



№3-2020

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Моделирование процессов, устройств и систем
- Алгоритмы обработки информации
- Машинное обучение и нейронные сети
- Анализ и распознавание образов
- Электроника и нанотехнологии

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Научно-технический и прикладной журнал
Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»
Подписной индекс 41970

№ 3 (213). 2020 г.

Тематический выпуск

КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, ИНЖЕНЕРИИ И УПРАВЛЕНИИ

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

Редакционный совет

Каляев И.А. (председатель); Курейчик В.В. (зам. председателя); Курейчик В.М. (зам. председателя); Бородинский 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.; Фраджов 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 Клевцов С.И.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Подписано к печати . Формат $70 \times 108 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 19,3. Уч.-изд. л. – 17,5.

Заказ № . 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. 8 (863) 247-80-51.

Адрес редколлегии: 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, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

Е.С. Алексюнин ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УСТРОЙСТВ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	6
А.С. Болдырев, А.Л. Веревкин, К.В. Пшихопова, Л.С. Веревкина МЕТОДИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ПЛАТФОРМАМИ ...	16
О.Ю. Воронков СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ».....	29
С.М. Гушанский, В.И. Божич, В.С. Потапов РАЗРАБОТКА КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОДОВ ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ВИДОВ КВАНТОВЫХ ОШИБОК	40
С.И. Клевцов ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ФОРМЫ СОВОКУПНОСТИ ЕГО ЗНАЧЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ	46
Х.М.Б. Нсуе, В.П. Федосов, С.В. Кучерявенко ЦИФРОВОЙ УМНОЖИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ LABVIEW	55
Н.Н. Кисель, А.А. Ваганова, И.А. Ваганов ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА МОЛОКА ЭНЕРГИЕЙ СВЧ ПОЛЯ	68
Н.Н. Кисель, А.А. Ваганова, А.Н. Савицкий ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЗЕРНА ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СВЧ ПОЛЯ	78

РАЗДЕЛ II. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Н.В. Болдырихин, Ф.А. Алтунин, Д.А. Короченцев ОСОБЕННОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ЗАШИФРОВАННОГО СЕТЕВОГО ТРАФИКА	89
И.И. Левин, А.И. Дордопуло, И.В. Писаренко, Д.В. Михайлов ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГРАФОВ С АССОЦИАТИВНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ SET@L.....	98
Я.К. Салал, С.М. Абдуллаев МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ: ДЕМОНСТРАЦИЯ ПОДХОДОВ И АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ	112
П.А. Чуб, Д.Н. Цветкова, Н.В. Болдырихин, Д.А. Короченцев ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ ОТ УТЕЧЕК РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМОВ.....	122

РАЗДЕЛ III. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Д.В. Балабанов, А.В. Ковтун, Ю.А. Кравченко ДВУХЭТАПНЫЙ БУСТИНГ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БИОИНСПИРИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ	133
В.В. Бахчевников, В.А. Деркачев, А.Н. Бакуменко СПОСОБ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДСТВ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ПЛИС	146

В.В. Бова, Д.Ю. Запорожец, Ю.А. Кравченко, Э.В. Кулиев, В.В. Курейчик, Н.А. Лызь	
ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЯВНЫХ УГРОЗ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АКТИВНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В ИНТЕРНЕТ-ПРОСТРАНСТВЕ	156
Шивам Шендре, Шубханги Сапкал	
ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К БЕЗОПАСНОСТИ ШАБЛОНОВ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВЕН ПАЛЬЦА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ	173
РАЗДЕЛ IV. АНАЛИЗ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ	
Р.В. Гор, А.Д. Мишра, Р.Р. Дешмух, И.Б. Аббасов, П.У. Рандив	
LULC-АНАЛИЗ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕКОНТРОЛИРУЕМОЙ КЛАССИФИКАЦИИ	184
К.И. Морев, А.В. Боженюк	
СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ОСОБЫМ ТОЧКАМ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ	192
И.Б. Аббасов, Р.Р. Дешмух	
РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР, РАСТЕНИЙ И ЛЕСНЫХ МАССИВОВ	202
РАЗДЕЛ V. ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОТЕХНОЛОГИИ	
М.А. Мараховский, А.А. Панич, В.А. Мараховский	
ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДОВ ИНТЕНСИВНОГО СПЕКАНИЯ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	213

