разрядов в двоичном представлении.

$$G(x) = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \\ g_3 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ g_2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ g_1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Далее проверочные разряды вычисляются по такому же принципу, что и у кода Хэмминга, но из-за различий порождающих матриц уравнения будут иметь другой вид:

$$\begin{cases} g_1 = f_1 \oplus f_3 \\ g_2 = f_2 \oplus f_3 \\ g_3 = f_4 \end{cases}$$

Декодер строится также по принципу синдромного декодирования.

В итоге схема функционального контроля будет иметь вид, представленный на рис. 3.

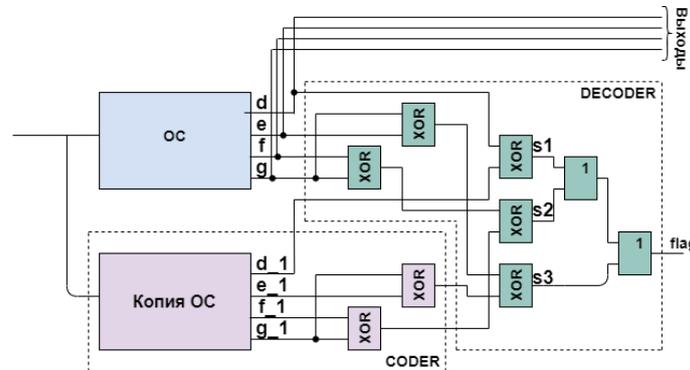


Рис. 3. СФК на основе модифицированного кода Хэмминга для схемы b1_synth

Данный метод также был интегрирован в систему CICADA [18]. Были выведены оценочные функции для предварительной оценки структурной избыточности (3) и вероятности пропуска ошибки (4).

$$N_{SWC} = 2N_{OC} + 2 * \sum_{i,j=0}^{n-1,k-1} g_{ij} - 1 \quad (3)$$

$$P_{SWC} = \sum_{i=3}^{RATEmax} \frac{N_{OC}}{N_{CED}} p_i, \quad (4)$$

где N_{OC} – количество элементов ОС, g_{ij} – элемент порождающей матрицы, p_i – вероятность возникновения ошибки i -ой кратности.

Результаты численных экспериментов. Основными параметрами для оценки эффективности любой СФК являются:

- ◆ структурная избыточность;
- ◆ обнаруживающая способность.

При оценке результатов были рассмотрены: классический код Хэмминга (HAM), модифицированный код Хэмминга (взвешенный код с суммированием без операций переноса (SWC)) и метод тройного модульного резервирования (TMR).

Моделирование представляет собой инжектирование ошибок при различных входных данных в каждый элемент схемы функционального контроля. Следует отметить, что ошибки с равной вероятностью могут попасть в любой элемент схемы, включая элементы проверяющих и исправляющих подсхем. Под ошибкой подразумевается инверсия сигнала вентиля. Моделирование проводилось для всех схем из наборов ISCAS и LGSynth'89 [20].

Первый эксперимент был направлен на оценку и сравнение структурной избыточности классического и модифицированного кодов Хэмминга, а также метода тройного модульного резервирования. В табл. 1 представлены результаты сравнения помехоустойчивых кодов для некоторых схем из наборов ISCAS и LGSynth'89.

Таблица 1

Сравнительный анализ структурной избыточности

Схема	Число элементов				Структурная избыточность		
	ОС	HAM	SWC	TMR	HAM	SWC	TMR
cm82a_synth	25	83	57	90	3.32	2.28	3.6
c432	216	517	455	683	2.39	2.1	3.16
b1_synth	13	71	35	59	5.46	2.7	4.54
rd84	245	535	499	755	2.2	2.03	3.08
5xp1	135	392	303	455	2.9	2.24	3.37
con1	23	65	49	79	2.83	2.13	3.43
apex2	423	879	853	1284	2.07	2.01	3.04

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- ◆ структурная избыточность классического кода Хэмминга почти не отличается от TMR;
- ◆ структурная избыточность модифицированного кода Хэмминга в полтора раза меньше, чем избыточность TMR.

Также была проверена эффективность полученных оценочных функций для предварительной оценки структурной избыточности. Результаты экспериментов показали полное совпадение вычисленных по формулам (1) и (3) значений структурной избыточности с результатами моделирования.

Второй эксперимент был направлен на оценку и сравнение обнаруживающей способности кодов. Для этого было проведено инжектирование ошибок в каждый элемент схем при разных входных данных. Полученные вероятности были вычислены как среднее арифметическое для всех схем.

Таблица 2

Сравнительный анализ обнаруживающей способности

СФК на основе	Вероятность пропуска ошибки, %	Вероятность обнаружения ошибки, %	Вероятность исправления ошибки, %	Вероятность маскирования ошибки, %	Вероятность ложной тревоги, %
НАМ	6.96176	18.20535	1.95726	55.40126	17.47438
SWC	0.12748	17.65348	-	48.2777	33.94133
TMR	8.791157	-	91.20884		-

Главным критерием для схем функционального контроля является вероятность пропуска ошибки. Чем меньше эта вероятность, тем лучше. С этой точки зрения самым эффективным является модифицированный код Хэмминга, так как его вероятность пропуска близка к нулю. Однако у него нет возможности исправлять ошибки в отличие от классического кода Хэмминга и метода тройного модульного резервирования. Также из таблицы видно, что вероятность пропуска ошибки Н-кода меньше в 1.26 раз, чем у метода TMR, следовательно, классический код Хэмминга в этом смысле оказался эффективнее, чем TMR.

После проведенного моделирования было выявлено, что для некоторых схем СФК на основе модифицированного кода Хэмминга получилась похожей на систему дублирования и именно поэтому у схемы контроля на основе SWC-кода близкая к нулю вероятность пропуска. А также, что пропуск ошибки возникает при многократной ошибке, которая влияет на выходы основной схемы, но при этом проверочные разряды для основной схемы и подсхемы кодера (с правильными выходами) будут совпадать.

В следующем эксперименте проводилась минимизация подсхем кодера, декодера, а также их вместе для модифицированного кода Хэмминга с помощью Yosys [21], чтобы выяснить возможно ли улучшить работу схемы контроля. Моделирование для минимизированных схем проводилось для 20 случайных схем из набора LGSynth'89. В таблице представлены результаты моделирования обычной схемы контроля и с минимизацией ее подсхем.

Таблица 3

Сравнительный анализ обнаруживающей способности модифицированного кода Хэмминга при разных вариантах минимизации подсхем

	Вероятность маскирования ошибки, %	Вероятность пропуска ошибки, %	Вероятность обнаружения ошибки, %	Вероятность ложной тревоги, %	Структурная избыточность
SWC без минимизации	48.73985	0.22454	18.67762	32.35799	2.34
SWC с мин. кодером	48.54389	0.29477	22.87444	28.28689	1.97
SWC с мин. декодером	49.22576	0.19914	18.47627	32.09883	2.35
SWC с мин. кодером и декодером	48.82281	0.29691	22.12457	28.7557	1.99

Из полученных результатов можно сделать вывод, что при минимизации кодера можно улучшить работу схемы. Так как при минимизации кодера увеличивается вероятность обнаружения ошибки, а вероятность ложной тревоги уменьшается. Также при минимизации кодера будет минимальная структурная избыточность.

Для того что бы определить эффективность оценочной функции для предварительной оценки вероятности пропуска ошибки проводился анализ данных, полученных при моделировании и с помощью формул (2) и (4) для классического и модифицированного кода Хэмминга, соответственно. На рис. 4 представлен график сравнения полученных по результатам проведенного анализа данных. Из представленного ниже графика видно, что результаты, полученные с помощью аналитической формулы, коррелируют с практическими значениями. Это подтверждает вычисленный коэффициент корреляции, который составил 0,86.

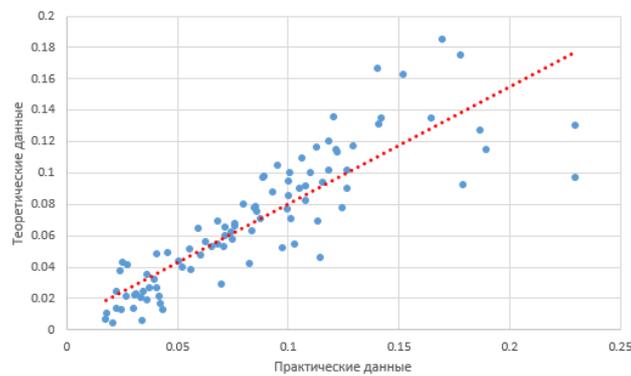


Рис. 4. Корреляционный анализ зависимости данных, рассчитанных по аналитической формуле, с полученными в результате моделирования экспериментальными данными

Заключение. В ходе данной работы были разработаны программные модули для автоматического синтеза схем функционального контроля на основе классического и модифицированного кодах Хэмминга, а также для их моделирования. Про-

ведены моделирования полученных схем контроля для оценки их эффективности. Она оценивалась на основе структурной избыточности и обнаруживающей способности полученных схем контроля.

По результатам моделирований можно сделать следующие выводы:

- ◆ схемы контроля на основе модифицированного кода Хэмминга способны обнаружить все однократные и двукратные ошибки, возникающие в схеме, и обла- дают практически нулевой вероятностью пропуска ошибки;

- ◆ за счет хорошей обнаруживающей способности высокая вероятность ложной тревоги, т.к. схема обнаруживает и ошибки, которые произошли в схеме контроля;

- ◆ наименьшей структурной избыточностью обладает схема контроля на ос- нове модифицированного кода Хэмминга. Классический код Хэмминга в среднем обладает меньшей структурной избыточностью по сравнению с методом тройного модульного резервирования;

- ◆ классический код Хэмминга с меньшей вероятностью пропускает ошибки, чем метод тройного модульного резервирования.

Исследованные в статье методы были интегрированы в систему автоматизи- рованного проектирования SICADA. Для этого были выведены оценочные функ- ции для оценки структурной избыточности и вероятности пропуска ошибки. Про- веденные вычислительные эксперименты показали высокую корреляцию аналити- ческих оценок с результатами имитационного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванников А.Д., Стемпковский А.Л.* Формализация задачи отладки проектов цифровых систем // Информационные технологии. – 2014. – № 9. – С. 3-10.
2. *Иванников А.Д., Стемпковский А.Л.* Математическая модель отладки проектов сложных цифровых схем и микросистем на основе представления последних в виде семейства стационарных динамических систем // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2014. – № 2. – С. 123-128.
3. *Gavrilov S.V., Telpukhov D.V.* Automated Evolutionary Design of Fault-Tolerant Logic Circuits // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2019. – № 1. – С. 2-6.
4. *Сапожников В.В., Сапожников В.В., Ефанов Д.В.* Синтез самопроверяемых схем встро- енного контроля на основе логического дополнения до равновесного кода "2 из 5" // Из- вестия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 3. – С. 163-175.
5. *Mitra S., McCluskey E.J.* Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proc. Inter- national Test Conference. – 2000. – P. 985-994.
6. *Гессель М., Морозов А.В., Сапожников В.В., Сапожников В.В.* Логическое дополнение - новый метод контроля комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167-176.
7. *Пивоваров Д.В.* Построение систем функционального контроля многовыходных комби- национных схем методом логического дополнения по равновесным кодам // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 131-149.
8. *Хетагуров Я.А., Руднев Ю.П.* Повышение надежности цифровых устройств методами избыточного кодирования. – М.: Энергия, 1974. – 270 с.
9. *Touba N.A., McCluskey E.J.* Logic Synthesis of Multilevel Circuits with Concurrent Error Detec- tion // IEEE Trans. CAD. – July 1997. – Vol. 16. – P. 783-789. – DOI: 10.1109/43.644041.
10. *Jha N.K., Wang S.J.* Design and Synthesis of Self-Checking VLSI circuits // IEEE Transac- tions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – July 1993. – Vol. 12, No. 6. – P. 878-887. – DOI: 10.1109/43.229762.
11. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
12. *Согомонян Е.С., Слабаков Е.В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые сис- темь. – М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.

13. Efanov D., Sapozhnikov V., Blyudov A., Sapozhnikov V.I. On the Problem of Selection of Code with Summation for Combinational Circuit Test Organization // Proceedings of IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2013. – 2013. – P. 6673133.
14. Стемковский А.Л., Тельпухов Д.В., Деменева А.И., Жукова Т.Д. Маршрут проектирования схем функционального контроля комбинационных устройств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – С. 92-98.
15. Жукова Т.Д. Разработка системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования // Проблемы разработки перспективных микро- нано- электронных систем (МЭС). – 2020. – С. 51-57. – DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-51-57.
16. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств. – СПб.: Наука, 2018. – 151 с.
17. Тельпухов Д.В., Деменева А.И., Жукова Т.Д., Хрущев Н.С. Исследование и разработка систем автоматизированного проектирования схем функционального контроля комбинационных логических устройств // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. – 2018. – № 1 (169). – С. 15-22.
18. Stempkovsky A.L., Zhukova T.D., Telpukhov D.V. and Gurov S.I. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2021. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/SIBCON 50419.2021.9438900.
19. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Взвешенный код с суммированием без операций переноса для решения задач технической диагностики дискретных систем // Приборостроение. – 2018. – № 4.
20. URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/> (дата доступа: 16.08.2021).
21. Clifford Wolf, «Yosys Open SYnthesis Suite». Available: <http://www.clifford.at/yosys/about.html>.

REFERENCES

1. Ivannikov A.D., Stempkovskiy A.L. Formalizatsiya zadachi otladki proektov tsifrovyykh sistem [Formalization of the task of debugging digital systems projects], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2014, No. 9, pp. 3-10.
2. Ivannikov A.D., Stempkovskiy A.L. Matematicheskaya model' otladki proektov slozhnykh tsifrovyykh skhem i mikrosistem na osnove predstavleniya poslednykh v vide semeystva statsionarnyykh dinamicheskikh sistem [Mathematical model of debugging projects of complex digital circuits and microsystems based on the representation of the latter in the form of a family of stationary dynamic systems], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)], 2014, No. 2, pp. 123-128.
3. Gavrilov S.V., Telpukhov D.V. Automated Evolutionary Design of Fault-Tolerant Logic Circuits, *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)], 2019, No. 1, pp. 2-6.
4. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. Sintez samoproveryaemykh skhem vstroennogo kontrolya na osnove logicheskogo dopolneniya do ravnovesnogo koda "2 iz 5" [Synthesis of self-testable integrated control schemes based on the logical complement to the equilibrium code "2 out of 5"], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrumentation], 2021, Vol. 64, No. 3, pp. 163-175.
5. Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose?, *Proc. International Test Conference*, 2000, pp. 985-994.
6. Gessel' M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.V. Logicheskoe dopolnenie - novyy metod kontrolya kombinatsionnykh skhem [Logical addition - a new method of control of combinational circuits], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 2003, No. 1, pp. 167-176.
7. Pivovarov D.V. Postroenie sistem funktsional'nogo kontrolya mnogovykhodnykh kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya po ravnovesnym kodam [Construction of systems of functional control of multi-output combinational circuits by the method of logical addition according to equilibrium codes], *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2018, Vol. 4, No. 1, pp. 131-149.