CONTENT

SECTION I. MODELING OF PROCESSES, DEVICES, AND SYSTEMS

E.S. Aleksyunin RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SMALL-SIZED ULTRASONIC COOLING DEVICES.....	6
A.S. Boldyrev, A.L. Verevkin, K.V. Prihodova, L.S. Verevkin METHODOLOGY AND RELIABILITY MODELING OF THE GROUP CONTROL SYSTEM FOR ROBOTIC PLATFORMS.....	16
O.Yu. Voronkov SYNERGETIC SYNTHESIS OF A DISTURBANCE OBSERVER FOR THE “FLYING PLATFORM” CONTROL SYSTEM.....	30
S.M. Gushanskiy, V.I. Bozhich, V.S. Potapov DEVELOPMENT OF CORRECTION CODES FOR CORRECTING SEVERAL KINDS OF QUANTUM ERRORS.....	40
S.I. Klevtsov DETERMINING THE NATURE OF PARAMETER CHANGES BASED ON THE ANALYSIS OF DYNAMICS RELATIVE TO THE SHAPE OF ITS VALUES SET IN REAL TIME.....	47
J.M.B. Nsue, V.P. Fedosov, S.V. Kucheryavenko DIGITAL MULTIPLIER-CONVERTING METHOD FOR MEASURING FREQUENCY INSTABILITY USING THE LABVIEW PROGRAMMING ENVIRONMENT	56
N.N. Kisel, A.A. Vaganova, I.A. Vaganov SIMULATION MODELING OF MILK HEATING BY THE ENERGY OF MICROWAVE FIELD	69
N.N. Kisel, A.A. Vaganova, A.N. Savitskiy SIMULATION MODELING OF GRAIN HEATING BY THE ENERGY OF ELECTROMAGNETIC MICROWAVE FIELD.....	79

SECTION II. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

N.V. Boldyrikhin, F.A. Altunin, D.A. Korochentsev CLASSIFICATION FEATURES OF ENCRYPTED NETWORK TRAFFIC	89
I.I. Levin, A.I. Dordopulo, I.V. Pisarenko, D.V. Mihaylov DESCRIPTION OF GRAPHS WITH ASSOCIATIVE OPERATIONS IN SET@L PROGRAMMING LANGUAGE	99
Ya.K. Salal, S.M. Abdullaev MONITORING OF THE EDUCATION QUALITY AND IMPLEMENTING OF INDIVIDUAL LEARNING: DEMONSTRATION OF APPROACHES AND EDUCATIONAL DATA MINING ALGORITHMS	112
P.A. Chub, D.N. Tsvetkova, N.V. Boldyrikhin, D.A. Korochentsev ESTIMATION OF SECURITY OF THE PREMISES FROM LEAKAGE OF SPEECH INFORMATION IN CONDITIONS OF EXPOSURE TO NOISE	123

SECTION III. MACHINE LEARNING AND NEURAL NETWORKS

D.V. Balabanov, A.V. Kovtun, Yu.A. Kravchenko TWO-STAGE BOOSTING OF BINARY CLASSIFICATION BASED ON THE APPLICATION OF BIOINSPIRED ALGORITHMS.....	133
V.V. Bakhchevnikov, V.A. Derkachev, A.N. Bakumenko USING FAST PROTOTYPING FACILITIES FOR IMPLEMENTATION OF A CONVOLUTION NEURAL NETWORK ON A FPGA	147

V.V. Bova, D.Yu. Zaporozhets, Yu.A. Kravchenko, E.V. Kuliev, V.V. Kureyichik, N.A. Lyz	
IMPLICIT THREATS IDENTIFICATION BASED ON ANALYSIS OF USER ACTIVITY ON THE INTERNET SPACE.....	157
Shivam Shendre, Dr. Shubhangi Sapkal	
A HYBRID APPROACH FOR DEEP LEARNING BASED FINGER VEIN BIOMETRICS TEMPLATE SECURITY.....	173
SECTION IV. IMAGE ANALYSIS AND RECOGNITION	
R.W. Gore, A.D. Mishra, R.R. Deshmukh, I.B. Abbasov, P.U. Randive	
LULC-ANALYSIS OF LAND-USE WITH THE HELP OF UNSUPERVISED CLASSIFICATION	184
K.I. Morev, A.V. Bozhenyuk	
IMAGE MATCHING USING DIFFERENT KEYPOINTS TYPES.....	193
I.B. Abbasov, R.R. Deshmukh	
IMAGE RECOGNITION OF AGRICULTURAL CROPS, PLANTS AND FORESTS	202
SECTION V. ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY	
M.A. Marakhovskiy, A.A. Panich, V.A. Marakhovskiy	
THE PROSPECTS FOR INTENSIFICATION OF SINTERING OF PIEZOCERAMIC MATERIALS.....	213