8. *Khetagurov Ya.A., Rudnev Yu.P.* Povyshenie nadezhnosti tsifrovyykh ustroystv metodami izbytochnogo kodirovaniya [Improving the reliability of digital devices by redundant coding methods]. Moscow: Energiya, 1974, 270 p.
9. *Touba N.A., McCluskey E.J.* Logic Synthesis of Multilevel Circuits with Concurrent Error Detection, *IEEE Trans. CAD*, July 1997, Vol. 16, pp. 783-789. DOI: 10.1109/43.644041.
10. *Jha N.K., Wang S.J.* Design and Synthesis of Self-Checking VLSI circuits, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, July 1993, Vol. 12, No. 6, pp. 878-887. DOI: 10.1109/43.229762.
11. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
12. *Sogomonyan E.S., Slabakov E.V.* Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivye sistemy [Self-testing devices and fault-tolerant systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 208 p.
13. *Efanov D., Sapozhnikov V., Blyudov A., Sapozhnikov V.I.* On the Problem of Selection of Code with Summation for Combinational Circuit Test Organization, *Proceedings of IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2013*, 2013, pp. 6673133.
14. *Stempkovskiy A.L., Tel'pukhov D.V., Demeneva A.I., Zhukova T.D.* Marshrut proektirovaniya skhem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh ustroystv [The route of designing schemes of functional control of combinational devices], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2018, pp. 92-98.
15. *Zhukova T.D.* Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya SFK na osnove metodov izbytochnogo kodirovaniya [Development of a computer-aided design system based on redundant coding methods], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of promising micro-nanoelectronic systems (MES)], 2020, pp. 51-57. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-51-57.
16. *Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V.* Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv [Hamming codes in systems of functional control of logical devices]. St. Petersburg.: Nauka, 2018, 151 p.
17. *Tel'pukhov D.V., Demeneva A.I., Zhukova T.D., Khrushchev N.S.* Issledovanie i razrabotka sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya skhem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh ustroystv [Research and development of computer-aided design systems for functional control circuits of combinational logic devices], *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3: Mikroelektronika* [Electronic engineering. Series 3: Microelectronics], 2018, No. 1 (169), pp. 15-22.
18. *Stempkovskiy A.L., Zhukova T.D., Telpukhov D.V. and Gurov S.I.* CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities, *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2021, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
19. *Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V.* Vzveshenny kod s summirovaniem bez operatsiy perenosa dlya resheniya zadach tekhnicheskoy diagnostiki diskretnykh sistem [Weighted code with summation without transfer operations for solving problems of technical diagnostics of discrete systems], *Priborostroenie* [Instrumentation], 2018, No. 4.
20. Available at: <https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/> (accessed 16 August 2021).
21. Clifford Wolf, «Yosys Open SYnthesis Suite». Available: <http://www.clifford.at/yosys/about.html>.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.В. Коршунов.

Тельпухов Дмитрий Владимирович – Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук; e-mail: nofrost@inbox.ru; Москва, Зеленоград, Россия; д.т.н.; руководитель отдела методологии проектирования интегральных схем.

Жукова Татьяна Дмитриевна – e-mail: zhukova_t@ippm.ru; м.н.с.

Щелоков Альберт Николаевич – e-mail: schan@ippm.ru; к.ф.-м.н.; с.н.с.

Кретинина Полина Денисовна – e-mail: kretininapolina@gmail.com; инженер-исследователь.

Telpukhov Dmitry Vladimirovich – Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, e-mail: nofrost@inbox.ru; Moscow, Zelenograd, Russia; dr. of eng. sc.; head of department of integrated circuits design methodology.

Zhukova Tatyana Dmitrievna – e-mail: zhukova_t@ippm.ru; junior researcher.

Schelokov Albert Nikolaevich – e-mail: schan@ippm.ru; cand. of phis.-math. sc.; senior researcher.

Kretinina Polina Denisovna – e-mail: kretinapolina@gmail.com; research engineer.

УДК 519.712.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-231-243

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

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ*

Рассматривается задача размещения элементов цифровой вычислительной техники. Проведен анализ современного состояния исследований по данной теме, отмечена актуальность рассматриваемой задачи. Подчеркнута важность разработки новых эффективных методов решения подобных задач. Показано место задачи размещения в общем цикле конструкторского этапа проектирования. Отмечена важность качественного решения задачи размещения с точки зрения успешного выполнения последующих этапов проектирования. Отмечена важность минимизации задержек соединений в процессе проектирования устройств большой размерности. Проведен обзор и анализ различных моделей и критериев оценки решения задачи размещения. Подчеркнуто, что важнейшим критерием является длина соединений, она оказывает существенное влияние на применяемые при проектировании технологии. Выполнена комплексная математическая постановка задачи размещения элементов цифровой вычислительной техники. Приведена целевая функция и ограничения рассматриваемой задачи размещения как задачи оптимизации. Проанализированы перспективные подходы к решению задач проектирования, описаны гибридные методы и модели решения сложных многокритериальных задач оптимизации и проектирования. Описаны принципы работы и модель нечеткого логического контроллера. Приведено описание используемой схемы нечеткого управления. Определены функции различных блоков нечеткого логического контроллера. Предложена структура многослойной нейронной сети, реализующей функцию Гаусса. Описано взаимодействие блоков нечеткого генетического алгоритма. Предложена модель гибридного алгоритма решения задачи размещения. 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; задачи оптимизации; биоинспирированные алгоритмы; гибридные методы; генетические алгоритмы; нечеткое управление.

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

HYBRID METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF PLACEMENT OF DIGITAL COMPUTER DEVICES

The problem of placing elements of digital computing technology is considered 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 such problems are highlighted. The place of the placement problem in the general cycle of

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00715.

the design stage is shown. The importance of a high-quality solution to the placement problem from the point of view of the successful implementation of subsequent design stages is noted. The importance of minimizing connection delays in the design process of large-scale devices is noted. A review and analysis of various models and criteria for evaluating the solution to the placement problem is carried out. It was emphasized that the most important criterion is the length of the joints, it has a significant impact on the technologies used in the design. A complex mathematical formulation of the problem of placing elements of digital computing equipment has been completed. Perspective approaches to solving design problems are analyzed, hybrid methods and models for solving complex multicriteria optimization and design problems are described. The principles of operation and the model of a fuzzy logic controller are described. The description of the used fuzzy control scheme is given. The functions of various blocks of a fuzzy logic controller are determined. The structure of a multilayer neural network that implements the Gaussian function is proposed. The interaction of blocks of a fuzzy genetic algorithm is described. A model of a hybrid algorithm for solving the placement problem 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 to determine the effectiveness of the developed algorithm and select the optimal values of the control parameters were carried out.

Design automation; the problem of placing elements of digital computing devices; optimization problems; bioinspired algorithms; hybrid methods; genetic algorithms; fuzzy control.

Введение. Цикл проектирования элементов цифровой вычислительной техники включает следующие этапы: спецификация системы, функциональное проектирование, логическое проектирование, схемное проектирование, конструкторское проектирование, изготовление, сборка, тестирование и контроль [1–3]. В свою очередь конструкторский этап проектирования включает задачи: компоновки, размещения, трассировки и т.д.

Размещение – одна из важнейших задач этапа физического проектирования в процессе решения которой выполняется построение макета проектируемой схемы на основе заданного списка соединений, а также оценка времени прохождения сигналов и возможных задержек межсоединений. Важность данной задачи определяется тем, что на данном этапе строится пространственная модель расположения элементов, которая является основой выполнения всех последующих задач проектирования. В современных электронных устройствах задержки межсоединений становятся определяющим фактором, а поскольку взаимное расположение элементов схемы определяется на этапе размещения, это оказывает существенное влияние на качество проектирования [1–3].

В процессе решения задачи размещения выполняется преобразование существующего на уровне блоков / затворов / транзисторов списка цепей в фактическую схему за конечное время. Формируются основные строительные блоки на основе логического списка цепей, и после определения точного местоположения элементов схемы в каждой области кристалла выполняется общая оценка временных характеристик проектируемого объекта. В современных СБИС сложность и размерность проектируемых схем непрерывно увеличивается, необходимая тактовая частота продолжает расти из-за более высокой производительности и более сложных функциональных требований для одного чипа. Более того, в условиях активного масштабирования технологий в эпоху субмикронных значений, задержки между соединениями становятся доминирующим фактором для общей производительности чипа. Поскольку расположение элементов схемы и соответствующие задержки межсоединений определяются на этапе размещения, это оказывает существенное влияние на конечные характеристики проекта. Более того, если задача размещения решена плохо, практически невозможно выполнить синхронизацию, независимо от того, насколько успешно применяются другие физические методы синтеза и оптимизации трассировки. Следовательно, размещение рассматривается как один из наиболее важных и эффективных методов оптимизации в

процессе физического синтеза. Большинство существующих логических и физических алгоритмов оптимизации должны взаимодействовать с алгоритмом задачи размещения, чтобы улучшить сроки проектирования и гарантировать легальное решение по задаче размещения после проведения оптимизации. Следовательно, большинство программных и алгоритмических инструментов физического проектирования нацелены на повышение эффективности решения задачи размещения.

После того, как основные блоки зафиксированы в месте и определены границы областей для размещения остальных ячеек выполняется глобальное размещение, а за тем детальное размещение для внесения локальных улучшений. В процессе решения задачи размещения ячеек на рабочем поле производится назначение наиболее длинных соединений, которые могут увеличивать задержки в проблемных областях. Эти задержки затем пытаются уменьшить с помощью применения методов буферизации и определения размеров соединений. При этом решение задачи размещения элементов и синтеза рабочего варианта прокладки соединений с учетом имеющихся временных ограничений в современных системах проектирования происходит в едином процессе, называемом физическим синтезом. Физический синтез включает в себя практически все традиционные процессы физического проектирования: планирование кристалла, размещение, глобальную и детальную трассировку, при этом добавляется возможность учета требований по срокам проектирования. Безусловно, плохое качество решения задач планирования и размещения автоматически отражается на качестве физического синтеза, поэтому проектировщики выполняют этот процесс в виде отдельных итераций, чтобы своевременно выявлять и исправлять возможные проблемы, возникающие при решении задач на отдельных этапах проектирования.

Успешное завершение процесса физического синтеза по-прежнему требует своевременного исправления допущенных ошибок и учета проблем с зашумленностью, изменчивостью и технологичностью. К сожалению, для внесения таких исправлений разработчику иногда приходится вернуться к более ранним этапам процесса.

Постановка задачи. Стандартная цель решения задачи размещения состоит в задании такого расположения элементов схемы на рабочем поле, которое приводит к минимизации общей длины соединений схемы. Это связано с тем, что длина соединений может быть легко смоделирована и служит хорошим приближением первого порядка к реальным целевым функциям, таким как синхронизация, мощность и управляемость проекта. Также существуют различные формы оценки длины соединений. Наиболее популярными моделями оценки являются квадратичная длина соединений, линейная длина соединений или некоторое приближение линейной длины соединений, которые используются во многих алгоритмах размещения. В последнее время для оценки длины соединений активно используется модель задачи Штейнера, которая считается наиболее точной оценкой проложенной длины проводов, также использовалась в качестве целевой функции размещения в некоторых научных исследованиях. Независимо от используемой формы длины соединений, возможность получения минимальной длины соединений размещения имеет решающее значение для проектирования современных изделий микроэлектроники, поскольку длина соединений напрямую влияет на задержки электрических сигналов. Длина соединений также влияет на качество решения задачи трассировки. Трассировка выполняется сразу после размещения, и нет смысла создавать решение для размещения без учета условий для последующей трассировки. Длина соединений также оказывает существенное влияние на применяемые при проектировании технологии, что является еще одним важным аспектом физического синтеза.

Основной задачей размещения является определение местоположения элементов схемы в на кристалле. Следовательно, сначала необходимо определить область размещения, как правило, это прямоугольную область, границы которой задаются координатами угловых точек $(x_{low}, y_{low}, x_{high}, y_{high})$. Однако данное условие не является обязательным, и на самом деле в последнее время наблюдается более широкое разнообразие областей размещения, например использование областей размещения L-образной или T-образной формы. Однако для задачи глобального размещения использование прямоугольной области размещения по-прежнему является нормой. Исходными данными для начала решения задачи размещения является список соединений схемы, который может быть задан в виде графа $G = (X, U)$, где множество X - это элементы проектируемой схемы, а множество U - множество соединений элементов схемы [4]. В свою очередь множество вершин X состоит из двух непересекающихся подмножеств: $X = X_1 \cup X_2$, где X_1 - множество элементов, которым еще не назначены позиции, а X_2 - множество элементов, позиции которых уже определены. Местоположение каждого элемента x_i схемы должно находиться в границах заданной области размещения (рабочего поля).

Задача размещения разногабаритных элементов в пространстве может быть задана следующим образом:

1. Задаются ограничения возможной площади, на которой можно выполнять размещение элементов. Область размещения, как правило, задается в виде прямоугольника. При этом можно говорить о задаче размещения одинаковых элементов на поле с кратными габаритами или о решении сложной задачи размещения элементов с различными установочными площадями.

2. Задаются габариты элементов, которые необходимо разместить на рабочем поле, для чего достаточно определить, например, два размера: длину и ширину каждого типа элементов.

Итак, исходными данными задачи являются: a, b - размеры (длина и ширина) рабочего поля; $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ - множество элементов схемы; U - список связности, отражающий связи элементов.

Необходимо найти такой вариант размещения элементов на рабочем поле, чтобы не происходило взаимного перекрытия элементов и суммарная длина соединений была минимальной

$$E = \{(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)\},$$

где (x_i, y_i) - координаты центра тяжести посадочных мест, предназначенных для размещения элементов.

С точки зрения теории оптимизации задача размещения может быть интерпретирована как задача оптимизации аддитивной целевой функции, включающей нормированное значение штрафа за перекрытие площадей размещаемых элементов и оценку суммарной длины соединений:

$$F = \min_{z_j \in Z} (k \cdot O(L(z_j)) + T(S_{sum}(z_j))),$$

где z_j - текущий вариант размещения; k - весовой коэффициент; S_{sum} - суммарная площадь перекрытия элементов; $O(L(z_j))$ - оценка длины соединений; $T(S_{sum}(z_j))$ - штрафа за перекрытие площадей.

Суммарная длина соединений рассчитывается по формуле:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} c_{ij},$$

где d_{ij} – расстояние между установочными позициями на рабочем поле $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$; c_{ij} – число связей между элементами i и j .

Для нормирования суммарной длины соединений вычисляют отношение $L(z_j)$ к L_{\max} , где

$$L_{\max} = n^2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2};$$

$$O(L(z_j)) = L(z_j) / L_{\max}.$$

Общая площадь перекрытия вычисляется по следующей формуле:

$$S_p = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij},$$

где S_{ij} – площадь перекрытия элементов z_i и z_j .

$$S_{ij} = [0,5(a_2 + a_1) - |x_2 - x_1|] [0,5(b_2 + b_1) - |y_2 - y_1|].$$

Штраф за перекрытие площадей:

$$P(S_{\text{общ}}) = S_{\text{общ}} / nab.$$

Описание алгоритма. С концептуальной точки зрения, создаваемые интеллектуальные системы автоматизированного проектирования можно классифицировать как смешанные искусственные целеориентированные системы, т.е. системы созданные человеком и объединяющие искусственные и естественные подсистемы, основой функционирования которых является факторы целесообразности [5].

Гибридные системы это гетерогенные системы, состоящие из разнородных компонентов, объединенных для достижения поставленных целей [6, 7]. Интеграция и гибридизация методов и технологий различной физической природы позволяет решать задачи, которые невозможно решить на основе традиционных подходов. Гибридные архитектуры, объединяющие несколько парадигм, помогают обойти недостатки, присущие отдельным методам, при этом наблюдается, так называемый, синергетический эффект, когда достоинства одного метода компенсируют недостатки другого [8].