Раздел I. Моделирование процессов, устройств и систем

УДК 534-13

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-6-16

Е.С. Алексюнин

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УСТРОЙСТВ ОХЛАЖДЕНИЯ

Развитие современных систем подачи воздуха для охлаждения технических систем требует новых подходов, в которых приборостроение использует пьезокерамические технологии. При этом необходимо провести исследования как на уровне подбора новых перспективных пьезоматериалов, что и было сделано в работе, так и новых типов компоновки устройства с точки зрения конструкции. Традиционно используемые системы охлаждения имеют вращающиеся части, создают дополнительный акустический шум. Этих недостатков лишены устройства подачи воздуха, использующие пьезокерамические компоненты. Статья содержит материалы о разработке современных устройств охлаждения, основанных на использовании пьезокерамических пластин. Проведён анализ процессов, происходящих в воздушной среде в соответствии с современными представлениями о теории вещества. Приведены различные варианты проектирования такого рода устройств. Рассмотрен процесс проектирования от математического моделирования до воплощения в макетах. Моделированию были подвергнуты как сами пьезокерамические устройства, так и процессы распределения потоков в воздушной среде. В процессе моделирования исследованы наиболее простые в изготовлении и надёжные в эксплуатации конструкции. Все рассмотренные варианты относятся к пьезоэлектрическому биморфному типу, и являются пьезоэлектрическими актюаторами, преобразующими электрические сигналы в механические усилия. Приводятся различные схемы компоновки таких колебательных систем, демонстрируются варианты их математического моделирования, конечно-элементные модели воздушной среды, амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики моделируемых макетов. Проводится сравнительный анализ изделий, их электрофизических характеристик, исходя из перспектив дальнейшего применения. Для исследований применялись различные пьезокерамические материалы, как традиционные, так и новые перспективные материалы. Ряд изделий представлен в размерах с детальным описанием, приведены их сравнительные характеристики. В заключении сделаны выводы о перспективных вариантах дальнейшего проектирования таких устройств и направлениях исследования.

Пьезокерамический биморф; конечно-элементная модель; устройства охлаждения; актюатор.

E.S. Aleksyunin

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SMALL-SIZED ULTRASONIC COOLING DEVICES

The development of modern air supply systems for cooling technical systems requires new approaches in which instrumentation uses piezoceramic technologies. At the same time, it is necessary to conduct research both at the level of selection of new perspective piezomaterials, which was done in the work, and of new types of device layout from the point of view of design. Traditionally used cooling systems have rotating parts that create additional acoustic noise. These drawbacks are devoid of air supply devices using piezoceramic components. The article contains materials on the development of modern cooling devices based on the use of piezoceramic plates. The analysis of the processes occurring in the air in accordance with modern ideas about the theory of matter. Various design options for such devices are given. The design process from mathematical modeling to implementation in mock-ups

is considered. Both the piezoceramic devices themselves and the flow distribution processes in the air were subjected to modeling. In the process of modeling, the simplest to manufacture and reliable in operation structures were investigated. All considered variants belong to the piezoelectric bimorph type, and are piezoelectric actuators that convert electrical signals into mechanical forces. Various layout schemes for such oscillatory systems are presented, variants of their mathematical modeling, finite element models of the air environment, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the simulated models are shown. A comparative analysis of products, their electrophysical characteristics, based on the prospects for their further application is carried out. For research, various piezoceramic materials were used, both traditional and repeatedly tested, and new promising materials. A number of products are presented in sizes with a detailed description, their comparative characteristics are given. At the end of the work, conclusions were made about promising options for the further design of such devices and areas of research.

Piezoceramic bimorph; finite element model; cooling devices; actuator.