К сожалению, в отличие от природных, «искусственные» системы, как правило, не обладают возможностями развития, самоорганизации, адаптации к изменяющимся внешним условиям. Следовательно, основной задачей разработчиков является необходимость обеспечить наличие таких свойств в проектируемых системах.

Одним из перспективным инструментом конструирования эффективных алгоритмов проектирования и оптимизации является гибридизация популяционного алгоритма с двумя и более популяционными и/или не популяционными алгоритмами [9 - 12]. Структура гибридного алгоритма позволяет сохранить преимущества популяционных алгоритмов, используя их на начальном этапе для эффективного сужения пространства поиска, а затем применить один из «классических» методов оптимизации для нахождения глобального экстремума.

Одной из гибридных моделей является нечеткий генетический алгоритм [13, 14]. Он сочетает поисковые возможности генетических алгоритмов и возможности систем нечеткого вывода для оценки и изменения управляющих параметров. Для этого используется специальный блок – нечеткий логический контроллер (НЛК), который использует имеющиеся нечеткие правила, оценивает ход процесса эволюции и разнообразие текущей популяции решений и, при необходимости, изменяет значения свободных переменных, таких например, как вероятности выполнения генетических операторов.

Схема НЛК (рис. 1) построена основе управления с обратной связью. НЛК преобразует текущую информацию о ходе эволюции и состоянии популяции решений к нечеткому виду, затем на основе заданных нечетких правил оценивает ее, определяет управляющее воздействие и возвращает скорректированные значения контрольных параметров.

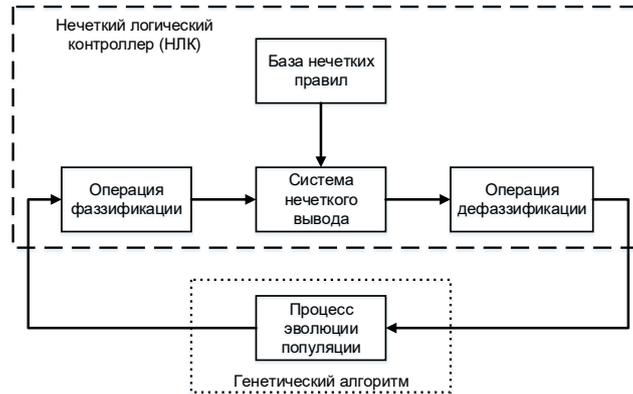


Рис. 1. Структура нечеткого логического контроллера

Основной закон управления можно записать в следующем виде [15–18]:

$$u(t) = f(e(t), e(t-1), \dots, e(t-r), u(t-1), \dots, u(t-r)),$$

где t – дискретное время; e – ошибка между модельным значением величины y^* и реальным значением выходного параметра объекта управления; f – нелинейная функция, которая определяется как отношение между входом и выходом НЛК.

Функционирование НЛК определяется набором лингвистически представляемых правил, основанных на экспертных знаниях, которые записываются в следующей форме: Если IF (множество условий), то THEN (заключение). НЛК оперирует нечеткими множествами. Поэтому входные значения в процессе фаззификации, преобразуются в лингвистические переменные. Они передаются в блок выработки решения, где формируется один или несколько нечетких наборов с соответствующими функциями принадлежности. После этого выполняется операция дефаззификации, т.е. преобразования этих нечетких множеств в управляющее воздействие.

Знания, составляющие основу корректного функционирования модуля нечеткого управления, записываются в виде нечеткого правила:

$$R^k: \text{IF}(x_1 \text{ это } A_1^k \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n \text{ это } A_n^k) \text{ THEN}(y \text{ это } B^k).$$

Можно также представить эти правила в виде нечетких множеств с функцией принадлежности, заданной выражением:

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

Следовательно, если в качестве нечеткой импликации будет использоваться операция умножения, то получим формулу:

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

Декартово произведение нечетких множеств можно представить в виде:

$$\mu_{A^k}(x) = \mu_{A_1^k * \dots * A_n^k}(x) = \mu_{A_1^k}(x) \dots \mu_{A_n^k}(x).$$

В результате преобразований получаем следующее выражение для функции принадлежности нечеткого множества \bar{B}^k :

$$\mu_{\bar{B}^k}(y) = \sup_{x_1, \dots, x_n \in X} \left\{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \mu_{A_i^k}(x_i) \right\}.$$

В качестве операции фаззификации используем операцию типа синглетон, пусть

$$A'(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = \bar{x}, \\ 0, & \text{если } x \neq \bar{x}. \end{cases}$$

Заметим, что супремум в функции принадлежности достигается только в случае, когда $x = \bar{x}$, т.е. для $\mu_{A_i^k}(\bar{x}) = 1$. При этом получаем

$$\mu_{\bar{B}^k}(y) = \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i).$$

Применим метод дефаззификации «center average defuzzification», в соответствии с которым

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \mu_{\bar{B}^k}(\bar{y}^k)}{\sum_{k=1}^N \mu_{\bar{B}^k}(\bar{y}^k)}.$$

В приведенной формуле \bar{y}^k – это центр нечеткого множества B_k , т.е. точка, в которой $\mu_{B^k}(y)$ достигает максимального значения.

Исходя из этого, получим равенство:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}.$$

Завершающий этап в процессе проектирования модуля нечеткого управления – это определение формы представления нечетких множеств A_i^k , $1, \dots, n$; $k = 1, \dots, N$. Например, это может быть функция Гаусса

$$\mu_{A_i^k}(x_i) = \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right),$$

где параметры \bar{x}_i^k и σ_i^k имеют физическую интерпретацию: \bar{x}_i^k – это центр, а σ_i^k – ширина гауссовской кривой [19].

Как будет показано ниже, эти параметры могут модифицироваться в процессе обучения, что позволяет изменять положение и структуру нечетких множеств.

Объединим теперь все представленные элементы, и тогда модуль нечеткого управления приобретает окончательный вид:

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

Каждый элемент этого выражения можно задать в форме функционального блока (сумма, произведение, функция Гаусса), что после соответствующего объединения позволяет создать многослойную сеть (рис. 2).

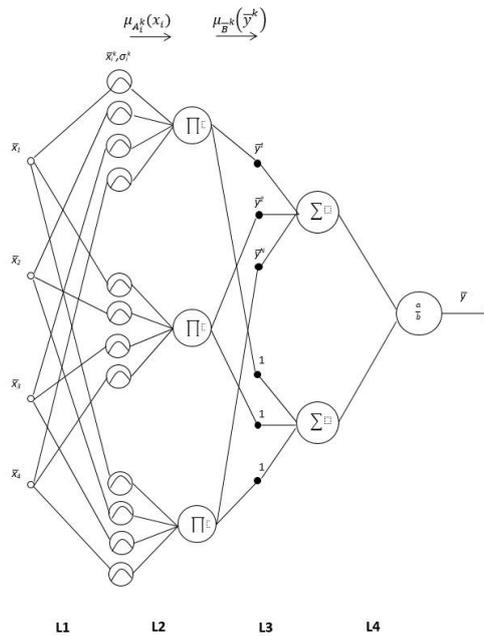


Рис. 2. Структура нейросети

На схеме показан модуль управления с четырьмя входами ($n = 4$). Слои обозначены символами от L1 до L4 и выделены серым фоном. Элементы, обозначенные символом Π (мультипликаторы), перемножают все входные сигналы, элементы, обозначенные символом Σ (сумматоры) – суммируют их, а элемент (a/b) , делит один сигнал на другой. Черные поименованные точки, размещенные на связях, обозначают веса этих связей. Элементы слоя L1 реализуют функцию Гаусса с параметрами \bar{x}_i и σ_{ik} . Выражения и стрелки, размещенные над схемой, определяют направление распространения сигнала и его интерпретацию.

В генетических алгоритмах (ГА) управляющими параметрами, как правило, являются значения вероятности выполнения генетических операторов кроссинговера (P_c) и мутации (P_m), а также размер популяции [12, 20]. Взаимодействие блоков нечеткого генетического алгоритма показано на рис. 3.

Кроме того, очевидно, что эффективная работа генетического алгоритма зависит от верного подбора его параметров, что может быть крайне непростой задачей. Статично заданные ограничения могут привести к пропуску и редукции решений, обладающих высоким потенциалом к дальнейшим преобразованиям, что обязательно скажется на результате работы алгоритма. Чрезмерно высокая или

низкая вероятность применения оператора мутации часто приводит к раннему попаданию алгоритма в состояние локального оптимума. Динамически изменяющиеся ограничения могут помочь избежать этой ситуации, однако создание подобной адаптивной системы – задача очень высокой сложности, так как появляется проблема связанности этих ограничений с предметной областью, и невозможность их применения для широкого класса задач.



Рис. 3. Схема взаимодействия блоков нечеткого генетического алгоритма

Одним из способов реализации гибкой адаптивной системы ограничений является применение механизма нечеткой логики в виде контроллера – модуля, управляющего динамическими переменными в ходе работы системы, и направляющего поток выполнения программной реализации алгоритма.

В данной работе предлагается использование гибридного алгоритма на основе описанных ранее подходов. Общая схема работы предложенного гибридного алгоритма представлена на рис. 4.



Рис. 4. Общая схема гибридного алгоритма

Гибридный алгоритм начинает работу с задания исходных данных, определения критерия оптимизации и ограничений задачи. После этого происходит создание стартовой популяции решений (начальное размещение) и оценка качества начальной популяции (как отдельных индивидов, так и среднего значения по популяции) с точки зрения выбранного критерия оптимизации.

После этого выполняется генетический алгоритм, происходит создание новой популяции решений и возможная корректировка управляющих параметров алгоритма с помощью нечеткого логического контроллера.

Следующий блок представляет собой модифицированный муравьиный алгоритм. Его задача попытаться улучшить полученное размещение.

В конце происходит проверка выполнения критерия останова алгоритма, условия не выполнены, алгоритм переходит к следующей итерации, в противном случае выполнение алгоритма завершается.

Изменение расположения элементов на рабочем поле продолжается до тех пор, происходит улучшение текущего значения целевой функции.

Таким образом, алгоритм состоит из трех основных модулей – генетического, муравьиной колонии и модуля нечеткого логического контроллера (НЛК).

Результаты компьютерных экспериментов. Для хранения данных о топологии печатной платы используется LEF/DEF спецификация. LEF (Library Exchange Format) – это спецификация для представления физической структуры интегральной схемы в формате ASCII. Она включает правила оформления и абстрактную информацию об элементах. LEF используется в сочетании с DEF (Design Exchange Format) спецификацией, которая используется для представления полного размещения элементов интегральной схемы.

Исследования проводились на двух конфигурации оборудования: Intel® Core(TM) i7-3630QM CPU @ 2.40 GHz, ОЗУ – 8ГБ (конфигурация 1) и Intel® Core(TM)2 Quad CPU Q8200 @ 2.40 GHz, ОЗУ – 4 ГБ (конфигурация 2). Во время исследования было проведено по 5 экспериментов с количеством элементов от 100 до 3000 с шагом 100. При постоянном количестве цепей, равном 50, количестве итераций, равном 50, хромосом популяции, равном 20 и 2 эволюционных процессах. При выполнении алгоритма использовался нечёткий логический контроллер.

Результаты экспериментов показаны на рис. 5. В них представлены зависимости среднего времени выполнения алгоритма от количества размещаемых элементов.

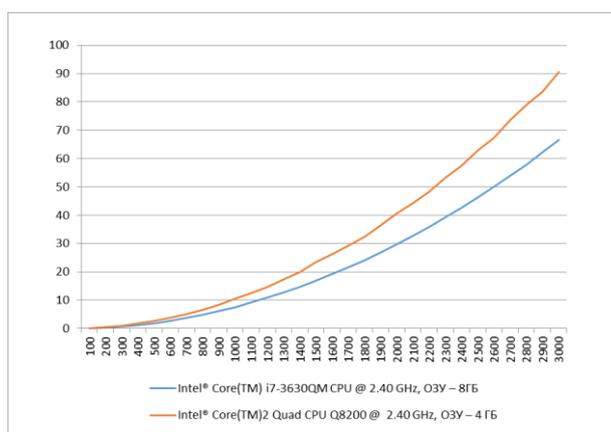


Рис. 5. Зависимость времени выполнения алгоритма от числа элементов

Проводилось сравнение результатов работы предложенного алгоритма с использованием нечеткого логического контроллера и без него. Полученные результаты представлены на рис. 6.

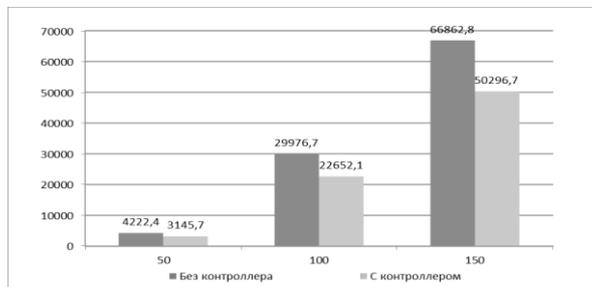


Рис. 6. Сравнение качества решений с контроллером и без его использования

Проанализировав представленные выше данные, можно сделать вывод, что использование НЛК 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.

Заключение. Предложена структура гибридного алгоритма решения задачи размещения разногабаритных элементов, разработаны модифицированные генетические операторы, а также компоненты гибридного алгоритма. Гибридный алгоритм реализован в виде прикладной программы, проведены серии вычислительных экспериментов для определения эффективности разработанного алгоритма и выбора оптимальных значений управляющих параметров.

Необходимо дальнейшее продолжение исследований разработанного алгоритма для выявления имеющихся закономерностей, совершенствования механизма реализации разработанных моделей и подходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, Sachin S. Sapatnekar. Handbook of algorithms for physical design automation. – CRC Press, New York, USA, 2009.
2. Shervani N. Algorithms for VLSI physical design automation. – USA, Kluwer Academy Publisher, 1995. – 538 p.
3. 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.
4. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Дискретная математика. – М.: Физматлит, 2014.
5. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: СИНТЕГ, 2000.
6. Ярушкіна Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004.
7. Батыршин И.З., Недосекин А.О. и др. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / под ред. Н.Г. Ярушкіной. – М.: Физматлит, 2007.
8. Haken H. Synergetics, an Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology. – New York: Springer-Verlag, 1983.
9. Гладков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Сороколетов П.В. Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009.
10. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010.
11. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2016.

12. 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 // Proceedings of the Third International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'18). ITI'18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol 875. Springer, Cham. – P. 246-257.
13. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
14. Herrera F., Lozano M. Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions // Soft Computing. 7(2003). – Springer-Verlag, 2003. – P. 545-562.
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. 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.
17. King R.T.F.A., Radha B., Rughooputh H.C.S. A fuzzy logic controlled genetic algorithm for optimal electrical distribution network reconfiguration // Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Taipei, Taiwan, 2004. – P. 577-582.
18. 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.
19. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
20. 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. Vol. 875. – Springer, Cham, 2020. – P. 246-257.