Введение. В последнее время актуальной является разработка малогабаритных устройств подачи воздуха для целей охлаждения сложных технических систем. Устройства, основанные на использовании пьезоэффекта, постепенно завоевывают рынок ввиду более высокой надёжности из-за отсутствия движущихся частей, небольшого тепловыделения, отсутствия дополнительного акустического шума при работе. Следует отметить ещё ряд преимуществ, таких как малое потребление энергии, компактность конструкции, долговечность, широкий температурный диапазон (от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$). Они не создают электромагнитных помех, стойки к агрессивным средам и радиации.

Как правило, биморфные системы состоят из склеенных между собой пластин, одна из которых изготовлена из металла, другая является пьезокерамической. В некоторых случаях металлическая пластина сопрягается с двумя пьезокерамическими элементами, по одной с каждой стороны. Металлическая пластина может представлять из себя латунь, нержавеющей сталь, бериллиевую бронзу, никелевую фольгу, алюминий, титан. В отдельных случаях эта пластина может состоять из полимерного композита.

Работа устройств подачи воздуха происходит за счёт нагнетания давления воздушной массы в локальном окружении устройства и, как следствие, создание стационарного воздушного потока. Устройство охлаждения, которое использует в качестве элемента нагнетания пьезобиморф, создаёт внутри своего корпуса зоны повышенного акустического давления, что, в свою очередь, обеспечивает ускоренное перемещение воздушного потока. Звуковые колебания биморфной пластины способствуют перемещению слоя высокого давления.

На молекулярном уровне процесс происходит следующим образом. Когда биморф начинает своё поступательное движение, он толкает воздух перед собой, тем самым, заставляет молекулы воздуха двигаться перпендикулярно своей поверхности. Согласно закону Бойля-Мариотта [1] давления одного и того же количества газа при неизменной температуре обратно пропорциональны объёмам занимаемым этим количеством газа. Например, если некоторое количество газа сжимается до половины своего первоначального объёма, то давление в газе увеличивается в два раза, и наоборот, если некоторому количеству газа предоставляется двойной объём, то давление уменьшается в два раза. Это выражается уравнением:

$$PV = P_1V_1, \quad (1)$$

где P_1 – начальное давление; V_1 – начальный объём; P и V – соответственные значения давления и объёма при любом другом состоянии газа.

То есть, согласно этому закону, создаётся область, где плотность молекул воздуха выше и, следовательно, давление тоже выше, так как происходит сжатие окружающей среды.

После того как искривление биморфа достигает своей максимальной амплитуды, пластина останавливается, чтобы потом начать движение обратно. При движении биморфа в обратном направлении, образуется зона разрежения, вследствие

чего, плотность и давление оказывается ниже давления окружающей среды. При колебании биморфа, сжатия и разрежения воздуха повторяются. В результате непрерывно генерируются звуковые волны, представляющие собой области высокого и низкого давления, движущиеся от биморфа.

Проработки динамики такого рода процессов велись давно [2–6], но лишь в последнее время они начали завершаться фундаментальными математическими моделями [7–12], позволяющими с помощью метода конечных элементов в рабочей среде ANSYS с достаточной точностью прогнозировать поведение, как отдельных частей устройства, так и всего макета в целом.

Основная часть. С целью оптимизации экспериментальных устройств было разработано несколько конструкций, которые прошли стадии от математического моделирования в рабочей среде ANSYS до воплощения в макетный образец, в котором изменялись как сами геометрические конструкции устройств, так и подбирались различные пьезоматериалы [13]. В данной работе представлены наиболее эффективные модели.

Одним из вариантов моделирования было устройство, состоящее из 4-х элементов представленных на рис. 1 (конструкция №1). Четвёртый элемент – «биморф» – состоит из двух склеенных между собой пластин из нержавеющей стали различной толщины и пьезокерамического диска. Такая конструкция позволяет вынести эффективную рабочую частоту за границу слышимого диапазона (представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) на рис. 4). Конструктивный эскиз и конечно-элементная сетка модели представлены на рис. 1 и 2.

В качестве пьезоэлемента при моделировании был использован известный промышленный материал ЦТС-19.

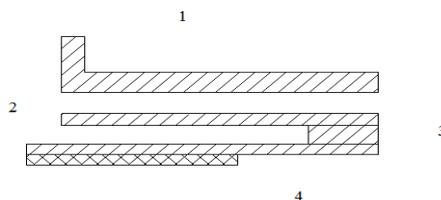


Рис. 1. Конструктивный эскиз (осесимметричная модель): 1 – корпус вентилятора с центральным отверстием (пластмасса); 2 – крышка рабочей камеры (нержавеющая сталь); 3 – разделительное кольцо (нержавеющая сталь); 4 – биморф

С целью анализа работы конструкции была применена система ANSYS для изучения колебаний биморфа, а, также, проведён гидродинамический анализ; на рис. 3 представлена конечно-элементная сетка воздушной среды.

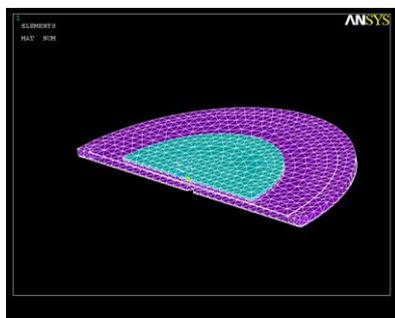


Рис. 2. Конечно-элементная модель конструкции №1

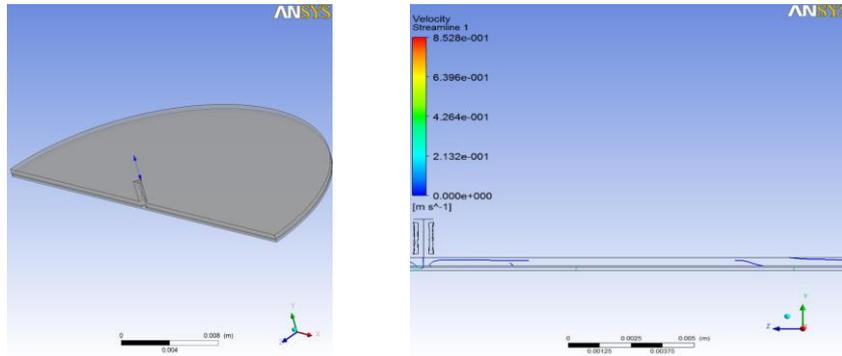


Рис. 3. Конечно-элементная модель воздушной среды

Параметры исследуемой конструкции задавались следующие:

- ◆ высота пьезокерамического диска 0,3 мм;
- ◆ высота диска из нержавеющей стали 0,1 мм;
- ◆ диаметр диска нержавеющей стали 19 мм;
- ◆ диаметр диска пьезокерамики 11 мм;
- ◆ радиус рабочей камеры 17 мм;
- ◆ высота разделительного кольца (высота рабочей камеры) 0,4мм;
- ◆ расстояние между крышкой и корпусом 0,4 мм;
- ◆ диаметр входного отверстия рабочей камеры 0,6 мм;
- ◆ диаметр выходного отверстия корпуса 0,8 мм.

На рис. 4 и 5 представлены расчётные частотные зависимости модуля и фазы импеданса устройства.

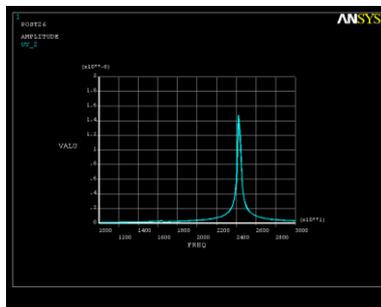


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика пластины биморфа (АЧХ)

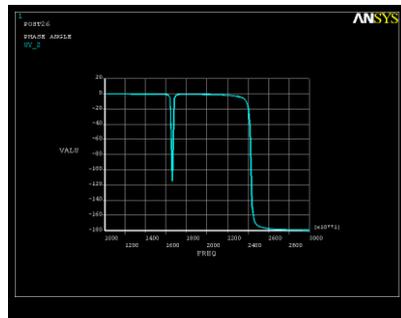


Рис. 5. Фазово-частотная характеристика пластины биморфа (ФЧХ)

На рис. 6 приведена форма деформации конструкции №1 на частоте резонанса.