REFERENCES

1. Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, Sachin S. Sapatnekar. Handbook of algorithms for physical design automation. CRC Press, New York, USA, 2009.
2. Shervani N. Algorithms for VLSI physical design automation. USA, Kluwer Academy Publisher, 1995, 538 p.
3. 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.
4. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Diskretnaya matematika [Discrete Mathematics]. Moscow: Fizmatlit, 2014.
5. Prangishvili I.V. Sistemnyy podkhod i obshchesistmenye zakonomernosti [A systematic approach and system-wide patterns]. Moscow: SINTEG, 2000.
6. Yarushkina N.G. Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems]. Moscow: Finansy i statistika, 2004.
7. Batyrshin I.Z., Nedosekin A.O. i dr. Nечеткие гибридные системы. Teoriya i praktika [Fuzzy hybrid systems. Theory and practice], ed. by N.G. Yarushkinoy. Moscow: Fizmatlit, 2007.
8. Haken H. Synergetics, an Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology. New York: Springer-Verlag, 1983.
9. Gladkov L.A., Kureychik V.M., Kureychik V.V., Sorokoletov P.V. Bioinspirovannyye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009.
10. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. M.: Fizmatlit, 2010.
11. 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.
12. 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, *Proceedings of the Third International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'18). ITI'18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol 875. Springer, Cham, pp. 246-257.*

13. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Nechetkie modeli i seti [Fuzzy models and networks]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007.
14. Herrera F., Lozano M. Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions, *Soft Computing*. 7(2003). Springer-Verlag, 2003, pp. 545-562.
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. 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.
17. King R.T.F.A., Radha B., Rughooputh H.C.S. A fuzzy logic controlled genetic algorithm for optimal electrical distribution network reconfiguration, *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Taipei, Taiwan, 2004*, pp. 577-582.
18. 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.
19. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2006.
20. 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*. Vol. 875. Springer, Cham, 2020, pp. 246-257.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.М. Ковалев.

Гладков Леонид Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371625; кафедра САПР; к.т.н., доцент.

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

Ясир Муханад Джаббар – e-mail: yasir_82@mail.ru; тел.: 88634371625; кафедра САПР; аспирант.

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

Gladkova Nadezhda Viktorovna – e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; phone: +78634393260; the department of CAD; senior teacher.

Yasir Mukhanad Jabbar – e-mail: yasir_82@mail.ru; phone: +78634371625; the department of CAD; postgraduate student.

УДК 004.7

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-243-255

И.В. Родыгина, И.И. Бузенков, Ю.В. Каханец

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ И АРХИТЕКТУРА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕГМЕНТОВ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

На сегодняшний день, в абсолютном измерении, ни одна отрасль государства не обходится без современных высокотехнологичных средств связи, соединяющих вычислительные системы и удалённые базы данных. Использование новых информационных и коммуникационных технологий в качестве средства разрешения противоречий, а также средства неявно воздействия, на мировой арене становится нарастающей угрозой для безопасности сообщества. В представленной работе рассматриваются не только этапы развития, но и основные тенденции, подходы к построению цифровых информационных систем, а также характерные

угрозы информационной безопасности для них. Также в статье показано актуальное место критически важных информационных сегментов в общем контексте системы связи Российской Федерации. В первой части работы раскрывается концепция трёхкомпонентного построения региональных критически важных информационных сегментов. В основной части акцент сделан на различии технологий, применяемых для построения критически важных информационных сегментов. Основная часть статьи нацелена на выявление уязвимостей сложных информационных структур и систем, в которых используются архитектуры мультисервисных систем связи. Проведённый авторами анализ позволяет классифицировать основные угрозы информационной безопасности как для систем связи, построенных по классическим схемам коммутации каналов, так и для систем связи основанных на новых технологических принципах, в основе своей – коммутации пакетов. В целом авторы говорят нам, что идея стандартной и чётко определённой структуры трафика и процедур взаимодействия пользователей независимо от их типа, географической удалённости или области её применения совместно с цифровыми методами передачи и коммутации оказывает революционную роль в развитии систем связи. Особого внимания заслуживает представленная авторами классификация протоколов, которая признакам позволяет выявить наиболее слабые места в современных информационных системах, на которые нужно обратить внимание в первую очередь: протоколы, обеспечивающие функционирование беспроводных сетей, почтовые протоколы, протоколы файлового обмена и другие.

Информационно-коммуникационная сеть; критически важный информационный сегмент; технология; мультисервисная сеть связи; телефония.

I.V. Rodygina, I.I. Buzenkov, Yu.V. Kakhanets

CONSTRUCTION CONCEPT AND ARCHITECTURE CRITICAL INFORMATION SEGMENTS OF THE REGIONAL INFOCOMMUNICATION NETWORK

Today, in absolute terms, not a single branch of the state can do without modern high-tech communications that connect computing systems and remote databases. The use of new information and communication technologies as a means of resolving contradictions, as well as a means of implicit influence, is becoming a growing threat to the security of the community on the world stage. The presented work examines not only the stages of development, but also the main trends, approaches to the construction of digital information systems, as well as the characteristic threats to information security for them. The article also shows the actual place of critical information segments in the general context of the communication system of the Russian Federation. The first part of the work reveals the concept of a three-component construction of regional critical information segments. The main part focuses on the difference in technologies used to build critical information segments. The main part of the article is aimed at identifying the vulnerabilities of complex information structures and systems that use the architecture of multiservice communication systems. The analysis carried out by the authors allows us to classify the main threats to information security both for communication systems built according to classical circuit switching schemes, and for communication systems based on new technological principles, basically - packet switching. In general, the authors tell us that the idea of a standard and clearly defined traffic structure and user interaction procedures, regardless of their type, geographic distance or area of its application, together with digital transmission and switching methods, has a revolutionary role in the development of communication systems. Special attention should be paid to the classification of protocols presented by the authors, which allows to identify the weakest points in modern information systems, which should be paid attention to first of all: protocols that ensure the functioning of wireless networks, mail protocols, file exchange protocols, and others.

Information and communication network; critical information segment; technology; multi-service communication network; telephony.

Введение. Развитие и стремительное объединение информационных технологий и систем связи ярко обострило актуальность вопросов информационной безопасности в них. Западными специалистами в области информационной безопасности в ходе оценки роли информационно-технических воздействий (далее –

ИТВ) на отдельно взятую информационную инфраструктуру был проведён анализ сопоставимости финансовых потерь при применении традиционных средств воздействия и принципиально новых форм (кибератаки). При этом западные эксперты считают кибератаки наиболее экономически выгодными, потому что 1 млн. долларов и двадцать человек, проводя компьютерные атаки, могут обеспечить успех, сопоставимый с действиями многотысячной группировки войск. 10 млн. долларов и пятьдесят человек могут дезорганизовать государственную и критически важную информационную инфраструктуру (КВИИ) противника более чем на неделю. 30 млн. долларов и сто человек способны вывести из строя экономическую информационную инфраструктуру таким образом (рис. 1), что на её восстановление уйдут годы [1, 2].

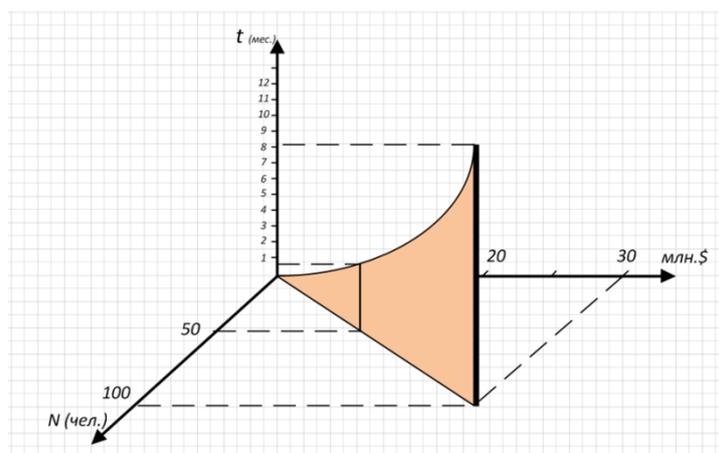


Рис. 1. Вероятность ущерба КВИИ от воздействия сил киберопераций

Использование информационных и коммуникационных технологий (далее – ИКТ) в качестве средства разрешения противоречий, а также средства неявного воздействия на КВИИ государственного и экономического управления становится нарастающей угрозой как внутренней, так и международной безопасности.

Концепция трёхкомпонентного построения интегрированной инфокоммуникационной сети регионов (ИКС-Р). Мировое развитие информационных технологий, эволюция существующей системы связи Российской Федерации, ее техническое и технологическое состояние обусловили необходимость создания ИКС-Р, обеспечивающей автоматизацию управленческих функций, интеграцию специальных и информационных систем с целью обеспечения возможности комплексного использования информации баз данных и услуг связи должностными лицами органов муниципального и регионального управления на всех уровнях [2]. Основным функциональным предназначением ИКС-Р является обеспечение доступа к мульти-сервисным услугам связи конечным пользователям выделенного информационного сегмента региона [3]. Концепция трёхкомпонентного построения ИКС-Р приведена на рис. 2.

Связь Российской Федерации – одна из отраслей экономики РФ, а также обширная сфера деятельности по предоставлению услуг связи, осуществляющая сбор, хранение и передачу информации в рамках законодательства РФ. Сегодня ни одна отрасль государства не обходится без специалистов по информационным технологиям и связи. Техническую основу связи РФ представляют объединённые совокупности сетей, служб и оборудования связи, расположенных и функционирующих на

территории РФ. Эти совокупности, по функционалу и являются составными частями ИКС-Р, а по сути, критически важными информационными сегментами, которые предназначены для удовлетворения потребностей населения, органов государственной власти, административного управления, обороны, безопасности, охраны правопорядка, а также хозяйствующих субъектов региона в мультисервисных услугах связи [3, 4]. Анализ, проведённый доминирующими телекоммуникационными гигантами РФ (Вымпелком, Ростелеком, МТС), показал, что основной услугой, оказываемой ИТКС-Р в России является телефония (в том числе IP-телефония) – это почти 65% от всего объёма трафика.

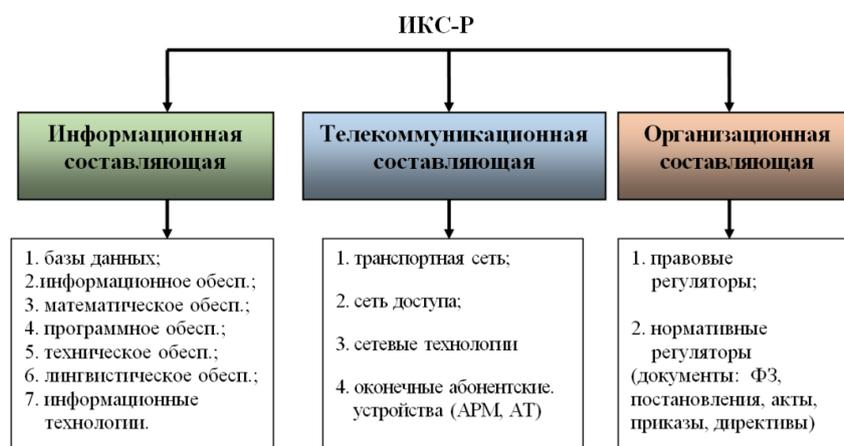


Рис. 2. Концепция построения региональной информационно-коммуникационной сети

Критически важный информационный сегмент (далее – сегмент) телефонной сети ИКС-Р – это комплекс технических сооружений и оборудования, предназначенный для осуществления телефонной связи и состоящий из телефонных узлов связи, телефонных станций, линий связи и абонентских терминалов [4]. Ключевыми узлами сегментов ИКС-Р являются автоматизированные телефонные станции (АТС) – технологический комплекс, предназначенный для коммутации каналов связи телефонной сети. На сегодняшний день АТС являются современными специализированными компьютерами с таблицами маршрутизации и серверным оборудованием, способные обслуживать до нескольких тысяч абонентов одновременно. Помимо высокого качества передачи речевого трафика, АТС предоставляют пользователям ряд специализированных абонентских услуг: от записи и переадресации вызова, до высокоскоростного доступа к ресурсам ГИС Internet.

Линии связи, которые соединяют телефонные сегменты могут быть кабельными, воздушными, радиорелейными, лазерными (оптоволоконными), спутниковыми, то есть, в сегментах используются все возможные физические линии связи первичной сети (рис. 3). В последние годы всё больше используются смешанные каналы (с преобладанием оптоволоконного) функционирующие по принципам коммутации пакетов и облачных вычислений. Объединение линий связи первичной сети представляет собой транспортные сети. Транспортная сеть (связи) – сеть связи, обеспечивающая перенос (транспортирование) и распределение разнородного трафика между сетями доступа, в которые включены вызывающий и вызываемый пользователи [5]. На данный момент времени общепринятая классификация транспортных сетей представлена следующим образом:



Рис. 3. Роль сегментов телефонной связи в рамках системы связи РФ

1) Сеть (связи) транспортная магистральная – часть транспортной сети, обеспечивающая перенос разнородного трафика с заданным качеством между региональными сетями.

2) Сеть (связи) транспортная региональная – часть транспортной сети, обеспечивающая подключение сетей доступа для предоставления установленного набора услуг заданного качества пользователям.

3) Сеть (связи) местная – часть региональной сети, имеющая выход на сетевой узел региона, или автономная сеть, обеспечивающая предоставление услуг заданного качества компактно размещенным пользователям.

В настоящее время протокол IP (Internet Protocol – правило межсетевое взаимодействия) де-факто стал базовым протоколом транспортных сетей, а IP- (мультисервисные) сети используются в качестве транспортных. При этом протокол сетевого уровня IP, как и было задумано его разработчиками, используется в транспортных сетях для объединения разнородных сетей, построенных с использованием технологий, функционирующих на нижележащих уровнях модели OSI [6, 7]. Протокол IP – это основной протокол передачи пакетов в составных сетях, состоящих из большого количества разнородных (по технологиям) локальных сетей. Как средство объединения разнотипных сетей. Протокол IP организует пакетную передачу информации от узла к узлу IP-сети, не используя процедур установления соединения между источником и приемником информации. Он является дейтаграммным протоколом: при передаче информации по протоколу IP каждый пакет передается от узла к узлу и обрабатывается в узлах независимо от других пакетов. Для региональных телефонных сегментов ИКС-Р наравне с технологиями стеков TCP/IP широко используются все технологии первичных транспортных сетей связи [8]:

- ◆ технологии первичных сетей – синхронной цифровой иерархии (SDH), SDH следующего поколения (NG-SDH), технологии спектрального мультиплексирования, плездохронной (PDH) цифровой иерархии;
- ◆ технологии волоконно-оптических систем передачи и спектрального мультиплексирования (xWDM);
- ◆ технологии оптических транспортных сетей (OTN);

♦ пакетных технологий – асинхронного режима переноса (ATM), FrameRelay, гигабит-Ethernet (GE, 10/40/100 GE), многопротокольной коммутации по меткам (технология MPLS) и другие.

Предоставление конечному пользователю услуг высококачественной и высокоскоростной мультисервисной связи обеспечивается доступ ко внешним сетям по правилам QoS:

1. Сети цифровой связи с интеграцией услуг (ISDN);
2. Сети IP-телефонии;
3. Пакетная передача данных и доступ к ресурсам ГИС Internet.

ISDN сети. ISDN (Integrated Services Digital Network) – это цифровая сеть с интеграцией услуг (рис. 4).