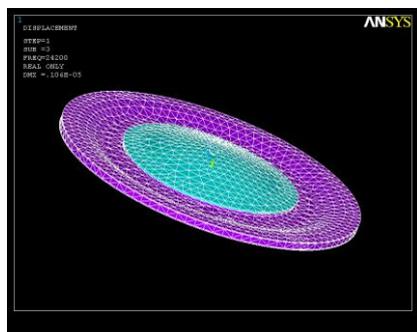


Рис. 6. Относительная деформация устройства на резонансной частоте (вид со стороны керамики)

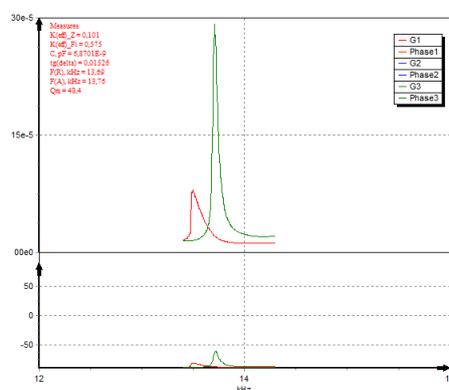


Рис. 7. Электрофизические параметры конструкции №1 в рабочей среде программного продукта для анализа электрофизических параметров

Первые конструкции имели рабочие частоты от 13 до 18 кГц и производительность порядка 0,43 л/мин, что потребовало продолжения поиска новых конструктивных решений для повышения частоты и производительности.

В качестве второй исходной модели была выбрана конструкция для биморфа на основе перспективного состава пьезокерамики ЦТС-ЦНН и латунного диска со следующими размерами:

- ◆ толщина пьезокерамического диска 0,21 мм;
- ◆ толщина диска из латуни 0,37 мм;
- ◆ диаметр латунного диска 20 мм;
- ◆ диаметр пьезокерамического диска 11 мм;

Конструктивный эскиз и конечно-элементная сетка данной модели выглядят таким же образом, как представлено на рисунке 1 и 2.

Параметры конструкции №2:

- ◆ высота разделительного кольца 0,3мм;
- ◆ расстояние между крышкой и корпусом 0,9 мм;
- ◆ диаметр входного отверстия рабочей камеры 0,6 мм;
- ◆ диаметр выходного отверстия корпуса 0,8 мм.
- ◆ диаметр рабочей камеры 13 мм;
- ◆ высота разделительного кольца (высота рабочей камеры) 0,4мм;

- ◆ расстояние между крышкой и корпусом 0,4 мм;
- ◆ диаметр входного отверстия рабочей камеры 0,6 мм;
- ◆ диаметр выходного отверстия корпуса 0,8 мм.

На рис. 8 и 9 представлены расчётные частотные зависимости модуля и фазы импеданса конструкции №2.

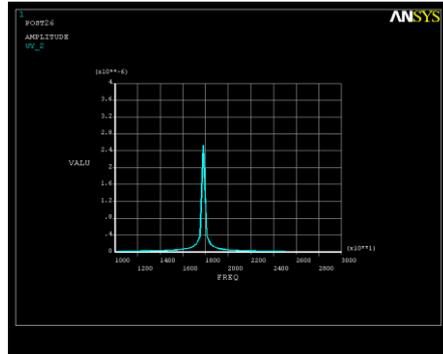


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) пластины биморфа конструкции №2



Рис. 9. Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) пластины биморфа конструкции №2

Для измерения электрофизических параметров макетных образцов были разработаны специальные пакеты программных продуктов [14–20] и новый пьезоматериал ЦТС-ЦНН. Результаты измерений электрофизических параметров конструкции №2, приведены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты измерений электрофизических параметров образца № 2

Наименование	Значение
С (pF):	6,7208E-9
tg(delta):	0,01384
Qm:	192,71
K(eff) Z:	0,166
K(eff) Fi:	0,123
F(R): Гц	17 001,000
F(A): Гц	17250,000

В ходе анализа конструкции №2 стало очевидным, что замена нержавеющей стали латунью и применение нового пьезоматериала не принесли существенных изменений в эффективности устройства, поэтому решено было полностью переработать саму конструкцию изделия, в результате чего перешли к моделированию конструкции №3. Образец №3 реализует идею «кузнечных мехов», при которой воздушный поток движется перпендикулярно колебаниям биморфов.