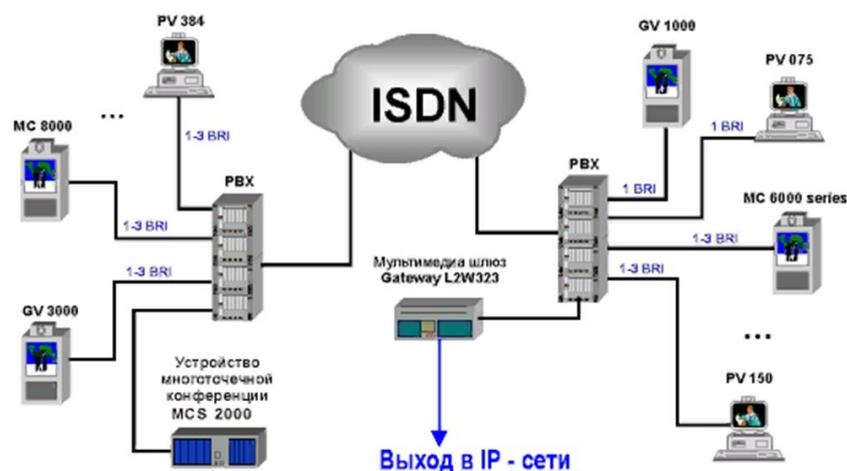


Рис. 4. Использование технологии ISDN в сегментах ИКС-Р

Услуги ISDN предоставляемые сетью интересны в основном корпоративным клиентам, следовательно, и использовать их будут организации, предприятия и специальные ведомства устанавливая необходимые платы на свои АТС СВА. По отношению к другим телекоммуникационным технологиям в телефонии ISDN считается относительно защищенной технологией. Но, тем не менее, при классическом подходе к защите информации проверки на отсутствие НДВ на оборудовании (платах и серверах ISDN) в стандартном списке сертификации, как правило, не проводятся [10].

Сервис IP-телефонии. Доступ абонентов сегмента ИКС-Р к услугам IP-телефонии производится за счет соответствующего оборудования, установленного в слотах станции в виде стандартных плат. Центральным компонентом IP-телефонии является сервер (шлюз), который отвечает за соединение телефонной и IP-сетей, т.е. он подключен к телефонной сети и может дозвониться до любого абонентского терминала (телефона) и получить доступ к сети передачи данных (например, ГИС Internet), то есть может получить доступ к любому компьютеру или IP-телефону (рис. 5). Обязательным элементом сети IP-телефонии является абонентский терминал (АТ), который может быть реализован как программным (например, Cisco IP SoftPhone), так и аппаратным способом (например, Cisco EP Phone, который подключается напрямую к Ethernet-порту коммутатора). Причем в первом случае звонки можно осуществлять даже через домашний компьютер, оснащенный звуковой картой и микрофоном, а во втором случае, в качестве абон-

нентского пункта выступает АТ IP-телефон. Еще одним компонентом архитектуры IP-телефонии можно назвать специализированные пользовательские приложения, которые появились благодаря развитию компьютерных технологий интеграции голоса, видео и данных в единые потоки данных (Call-центры, системы унифицированной обработки сообщений) [11, 12]. В свою очередь, свободный доступ технологий IP-телефонии к трафику и ресурсам АТ создаёт своеобразный спектр проблем, связанных с обеспечением информационной безопасности абонента. Во всех современных сегментах ИКС-Р реализована система разграничения доступа абонентов к услугам связи или сервисам, предоставляемым сетью. В некоторых ЦАТС программное разделение может насчитывать до 1000 различных категорий абонентов. Выполняется это, системным администратором. Но на практике, для скорости обслуживания, более 100 категорий не разделяют в сети [13–15].

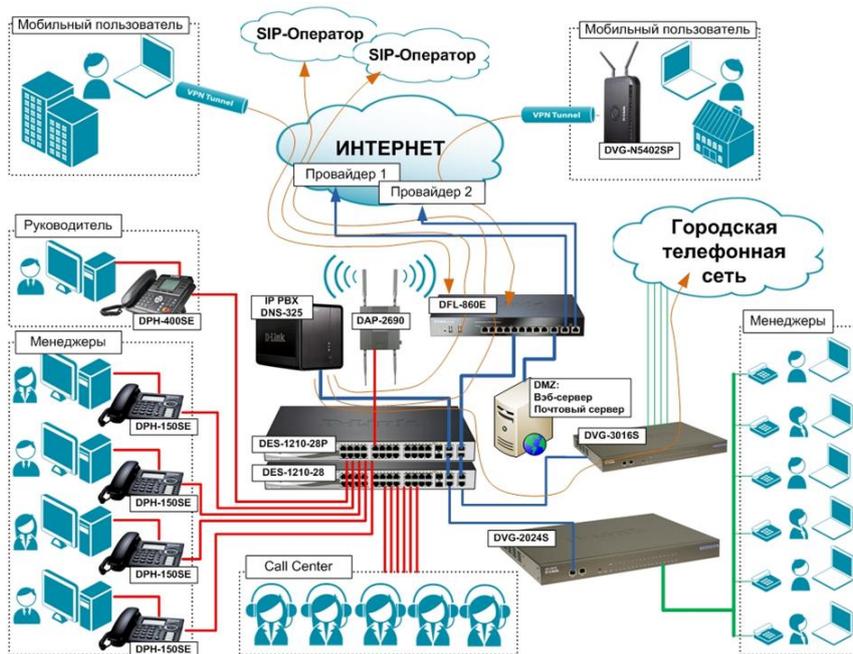


Рис. 5. Организация IP-телефонии в сегментах ИКС-Р

Так же существуют возможности организации абонентских групп и создания для них доступа к определенному списку функционала аппаратно-программных средств АТС (ФАПС). В современных системах эта организация реализована на программном уровне. Ограничивают данное разделение, в основном, физические параметры АТ групп абонентов. Так же реализация некоторых сервисов требует установления дополнительного оборудования на АТС сегмента [16]. Присвоение абоненту (выделенной группе абонентов) категорий определяется специальными матрицами, которые и определяют ФАПС для той или иной группы (абоненту). ФАПС характеризует перечень мультисервисных услуг связи. Этот перечень зависит от типа и возможностей оборудования, а также от настроек, осуществлённых администратором ЦАТС.

Классификация протоколов, используемых в ИКС-Р для осуществления информационных процессов. Кроме стека TCP/IP существует плеяда протоколов, которые так или иначе влияют на информационную безопасность КВИИ. Протоколы обмена информацией становятся основным цементирующим материалом для по-

строения распределённых систем обмена и обработки цифровой информации [17–19]. Такие протоколы особенно важны при рассмотрении общей архитектуры сети, то есть всей совокупности связей технических и программно-аппаратных элементов. Исходя из известного функционала уровней модели OSI возможно составить определённую классификацию протоколов и их функциональное определение. Именно идея стандартной и чётко определённой структуры обмениваемой информации и процедур взаимодействия пользователей независимо от их типа, географической удалённости или области применения совместно с цифровыми методами передачи и коммутации оказывает революционную роль в развитии ИКС-Р.

В табл. 1 приведена классификация наиболее распространённых на сегодняшний день протоколов с учётом их влияния на информационную безопасность. Данное разбиение протоколов по различным признакам позволяет выявить наиболее характерные «болезненные точки» и очаги уязвимостей [20], на которые нужно обратить внимание в первую очередь: протоколы, обеспечивающие функционирование беспроводных сетей, почтовые протоколы, протоколы файлового обмена и другие.

Заключение. Таким образом, проведённый анализ и представленная классификационная схема протоколов информационного обмена позволяет сформулировать перечень основных угроз для информационной безопасности сегмента ИКС-Р:

1) Возможность удалённого доступа практически к любому ресурсу и АТ сети (проблематика правил межсетевого взаимодействия и управления протоколами сети);

2) Потенциальная угроза доступа через backdoor's в аппаратной компоненте КВИИ (проблематика унификации технологического оборудования сети) [21];

3) Угроза, связанная с человеческим фактором (проблематика возможности несанкционированного доступа и эффект внутреннего нарушителя – «недобросовестный администратор»).

В дальнейшем, при планировании стратегии защиты информационных ресурсов сегмента ИКС-Р мы можем учитывать каждую из перечисленных моделей угроз и наиболее эффективно осуществлять организационные (работа с персоналом) и технические мероприятия по осуществлению информационной безопасности сети.

Таблица 1

Классификация протоколов, используемых в ИКС-Р для осуществления информационных процессов

№ п/п	Градация по классификационному признаку	Технология/тип протокола	Уровень реализации модели OSI	Функционал	Обеспечение безопасности
1) По принадлежности к сетям ИКС-Р (среде передачи)					
1.1	Глобальных сетей	MPLS; TDM; FDM; TDMA; CDMA; WDMA; Ethernet; FDDI; PPP; Token Ring; Технологии и протоколы беспроводного доступа (п.6);	Все уровни ЭМВОС	Обеспечение доступа к ресурсам ИТКС; Информационный обмен	На уровнях ЭМВОС: Прикладной-сетевой
1.2	Региональных сетей	MPLS; TDM; FDM; TDMA; CDMA; WDMA; Ethernet; FDDI; PPP; Token Ring; Технологии и протоколы беспроводного доступа (п.6);	Все уровни ЭМВОС	Обеспечение доступа к ресурсам ИТКС; Информационный обмен	На уровнях ЭМВОС: Прикладной-сетевой
1.3	Локальных сетей	MPLS; TDM; FDM; TDMA; CDMA; WDMA; Ethernet; FDDI; PPP; Token Ring; Технологии и протоколы беспроводного доступа (п.6);	Все уровни ЭМВОС	Обеспечение доступа к ресурсам ИТКС; Информационный обмен	На уровнях ЭМВОС: Прикладной-сетевой
1.4	Наложённых сетей	MPLS; TDM; FDM; TDMA; CDMA; WDMA; Ethernet; FDDI; PPP; Token Ring; Технологии и протоколы беспроводного доступа (п.6);	Все уровни ЭМВОС	Обеспечение доступа к ресурсам ИТКС; Информационный обмен	На уровнях ЭМВОС: Прикладной-сетевой

Раздел V. Автоматизация проектирования и сетевые технологии

№ п/п	Градации по классификационному признаку	Технология/тип протокола	Уровень реализации модели OSI	Функционал	Обеспечение безопасности
1.5	Прикладных сетей	MPLS; TDM; FDM; TDMA; CDMA; WDMA; Ethernet; FDDI; PPP; Token Ring; Технологии и протоколы беспроводного доступа (п.6);	Все уровни ЭМВОС	Обеспечение доступа к ресурсам ИТКС; Прикладной информационный обмен ИТКС (АСУ, СЭД)	На уровнях ЭМВОС: Прикладной-сетевой
1.6	Беспроводных сетей	3G, 4G, NFC, IrDA, Bluetooth, 802.15.4 (16,17)	Физический	Обеспечение доступа к ресурсам ИТКС (передача данных, VoIP, туннелирование, многопротокольная маршрутизация, мультиплексирование, адресация)	Не обеспечивается
		802.11	Канальный		Не обеспечивается
1.7	Доступа к среде передачи	USB; HDMI; X.25; FR; IEEE-1394; Технологии и протоколы беспроводного доступа (п.6); TCP; UDP; RUDP; TALI; ITOT; RDP; RPC; DNS; MPLS; TDM; FDM; TDMA; CDMA; WDMA; Ethernet; FDDI; PPP; Token Ring; GRE; L2F; L2TP; ATMP; PPTP; RAS; H.245; H.225	Сеансовый; Транспортный; Сетевой; Канальный; Физический	Обеспечение доступа к ресурсам ИТКС (передача данных, VoIP, туннелирование, многопротокольная маршрутизация, мультиплексирование, адресация, файловый обмен, управление)	На уровнях ЭМВОС: сеансовый - сетевой
2) По уровням ЭМВОС					
2.1	Прикладного уровня	DCAP; SNTP; DHCP; Finger; FTP; HTTP; S-HTTP; IMAP; POP3; IMAP4; IRCP; LDAP; MIME; BOOTP; IPDC; ISAKMP; NTP; SNMP; Radius; RLOGIN; RTCP; SMTP; TELNET; TACACS+; X-Window	Прикладной	Почтовые, управления, файлового обмена, безопасности	S-HTTP; S-MIME; TACACS+; Radius; ISAKMP; IPSec
2.2	Представительского уровня	LPP, SSL, TLS	Представления	Обеспечение безопасности	SSL, TLS
2.3	Сеансового уровня	DNS, NetBIOS/IP, PAP, RTCP, RPC, L2TP, L2F, SOCKS, PPTP	Сеансовый	Управления, VoIP, обеспечение безопасности, туннелирование	SOCKS, PPTP, PAP, L2TP, L2F
2.4	Транспортного уровня	TCP, UDP, RUDP, TALI, ITOT, RDP	Транспортный	Управление, файловый обмен, адресация	Не обеспечивается
2.5	Сетевого уровня	BGP, EGP, IPv4(6), ICMP, ARP, IRDP, RARP, NHRP, OSPF, RIP, VRRP, IGMP, MARS, IPSec	Сетевой	Маршрутизация, безопасность, управление, файловый обмен, адресация	IPSec
2.6	Канального уровня	ARP, PPP, FDDI, Ethernet, VLAN, PPTP, Token Ring	Канальный	Многопротокольная маршрутизация, безопасность, мультиплексирование, VoIP, туннелирование, адресация	PPTP
2.7	Физического уровня	USB; HDMI; X.25; FR; IEEE-1394; Технологии и протоколы беспроводного доступа (п.6)	Физический	Обеспечение доступа к высшим уровням ЭМВОС, физическая среда распространения инф.	Физическая защита доступа к ресурсам ИТКС

№ п/п	Градация по классификационному признаку	Технология/тип протокола	Уровень реализации модели OSI	Функционал	Обеспечение безопасности
3) По назначению					
3.1	Управления	SNMP, NTP, DHCP, Whois, RLOGIN, TELNET, ICMP, BOOTP, WCCP, TCP, SMTP	Прикладной, сетевой, канальный, представления	Управление протокольного сопровождения процесса обмена данными	Не обеспечивается
3.2	Обеспечения безопасности	SSH, S-HTTP, S-MIME, ESP, Oakley, AH, ISAKMP/IKE, SSL, TLS, IPSec, PPTP, L2TP, L2F, MPPE, MSCHAP, WEP, Kerberos, PAP, TACACS, CHAP, Radius	Прикладной, сетевой, канальный, транспортный	Обеспечение безопасности процесса обмена данными	Обеспечивается
3.3	Почтовые	IMAP, POP3, IMAP4, SMTP, MIME	Прикладной	Обеспечение процесса обмена сообщениями почтовых служб	Не обеспечивается
3.4	Файлового обмена	FTP, TFTP, LDAP, TCP, TELNET, IP, UDP, RUDP	Прикладной, сетевой, канальный, транспортный	Обеспечение процесса файлового обмена	Не обеспечивается
3.5	Маршрутизации	BGMP, IGMP, MARS, MDGP, MSDP, MZAP, PGM, OSPF, RIP, VRRP, IGRP, EGP	Сетевой	Обеспечение процесса маршрутизации по правилам стека протоколов TCP/IP	Не обеспечивается
3.6	Многопротокольной маршрутизации	MPLS-IGP, MPLS-TE, GMPLS	Канальный	Обеспечение процесса маршрутизации по правилам стека протоколов TCP/IP	Не обеспечивается
3.7	Мультиплексирования	MPLS, TDM, FDM, CDMA, WDMA, Ethernet, FDDI, PPP, Token Ring	Канальный	Обеспечение процесса мультиплексирования инкапсулированных данных	Не обеспечивается
3.8	Передачи данных	PDH, SDH, ATM, X.25, IEEE-1394, FR, USB, RS, GRID, P2P, WDMA	Канальный; Физический	Обеспечение процесса передачи данных	Не обеспечивается
3.9	Беспроводных сетей	3G, 4G, NFC, IrDA, Bluetooth, 802.15.4 (16,17)	Физический, канальный	Обеспечение процесса функционирования беспроводных сетей	Не обеспечивается
3.10	Туннелирования	GRE, L2F, L2TP, ATMP, PPTP	Сеансовый, канальный	Обеспечение процесса туннелирования	Не обеспечивается
3.11	VoIP	RAS, H.225, H.245	Сеансовый, канальный	Обеспечение процесса оцифровки речевой информации (голос-по-IP)	Не обеспечивается
3.12	Реального времени	CAN, NTP	Прикладной	Обеспечение временных синхронизмов	Не обеспечивается

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саенко И.Б., Лаута О.С., Карнов М.А. Модель угроз ресурсам ИТКС как ключевому активу критически важного объекта инфраструктуры // Электросвязь. – 2021. – № 1. – С. 41.
2. Дементьев В.Е. Угрозы инфотелекоммуникационной сети в условиях информационного противоборства. – СПб., 2015. – 16 с.
3. Федеральный закон "О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации" от 26.07.2017 N 187-ФЗ.
4. Федеральный закон "Об информации, информационных технологиях и о защите информации" от 27.07.2006 N 149-ФЗ. Москва, 2006. Москва, 2017.
5. Редькин Ю.В., Бузенков И.И., Чернышева Е.М. Анализ конфигураций беспроводных сетей систем сбора данных и управления // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2020. – № 8. – С. 357.
6. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. – М.: Советское радио, 1974. – 303 с.

7. Рахманов А.А. Сетецентрические системы управления: закономерные тенденции, проблемные вопросы и пути их решения // Военная мысль. – 2010. – № 10. – С. 41-50.
8. Бузенков И.И., Редькин Ю.В., Чернышев В.М. Применение аппаратно-программного комплекса в системах сбора и обработки телеметрической информации // Компьютерные технологии в инженерной и исследовательской деятельности: Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Таганрогский государственный радиотехнический университет. – 2000. – С. 301-306.
9. Полковникова Н.А., Бузенков И.И. Разработка гибридных экспертных систем и интеллектуальных систем поддержки принятия решений. – Новороссийск, 2018.
10. Редькин Ю.В., Бузенков И.И., Чернышева Е.М. Организация морской сети передачи данных с применением mesh-технологии // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: Сб. статей X Международной научно-практической конференции / под ред. А.П. Ремонтова. – Пенза, 2020. – С. 100-105.
11. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения.
12. Радько Н.М., Скобелев И.О. Риск-модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа. – М.: РадиоСофт, 2011. – 229 с.
13. Коцыняк М.А., Карпов М.А., Лаута О.С., Деметьев В.Е. Управление системой обеспечения безопасности информационно-телекоммуникационной сетью на основе алгоритмов функционирования искусственной нейронной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 3-10.
14. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
15. Савин Л.В. Сетецентричная и сетевая война. Введение в концепцию. – М.: Евразийское движение, 2011. – 130 с.
16. Седакин Н.М. Элементы теории случайных импульсных потоков. – М.: Советское радио, 1965. – 264 с.
17. Лаута О.С., Нечепуренко А.П., Муртазин И.Р., Суетин А.И. Модели интеллектуальных воздействий // Сб. «Информационная безопасность регионов России». – 2017. – С. 144-145.
18. Гудков М.А., Газарин Ю.А., Крибель А.М., Соловьёв Д.В. Применение методов захвата и анализа пакетов, передаваемых по информационно-телекоммуникационным сетям, для аудита сетевой безопасности сетей // Современные информационные технологии. Теория и практика: Матер. IV Всероссийской научно-практической конференции. Отв. ред. Т.О. Петрова. – 2018. – С. 158-162.
19. Бесков А.В., Лаута О.С., Мамай А.В. Архитектура сети подвижной радиосвязи на основе эталонной модели взаимодействия открытых систем // Радиолокация, навигация, связь: Сб. трудов XXV Международной научно-технической конференции в 6-ти т. Воронежский государственный университет, АО "Концерн "Созвездие". – 2019. – С. 173-182.
20. Муртазин И.Р., Коцыняк М.А., Лаута О.С. Функциональная модель комплекса информационного воздействия на беспроводные сети передачи данных // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. – 2019. – С. 188-189.
21. Коцыняк М.А., Карпов М.А. Методика синтеза системы защиты информационно-телекоммуникационной сети // Радиолокация, навигация, связь: Сб. трудов XXVI Международной научно-технической конференции: в 6 т. Воронеж, 2020. – С. 231-236.
22. Иванов Д.А., Карпов М.А., Коцыняк М.А., Шимаров Е.В. Модель воздействия сетевых атак на беспроводные сети передачи данных специального назначения // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: Сб. научных статей. Санкт-Петербург, 2020. – С. 166-171.

REFERENCES

1. Saenko I.B., Lauta O.S., Karpov M.A. Model' ugroz resursam ITKS kak klyuchevomu aktivu kriticheski vazhnogo ob"ekta infrastruktury [Model of threats to ITCS resources as a key asset of a critically important infrastructure object], *Elektrosvyaz'* [Telecommunication], 2021, No. 1, pp. 41.
2. Dement'ev V.E. Ugrozy infotelekomunikatsionnoy seti v usloviyakh informatsionnogo protivoborstva [Threats to the infotelecommunication network in the context of information warfare]. Saint Petersburg, 2015, 16 p.

3. Federal'nyy zakon "O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii" ot 26.07.2017 N 187-FZ [Federal Law "On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation" dated 26.07.2017 N 187-FZ].
4. Federal'nyy zakon "Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii" ot 27.07.2006 N 149-FZ. Moskva, 2006. Moskva, 2017 [Federal Law "On Information, Information Technologies and Information Protection" dated 27.07.2006 N 149-FZ. Moscow, 2006. Moscow, 2017].
5. Red'kin Yu.V., Buzenkov I.I., Chernysheva E.M. Analiz konfiguratsiy besprovodnykh setey sistem sbora dannykh i upravleniya [Analysis of configurations of wireless networks of data collection and management systems], *Informatsionnye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii* [Information technologies. Radio electronics. Telecommunications], 2020, No. 8, pp. 357.
6. Berzin E.A. Optimal'noe raspredelenie resursov i elementy sinteza system [Optimal resource allocation and elements of system synthesis]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 303 p.
7. Rakhmanov A.A. Setetsentricheskie sistemy upravleniya: zakonomernye tendentsii, problemnye voprosy i puti ikh resheniya [Network-centric management systems: natural trends, problematic issues and ways to solve them], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2010, No. 10, pp. 41-50.
8. Buzenkov I.I., Red'kin Yu.V., Chernyshev V.M. Primenenie apparatno-programmnogo kompleksa v sistemakh sbora i obrabotki telemetricheskoy informatsii [Application of hardware and software complex in systems for collecting and processing telemetric information], *Komp'yuternye tekhnologii v inzhenernoy i issledovatel'skoy deyatel'nosti: Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Taganrogskiy gosudarstvennyy radiotekhnicheskii universitet* [Computer technologies in engineering and research activities: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Taganrog State Radio Engineering University], 2000, pp. 301-306.
9. Polkovnikova N.A., Buzenkov I.I. Razrabotka gibridnykh ekspertnykh sistem i intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Development of hybrid expert systems and intelligent decision support systems]. Novorossiysk, 2018.
10. Red'kin Yu.V., Buzenkov I.I., Chernysheva E.M. Organizatsiya morskoy seti peredachi dannykh s primeneniem mesh-tekhnologii [Organization of a marine data transmission network using mesh technology], *Informatsionnye resursy i sistemy v ekonomike, nauke i obrazovanii: Sb. statey X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Information resources and systems in economics, science and education: Collection of articles of the X International Scientific and Practical Conference], ed. by A.P. Remontova. Penza, 2020, pp. 100-105.
11. GOST R 50922-2006. Zashchita informatsii. Osnovnye terminy i opredeleniya [GOST R 50922-2006. Information protection. Basic terms and definitions].
12. Rad'ko N.M., Skobelev I.O. Risk-modeli informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem pri realizatsii ugroz udalennogo i neposredstvennogo dostupa [Risk models of information and telecommunication systems in the implementation of threats of remote and direct access]. Moscow: RadioSoft, 2011, 229 p.
13. Kotsynyak M.A., Karpov M.A., Lauta O.S., Dement'ev V.E. Upravlenie sistemoy obespecheniya bezopasnosti informatsionno-telekommunikatsionnoy set'yu na osnove algoritmov funktsionirovaniya iskusstvennoy neyronnoy seti [Management of the information and telecommunication network security system based on artificial neural network functioning algorithms], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2020, No. 4, pp. 3-10.
14. Saati T. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Decision-making. Method of hierarchy analysis]. M.: Radio i svyaz', 1993, 278 p.
15. Savin L.V. Setetsentrichnaya i setevaya voyna. Vvedenie v kontseptsiyu [Network-centric and network warfare. Introduction to the concept]. Moscow: Evraziyskoe dvizhenie, 2011, 130 p.
16. Sed'yakin N.M. Elementy teorii sluchaynykh impul'snykh potokov [Elements of the theory of random pulse flows]. Moscow: Sovetskoe radio, 1965, 264 p.
17. Lauta O.S., Nechepurenko A.P., Murtazin I.R., Suetin A.I. Modeli intellektual'nykh vozdeystviy [Models of intellectual impacts], *Sb. «Informatsionnaya bezopasnost' regionov Rossii»* [Collection "Information security of Russian regions"], 2017, pp. 144-145.

18. *Gudkov M.A., Gagarin Yu.A., Kribel' A.M., Solov'ev D.V.* Primenenie metodov zakhvata i analiza paketov, peredavaemykh po informatsionno-telekommunikatsionnym setyam, dlya audita setevoy bezopasnosti setey [Application of methods for capturing and analyzing packets transmitted over information and telecommunication networks for auditing network security of networks], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii. Teoriya i praktika: Mater. IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern information technologies. Theory and practice: Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference]. ed. by T.O. Petrova, 2018, pp. 158-162.
19. *Beskov A.V., Lauts O.S., Mamay A.V.* Arkhitektura seti podvizhnoy radiosvyazi na osnove etalonnoy modeli vzaimodeystviya otkrytykh sistem [Architecture of a mobile radio communication network based on a reference model of interaction of open systems], *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': Sb. trudov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v 6-ti t. Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, AO "Kontsern "Sozvezdie"* [Radar, navigation, communication: Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference in 6 volumes. Voronezh State University, JSC Concern Constellation], 2019, pp. 173-182.
20. *Murtazin I.R., Kotsynyak M.A., Lauts O.S.* Funktsional'naya model' kompleksa informatsionnogo vozdeystviya na besprovodnye seti peredachi dannykh [Functional model of the complex of information impact on wireless data transmission networks], *Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti: Tr. XXII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN* [Actual problems of protection and security: Proceedings of the XXII All-Russian Scientific and Practical Conference RARAN], 2019, pp. 188-189.
21. *Kotsynyak M.A., Karpov M.A.* Metodika sinteza sistemy zashchity informatsionno-telekommunikatsionnoy seti [Methodology of synthesis of the information and telecommunication network protection system], *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': Sb. trudov XXVI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 6 t. Voronezh, 2020* [Proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference: in 6 vols. Voronezh, 2020], pp. 231-236.
22. *Ivanov D.A., Karpov M.A., Kotsynyak M.A., Shimarov E.V.* Model' vozdeystviya setevykh atak na besprovodnye seti peredachi dannykh spetsial'nogo naznacheniya [A model of the impact of network attacks on special-purpose wireless data transmission networks], *Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii (APINO 2020). IX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferentsiya: Sb. nauchnykh statey [fotelekkommunikatsionnyye nauka i obrazovanie (APINO 2020). IX International Scientific-technical and scientific-methodical Conference: Collection of scientific articles]. Saint Petersburg, 2020, pp. 166-171.*

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.А. Полупанов.

Родыгина Ирина Владимировна – Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова; e-mail: habarova@mail.ru; г. Новороссийск, Россия; тел.: +79282284417; кафедра радиоэлектроники и информационных технологий; к.т.н.; доцент.

Бузенков Игорь Иванович – e-mail: igor.buzenkov@mail.ru; тел.: +79181567788; кафедра радиоэлектроники и информационных технологий; начальник кафедры; к.т.н.

Каханец Юлия Владимировна – e-mail: 266gr@mail.ru; тел.: +79184627956; магистрант.

Rodygina Irina Vladimirovna – Admiral Ushakov Maritime State University; e-mail: habarova@gmail.ru, Novorossiysk, Russia; phone: +79282284417; the department of radioelectronics and information technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Buzenkov Igor Ivanovich – e-mail: igor.buzenkov@mail.ru; phone: +79181567788; the department of radioelectronics and information technologies; head of the department; cand. of eng. sc.

Kakhanets Yulia Vladimirovna – e-mail: 266gr@mail.ru; phone: +79184627956; master's student.

И.В. Родыгина, А.В. Наливайко

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СЕРВЕРНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДАЖАМИ

Данная статья посвящена важной теме при разработке веб-приложений: выбор технологии для написания серверной части приложения. Вопрос выбора правильного языка и фреймворка для реализации серверной части приложения всегда актуален, поскольку от этого зависит его качество работы: сможет ли сервер обработать большое количество запросов, насколько быстро будет произведена обработка данных и выдача их пользователю - что особенно важно для системы управления продажами, поскольку она предполагает работу с большим количеством данных. Большинство современных веб-приложений написаны с использованием таких языков как PHP, NodeJS, поскольку они обеспечивают разработчику высокую скорость написания кода. Метод разработки с помощью PHP позволяет писать блокирующий и не блокирующий код, который, в любой реализации, при большом количестве запросов будет значительно нагружать систему. NodeJS позволяет реализовывать асинхронный не блокирующий код, но отсутствие типизации может значительно снизить качество работы над проектом при его масштабировании. В таком случае следует рассмотреть Java - его фреймворки и библиотеки, которые позволят выполнить задачу. В статье описан принцип взаимодействия клиентской и серверной части веб-приложения. По выделенным критериям проведено сравнение таких технологий как Java, PHP, платформы NodeJS, а также рассмотрен принцип работы бессерверной архитектуры с помощью сервиса Google Firebase. Рассмотрены фреймворки и библиотеки для создания серверной части приложения. Также важным этапом при сравнении будет проведение тестов производительности, которые покажут, какую нагрузку могут выдержать фреймворки, какое количество запросов могут обработать, задержка между ними. В результате исследования, на основе проведенного исследования, будет выбрана оптимальная технология, которая будет использоваться для разработки серверной части системы для управления продажами.

Backend; java vert.x; php; node.js; веб-приложение; SAAS.

I.V. Rodygina, A.V. Nalivayko

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR DEVELOPING THE SERVER SIDE OF THE SALES MANAGEMENT SYSTEM

This article focuses on a topic when developing web applications: the choice of technology for writing the server side of the application. The question of the correct language and framework for the implementation of the server side of the application is always relevant, since its quality of work depends on this: whether the server will process a large number of requests, how quickly the data will be processed and issued to the user - which is especially important for a sales management system, since it assumes work with a large amount of data. Most modern web applications are written using PHP, NodeJS. The method of development with PHP allows us to write blocking and non-blocking code, which in any implementation, with a large number of requests, will significantly load the system. NodeJS allows to implement asynchronous non-blocking code, but the lack of typing can reduce the work on the project when it scales with quality. Java and its frameworks and libraries will allow completing this task. The article describes the principle of interaction between the client and server parts of a web application. Based on the selected criteria, a compared were the technologies such as Java, PHP, NodeJS, and also the principle of operation of a serverless architecture using the Google Firebase service was considered, frameworks and libraries for creating the server side of an application were considered. Also, an important stage in the comparison will be the execution of tests that will show what loads the frameworks can withstand, how many requests can be processed, the delay between them. The optimal technology will be selected, which will be used to develop the server side for sales management.

Backend; java vert.x; php; node.js; web application; SAAS.

Введение. Актуальность темы обусловлена тем, что системы, которые предполагают работу с большим количеством данных, должны обеспечивать бесперебойную работу и быструю скорость выдачи данных пользователю. Из этого следует, что перед тем, как приступить к написанию серверной части веб-приложения, необходимо провести анализ технологий, который позволят реализовать ее.

Цель работы – провести сравнительный анализ технологий для разработки серверной части системы управления продажами.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- ◆ рассмотреть понятие backend системы и ее взаимодействие с клиентской частью;
- ◆ проанализировать языки, фреймворки и библиотеки для написания backend системы;
- ◆ сравнить технологии по ключевым параметрам;
- ◆ провести тесты производительности;
- ◆ выявить оптимальный фреймворк для разработки.

Backend и его взаимодействие с браузером. Backend включает в себя код, который выполняется на сервере. Он включает в себя взаимодействие с базами данных, API, обработку входящих данных. Пользователь работает лишь с внешней частью системы – заполняя некоторую форму и подтверждая ввод, клиент отправляет введенные данные на сервер, где они затем, при необходимости, подвергаются обработке и сохраняются в базу данных. Поэтому, когда пользователь снова входит в приложение, вся информация остается на виду, где затем ее можно отредактировать, удалить и выполнить другие действия.

Клиентская часть приложения и сервер взаимодействуют друг с другом с помощью HTTP запросов, AJAX. Как правило, используется архитектура REST API, которая включает в себя следующие методы:

- ◆ GET – запрос данных
- ◆ POST – создание новой записи
- ◆ PUT – обновление данных
- ◆ DELETE – удаление данных [1].

В современных веб-приложениях используется AJAX-модель взаимодействия. В фоне браузер создает HTTP запрос к серверу. Сервер получает запрос, обрабатывает и возвращает ответ браузеру. Браузер получает ответ от сервера, как правило в формате JSON, результат отображается на странице без ее перезагрузки. Поскольку система будет реализована в виде Single Page Application, ее жизненный цикл продемонстрирован на рис. 1.

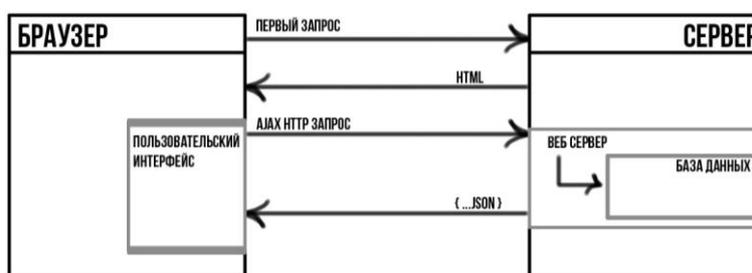


Рис. 1. Жизненный цикл SPA

Популярные технологии для реализации серверной части приложения.

Наиболее популярными языками программирования при разработке серверной части являются JavaScript, Java, PHP, C#. Но стоит отметить, что в чистом виде языки

используются довольно редко – на помощь приходят фреймворки и библиотеки, которые содержат в себе уже готовые блоки кода, реализующие тот или иной функционал, благодаря которому разработчик значительно экономит время [2].

Также существует понятие Serverless-архитектуры (бессерверная архитектура). В основе продукта, который предоставляет данную услугу сервер есть. Для разработчика это значит, что можно сосредоточиться на написании функционала, не тратить время на настройку базы данных, веб-сервера. Основным компонентом здесь выступает облачная функция (FaaS). Функции – это независимые единицы развертывания, которые могут выполнять разные действия, например, сохранение пользователя в базу данных, обработка файлов [3]. Один из сервисов, который позволяет воспроизвести Serverless-архитектуру – Google Firebase.

Таким образом, для проведения исследования были выбраны языки программирования и технологии, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Технологии разработки серверной части приложений

	Языки программирования			
	Java	JavaScript	PHP	Serverless
Технологии	Vert.x	Node.JS	Laravel	Firebase
	Spring			

Сравнение будет проводиться по следующим параметрам (исключая Serverless облачные функции Firebase – о них будет сказано отдельно):

- ◆ поток/процесс;
- ◆ неблокирующий I/O;
- ◆ типизация;
- ◆ простота использования.

Сразу стоит отметить, что эти параметры сравнения будут относиться скорее к языкам программирования (а в случае с JavaScript – к платформе NodeJS), фреймворки и библиотеки как бы «вытекают» из области применения определенного языка программирования и являются инструментами для ускорения разработки приложений, поэтому они будут описаны дополнительно, также будут приведены результаты тестов производительности.

Потоки/процессы и неблокирующий I/O. Практически каждый сайт на PHP использует следующую модель. Браузер отправляет запрос к веб-серверу, на котором установлен Apache, который создает отдельный процесс для входящего запроса. Такой режим работы называется «Один к одному»: один пользовательский запрос – один серверный процесс для его обработки [18]. Принцип работы архитектуры продемонстрирован на рис. 2.

Такое решение крайне затратно в «high load» проектах, поскольку требует большое количество ресурсов для обработки большого количества одновременных соединений. В PHP нет потоков выполнения, поэтому выполнить задачи параллельно не получится.

Java поддерживает многопоточность, благодаря чему на каждое соединение может быть создан свой поток. Это позволяет экономить память, потоки могут обращаться к памяти друг друга, таким образом есть возможность получить кэшированные данные. Многопоточность в Java реализуется путем расширения класса Threads или наследованием от класса Runnable [4]. Реализация неблокирующего I/O в Java возможна с помощью пакета java.nio.

АРХИТЕКТУРА "ОДИН К ОДНОМУ"

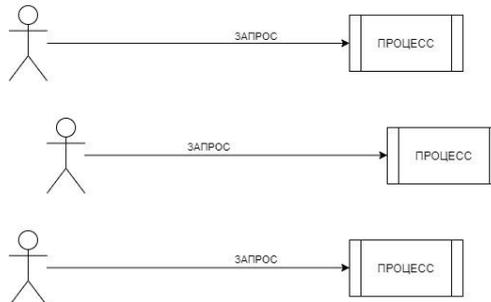


Рис. 2. Архитектура «Один к одному»

NodeJS работает в одном потоке, реализация неблокирующего I/O здесь достигается путем передачи функций обратного вызова [5]. Этот механизм называется EventLoop – цикл событий, который ставит в очередь некоторый callback (обработчик), который запускается асинхронно после завершения процесса чтения/записи – рис. 3. Пример такой реализации, на примере NodeJS и запроса к документу коллекции MongoDB, продемонстрирован в листинге 1.

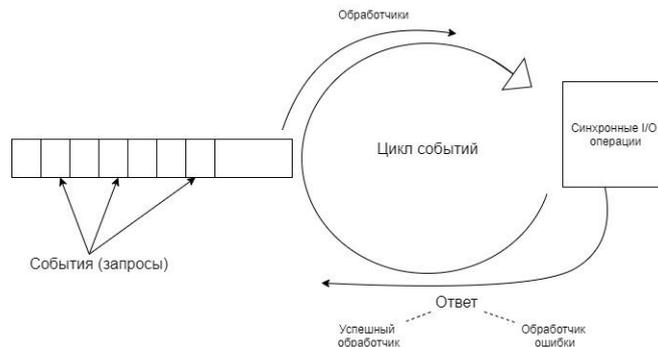


Рис. 3. Цикл событий

```

Листинг 1 – вызов коллбэка после запроса к базе данных
db.collection.find({name: "Anton"}, (err, result) => {
  if (err) return console.error(err)
  console.log(result)
})
    
```

Типизация. Типизация – важный аспект, который напрямую влияет на возможность поддержки проекта, когда масштабы проекта достигают среднего значения. Преимущество строгой типизации в том, что разработчик держит код под контролем: типы входящих и возвращаемых данных. Он как бы задает себе строгие рамки, за которые не может выйти, гарантируя, например, что функция будет принимать объект именно класса Car, а не Human [17]. Это полезно не только для проекта, но также и для компилятора, поскольку указание типов позволит ему делать подсказки по оптимизации. Таким образом, из перечисленных языков программирования строгую типизацию имеет лишь Java. Да, в PHP, начиная с 7 версии, также была введена типизация, но по умолчанию ее нет. Для подключения типизации необходимо использовать оператор declare() с параметром «strict_types=1» [6] – пример продемонстрирован в листинге 2.

```

Листинг 2 – строгая типизация для значений аргументов функции в PHP
declare(strict_types=1);
function multiply(int $a, int $b) {
    return $a * $b;
}

```

Простота использования. Исходя из возможностей языков можно сказать, что самым сложным вариантом написания серверной части приложения будет Java, поскольку кривая обучения здесь более крутая в силу богатой экосистемы языка. Чтобы разобраться в ней потребуется не мало времени, но при этом задача изучения не невыполнимая. Сравнивая PHP и NodeJS можно сказать, что второй использует JavaScript, код которого выглядит более лаконично и понятно. Порог входа для JS значительно ниже, поскольку отсутствует типизация, ООП в его классическом виде. Также разработчики могут использовать JavaScript не только на клиенте, но и на сервере [7].

Таким образом, в табл. 2 представлена итоговая таблица по указанным параметрам сравнения.

Таблица 2

Результаты сравнения по параметрам

	PHP	NodeJS	Java
Работа с потоками/процессами	Процессы	Потоки	Потоки
Неблокирующий I/O	Нет	Есть	Есть
Типизация	Динамическая, возможна типизация параметров функции	Динамическая	Статическая
Сложность	Средняя	Средняя	Сложная

Vert.X и Spring Boot. Сразу стоит отметить, что Eclipse Vert.X позиционирует себя не как фреймворк, а как набор инструментов, который позволяет писать асинхронный неблокирующий код [8]. Spring Boot – фреймворк, соответственно он предоставляет набор инструментов и задает разработчику некоторые архитектурные «правила» для написания приложения. Отсюда сразу можно сделать вывод, что Spring – более тяжеловесное решение, поскольку включает в себя большое количество инструментов.

«Из коробки» Spring boot использует многопоточную модель, когда каждый запрос работает в своем потоке [15, 16]. Абстрактно, запросы быть «медленные», которые требуют большее количество времени на выполнение, и «быстрые», время выполнения которых значительно меньше. При большом количестве «медленных» запросов, «быстрые» запросы все равно будут ожидать очереди выполнения первых, даже если на выполнение им требуется минимальное время, в результате чего образуется «простой». Увеличение потоков отчасти решает эту проблему, но в то же время будет значительно нагружать систему.

Vert.X же использует асинхронный неблокирующий I/O, который работает средствами EventLoop. Таким образом, вместо того, чтобы блокировать поток при выполнении операции ввода-вывода, будет осуществлен переход к следующей операции, которая готова к выполнению, а работа с начальной задачей будет возобновлена после ее завершения. В этом случае получается возможна обработка большего количества запросов при меньшей нагрузке [19, 20].

Vert.X полезно использовать в приложениях, где необходимо обрабатывать большое количество одновременных запросов. С одной стороны может показаться, что библиотеку стоит использовать в исключительно крупных проектах, но это не так. Vert.X также хорошо работает и с более простыми веб-приложениями, поскольку рано или поздно количество трафика будет расти. В таком случае уже будет существовать асинхронная обработка событий, скорость работы не пострадает. Библиотека является полиглотом. Она поддерживает достаточно много языков: Java, Groovy, Scala, Kotlin, JavaScript, Ruby.

Laravel. Laravel – один из самых популярных фреймворков PHP. Он следует модели MVC и значительно облегчает разработку веб-приложений благодаря инструментам роутинга, аутентификации, сеансов [9].

MVC расшифровывается как «Модель – представление – контроллер» [12]. Модель представляет из себя данные, с которыми работает приложение. Например, список товаров в базе данных и категории, за которыми они закреплены. Модель взаимодействует с контроллером. Если пользователь запрашивает страницу со списком товаров, то роль контроллера в том, чтобы выдать в шаблон именно эти данные, а не другие. Если пользователь хочет создать новый товар, то он обращается к контроллеру создания. Шаблон отвечает за показ пользователю данных в оформленном виде. Общая схема работа продемонстрирована на рис. 4.

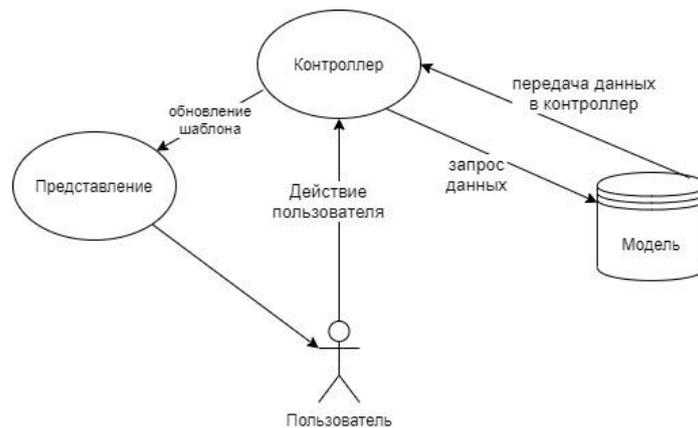


Рис. 4. Схема работы MVC

Бенчмарки. Бенчмарк – он же тест производительности – необходим для определения качества работы технологий по тем или иным параметрам.

В процессе принятия решения о выборе стека технологии для будущей системы, стоит опираться на результаты тестирования производительности. Производительность напрямую влияет на скорость работы, возможность обработать большое количество запросов.

Результаты тестирования должны быть максимально объективными, поскольку иначе результат может быть ошибочным или не корректным. TechemPower предоставляет данные тестирования по большому количеству фреймворком и языков [11]. Их преимущество состоит в том, что, во-первых, тесты для каждой технологии пишут сами разработчики.

Это важно, поскольку они знают, как работает их технология, какие есть нюансы при написании кода – каждый пользователь может написать тест по-своему, и каждый получит разный результат. Во-вторых, написанные тесты запускаются в одном окружении – за счет чего полученные результаты имеют справедливый характер, поскольку проходили работу в одинаковых условиях.

Тест на выдачу чистого текста. На рис. 5 продемонстрированы результаты теста на выдачу чистого текста, который заключается в составлении фреймворком ответа в виде простого текста «Hello, World» на запрос. Здесь запускается шесть тестов при 256, 1024, 4096, 16384 параллельных потоков – лучший результат у Vert.X, худший – Laravel.

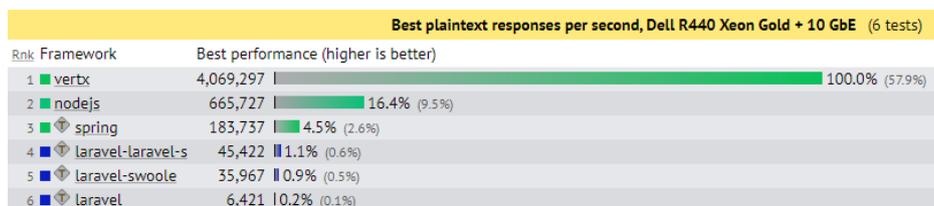


Рис. 5. Рейтинг теста на выдачу чистого текста

Сериализация. Сериализация – процесс перевода объекта в JSON строку [13]. В данном случае фреймворком ожидается объект вида «message»: {«Hello, World!»}, а сервер в свою очередь возвращает его в виде JSON строки.

Результаты теста продемонстрированы на рис. 6. Тест запускается при 16, 32, 64, 128, 256, 512 параллельных потоков. Здесь лидер снова Vert.X, при этом на рис. 7 можно заметить, что для Eclipse Vert.X задержка между ответами в среднем 4мс. Наименьшая средняя задержка у фреймворка NodeJS.

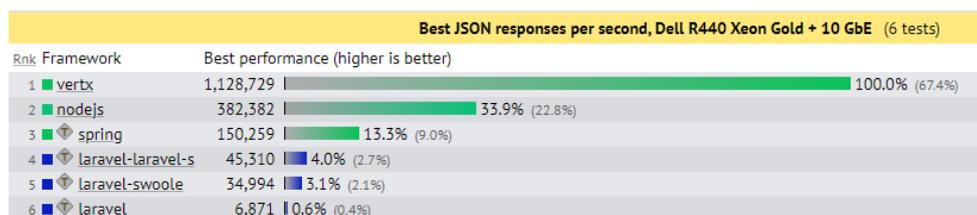


Рис. 6. Результаты теста на сериализацию объекта

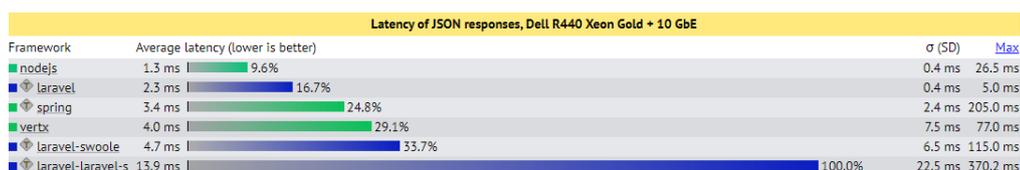


Рис. 7. Задержка между ответами

Множественные запросы к базе данных. Неотъемлемая часть любой системы – запросы к базе для получения необходимых данных. В данном бенчмарке проводится выборка множества полей из простой базы данных, а затем производится их сериализация, формируется JSON-ответ. Тест запускает 1, 5, 10, 15 и 20 запросов к базе данных за один запрос от клиента. Все они проводятся при 512 параллельных потоках.

По результатам, продемонстрированным на рис. 8 можно сделать вывод, что Vert.X может обработать большее количество запросов. Здесь он работает совместно с БД Postgres. Средняя задержка для него также минимальная из всех выбранных технологий – 16мс, максимальная задержка составила 76.2 мс.

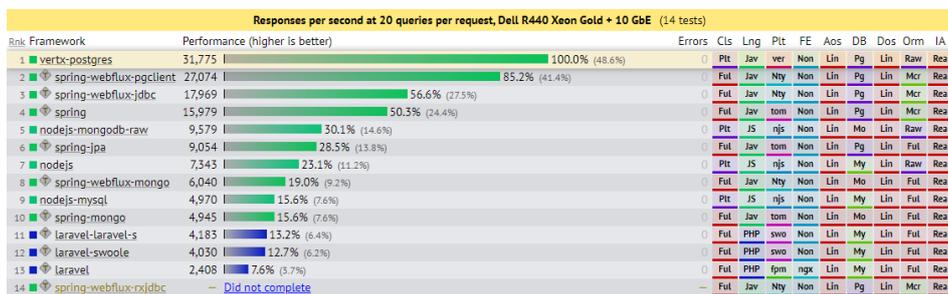


Рис. 8. Результаты теста на множественные запросы к базе данных

Firestore. Firestore отлично подходит для создания прототипов приложений, поскольку позволяет быстро строить бэкэнд. Данный сервис предоставляет большое количество инструментов – от облачной базы данных и облачных функций, то аналитики. Облачные функции позволяют разработчикам перенести API приложения в облако и вызывать их в нужных местах [10].

Сервис условно бесплатный, то есть до достижения определенного количества чтений и записей данных [14]. Отсюда можно сделать вывод, что необходимо правильно организовывать чтение данных, поскольку за это сервисом будет взиматься дополнительная плата.

Данные, которые хранятся здесь – привязаны к Firestore. Это проблема практически всех «Бэкэнд как сервис» поставщиков, что нет возможности и инструментов для переноса данных на другую платформу.

Вывод. Подводя итоги исследования, можно сделать вывод, что для разработки системы для управления продажами будет выбрана библиотека Java Vert.X. Она написана на Java – языке со статической типизацией. При масштабировании проекта это будет иметь значение, поскольку предоставит компилятору больше информации о коде и позволит выявить больше потенциальных ошибок, поведение приложения будет более предсказуемым.

Неблокирующий асинхронный код этой библиотеки позволит быстро обрабатывать большое количество запросов без блокирования кода и не затрачивать лишние ресурсы, так как системы управления продажами предполагают работу с большим количеством данных.

Результаты бенчмарков доказывают, что Vert.X – мощный инструмент для работы не только с большим количеством данных, но также он будет показывать хорошие результаты при выдаче статической информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- MDN Web Docs: Клиент-сервер. – Свободный режим доступа: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/Server-side/First_steps/Client-Server_overview (дата обращения: 24.07.2021).
- Ксендзовский И. Д., Калюжный И. Д., Зариковская Н. В. Разработка серверной части приложений и систем: технологии и языки программирования // European research: Сб. статей XXVII Международной научно-практической конференции. В 2-х ч. Пенза, 07 июня 2020 года. – 2020. – С. 30-32.
- Макоший А. И., Макоший Р. Современная облачная инфраструктура: бессерверные вычисления // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. – 2019. – № 2 (28). – С. 13-16.
- Семченко Р. В., Еролев П. А. Работа с многопоточностью в Java // Постулат. – 2020. – № 9 (59). – С. 45-46.
- NodeJS: Обзор блокирующих и неблокирующих вызовов сервер. – Свободный режим доступа: <https://nodejs.org/ru/docs/guides/blocking-vs-non-blocking> (дата обращения: 25.07.2021).

6. PHP: Объявление типов. – Свободный режим доступа: <https://www.php.net/manual/ru/language.types.declarations.php#language.types.declarations.strict> (дата обращения: 25.07.2021).
7. *Гурулев Д.А.* Сравнение средств разработки PHP и node.js // *Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук: Сб. научных статей по итогам работы третьего международного круглого стола, Казань, 31 июля 2018 года.* – С. 88-91.
8. Vert.x: Официальная документация. – Свободный режим доступа: <https://vertx.io/> (дата обращения: 27.07.2021).
9. *Насиров Э.Ф., Кириллов Д.С., Червнова М.В., Мертинс Г.Р.* Laravel-PHP-фреймворк // *Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: Сб. статей XV Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Пенза, 30 декабря 2020 года.* – С. 62-64.
10. *Париняк А. Ю.* Сравнительный анализ поставщиков облачных услуг для разработки backend-составляющей мобильного приложения // *Научные труды магистрантов и аспирантов: Сб. научных трудов.* – 2020. – С. 183-186.
11. TechEmpower: Web Framework Benchmarks – Свободный режим доступа: <https://www.techempower.com/benchmarks/> (дата обращения: 28.07.2021).
12. *Бахтин И. В.* Главные принципы MVC и смысл использования в разработке программных продуктов // *Форум молодых ученых.* – 2020. – № 1 (41). – С. 63-65.
13. Docs Microsoft: Сериализация в .NET – Свободный режим доступа: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/standard/serialization/> (дата обращения: 28.07.2021).
14. Firebase: Pricing. – Свободный режим доступа: <https://firebase.google.com/pricing> (дата обращения: 25.07.2021).
15. *Куликова Н.Н., Маширов О.А., Соломыков А.Д., Яковлев А.С.* Основы back-end разработки на spring // *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сб. статей XXXVI Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Пенза, 27 июля 2020 года.* – 2020. – С. 158-160.
16. *Макарова О.В., Машанин А.С., Ястребков А.С.* Обзор компонентов Spring Framework для разработки микросервисных приложений // *Наука настоящего и будущего.* – 2020. – Т. 1. – С. 179-182.
17. *Дедов С.В., Кирсанов О.Д., Тимошевская О.Ю.* Анализ преимуществ наиболее востребованных современных языков программирования // *Актуальные вопросы современной науки : сборник статей по материалам XVII международной научно-практической конференции, Томск, 19 декабря 2018 года.* – 2018. – С. 63-72.
18. *Вендров, А.М.* CASE-технологии: Современные методы и средства проектирования информационных систем. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 176 с.
19. MDN Web Docs: Параллельная модель и цикл событий – Свободный режим доступа: <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/JavaScript/EventLoop> (дата обращения: 20.07.2021).
20. Red Hat: Troubleshooting the Performance of Vert.x Applications, Part I – The Event Loop Model – Свободный режим доступа: <https://www.redhat.com/en/blog/troubleshooting-performance-vertx-applications-part-i-%E2%80%94-event-loop-model> (дата обращения: 20.07.2021).

REFERENCES

1. MDN Web Docs: Client-Servcer. Available at: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/Server-side/First_steps/Client-Server_overview (accessed 24 July 2021).
2. *Ksendzovskiy I. D., Kalyuzhnyy I.D., Zarikovskaya N.V.* Razrabotka servernoy chasti prilozheniy i sistem: tekhnologii i yazyki programmirovaniya [Development of the server side of applications and systems: technologies and programming languages], *European reserch: Sb. statey XXVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2-kh chastyakh, Penza, 07 iyunya 2020 goda* [European reserch: Collection of articles of the XXVII International scientific and practical conference. In 2 parts, Penza, June 07, 2020], 2020, pp. 30-32.
3. *Makosiy A.I., Makosiy R.* Sovremennaya oblachnaya infrastruktura: besservernyye vychisleniya [Modern cloud infrastructure: serverless computing], *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova* [Bulletin of the Khakass State University named after N.F. Katanova], 2019, Vol 2 (28), pp. 13-16.
4. *Semchenko R.V., Erolev P.A.* Rabota s mnogopotchnost'yu v Java [Working with multithreading in Java], *Postulat* [Postulate], 2020, Vol. 9 (59), pp. 45-46.

5. NodeJS: Overview of Blocking vs Non-Blocking. Available at: <https://nodejs.org/ru/docs/guides/blocking-vs-non-blocking> (accessed 25 July 2021).
6. PHP: Type declarations. Available at: <https://www.php.net/manual/ru/language.types.declarations.php#language.types.declarations.strict> (accessed: 25 July 2021).
7. Gurulev D.A. Sravnenie sredstv razrabotki PHP i node.js [Comparison of PHP and node.js development tools], *Fundamental'nye i prikladnye razrabotki v oblasti tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk: Sbornik nauchnykh statey po itogam raboty tret'ego mezhdunarodnogo kruglogo stola, Kazan', 31 iyulya 2018 goda* [Fundamental and applied developments in the field of technical and physical and mathematical sciences: Collection of scientific articles following the results of the third international round table, Kazan, July 31, 2018], pp. 88-91.
8. Vert.X: Official documentation. Available at: <https://vertx.io/> (accessed 27 July 2021).
9. Nasirov E.F., Kirillov D.S., Chervnova M.V., Mertins G.R. Laravel-PHP-freymvork [Laravel-php framework], *Proryvnye nauchnye issledovaniya: problemy, zakonomernosti, perspektivy: sbornik statey XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 ch., Penza, 30 dekabrya 2020 goda* [Breakthrough scientific research: problems, patterns, prospects: collection of articles of the XV International Scientific and Practical Conference: at 2 pm, Penza, December 30, 2020], pp. 62-64.
10. Parinyak A.Y. Sravnitel'nyy analiz postavshchikov oblachnykh uslug dlya razrabotki backend-sostavlyayushchey mobil'nogo prilozheniya [Comparative analysis of cloud service providers for the development of a backend component of a mobile application], *Nauchnye trudy magistrantov i aspirantov: Sbornik nauchnykh trudov* [Scientific works of undergraduates and graduate students: Collection of scientific papers], 2020, pp. 183-186.
11. TechEmpower: Web Framework Benchmarks Available at: <https://www.techempower.com/benchmarks/> (accessed 28 July 2021).
12. Bahitin I.V. Glavnye principy MVC i smysl ispol'zovaniya v razrabotke programmnykh produktov [The main principles of MVC and the meaning of using it in software development], *Forum molodykh uchenykh* [Forum of Young Scientists], 2020, Vol 1 (41), pp. 63-65.
13. Docs Microsoft: Serialization in .NET. Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/serialization> (accessed 28 July 2021).
14. Firebase: Pricing. Available at: <https://firebase.google.com/pricing> (accessed 25 July 2021).
15. Kulikova N.N., Mashirov O.A., Solomykov A.D., Yakovlev A.S. Osnovy back-end razrabotki na spring [Fundamentals of back-end development at spring]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii: sbornik statey XXXVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 ch., Penza, 27 iyulya 2020 goda* [Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations: collection of articles of the XXXVI International Scientific and Practical Conference: in 2 parts, Penza, July 27, 2020], 2020, pp. 158-160.
16. Makarova O.V., Mashanin A.S., Yastrebkov A.S. Obzor komponentov Spring Framework dlya razrabotki mikroservisnykh prilozheniy [Overview of Spring Framework components for the development of micro service applications], *Nauka nastoyashchego i budushchego* [Science of the present and the future], 2020, Vol. 1, pp. 179-182.
17. Dedov S.V., Kirсанov O.D., Timoshevskaya Y.U. Analiz preimushchestv naibolee vostrebovannykh sovremennykh yazykov programmirovaniya [Analysis of the advantages of the most popular modern programming languages], *Aktual'nye voprosy sovremennoy nauki: Sb. statey po materialam XVII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tomsk, 19 dekabrya 2018 goda* [Actual issues of modern science: a collection of articles based on the materials of the XVII International Scientific and Practical Conference, Tomsk, December 19, 2018], 2018, pp. 63-72.
18. Vendrov A.M. CASE-tekhnologii: Sovremennyye metody i sredstva proektirovaniya informatsionnykh system [CASE-technologies: Modern methods and means of designing information systems]. Moscow: *Finansy i statistika* [Finance and Statistics], 1998, 176 p.
19. MDN Web Docs: Concurrency model and the event loop. Available at: <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/JavaScript/EventLoop> (accessed 20 July 2021).
20. Red Hat: Troubleshooting the Performance of Vert.x Applications, Part I – The Event Loop Model. Available at: <https://www.redhat.com/en/blog/troubleshooting-performance-vertx-applications-part-i-%E2%80%94-event-loop-model> (accessed 20 July 2021).

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.А. Полупанов.

Родыгина Ирина Владимировна – Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова; e-mail: habarova@mail.ru; г. Новороссийск, Россия; тел.: +79282284417; кафедра радиоэлектроники и информационных технологий; к.т.н.; доцент.

Наливайко Антон Викторович – e-mail: guzurogm@gmail.com; тел.: 89002396697; магистрант.

Rodygina Irina Vladimirovna – Admiral Ushakov Maritime State University; e-mail: habarova@gmail.ru, Novorossiysk, Russia; phone: +79282284417; the department of radioelectronics and information technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Nalivayko Anton Viktorovich – e-mail: guzurogm@gmail.com; phone: +79002396697; master's 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 ссылку на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.