В конструкции №3 также применялась пьезокерамика из материала ЦТС-ЦНН и латунный диск с размерами, описанными в конструкции №2, а именно:

- ◆ толщина пьезокерамического диска 0,21 мм;
- ◆ толщина диска из латуни 0,37 мм;
- ◆ диаметр латунного диска 20 мм;
- ◆ диаметр пьезокерамического диска 11 мм;

Конструктивный эскиз модели представлен на рис. 10. Элемент «биморф» состоит из двух склеенных между собой дисков – из латуни и пьезокерамики. Для проведения анализа конструкции на рис. 11 представлена конечно-элементная сетка воздушной среды.

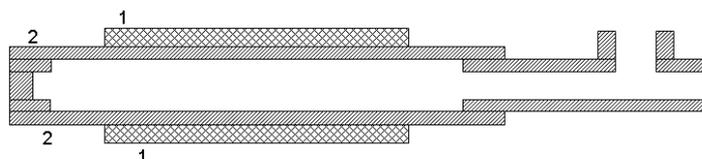


Рис. 10. Конструктивный эскиз (модель в разрезе): 1 – биморф; 2 – разделительные прокладки

Параметры конструкции №3:

- ◆ высота рабочей камеры 0,3мм;
- ◆ диаметр выходного отверстия 0,6–0,7 мм (на эскизе вверху);
- ◆ сечение входного отверстия 0,6х0,6 мм (на эскизе горизонтально справа);
- ◆ диаметр рабочей камеры 13 мм.
- ◆ расстояние между входным и выходным отверстиями 1,9 мм;
- ◆ расстояние между стенкой рабочей камеры и входным отверстием 2,0 мм;

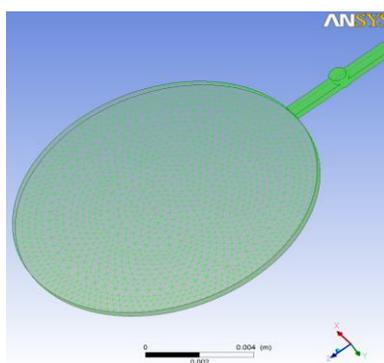


Рис. 11. Конечно-элементная модель воздушной среды

На рис. 12 и 13 представлены расчётные частотные зависимости модуля и фазы импеданса биморфов устройства.

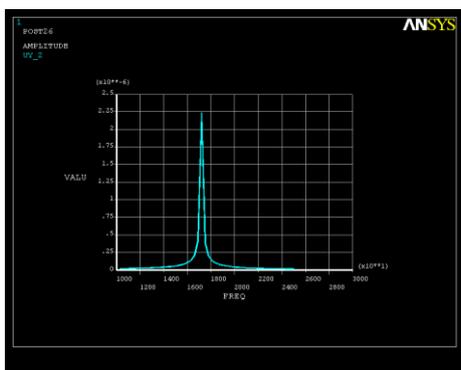


Рис. 12. АЧХ пластины биморфа

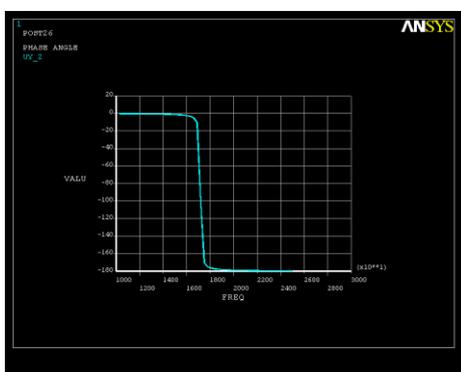


Рис. 13. ФЧХ пластины биморфа

Таблица 2

Результаты измерений электрофизических параметров образца № 3

Наименование электрофизической величины	Значение
C (pF):	7,25E-09
tg(delta):	0,0231
Qm:	137,5
K(eff) Z:	0,0584
K(eff) Fi:	0,3419
F(R): Гц	25 795,000
F(A): Гц	27 449,000

На основании данных, полученных в результате измерения электрофизических параметров устройств, изготовленных по расчётным моделям, наиболее перспективной оказалась конфигурация образца №3.

Заключение. По результатам проведения математического моделирования изготовлен ряд макетов, подтверждающих возможность создания малогабаритных устройств подачи воздуха для целей охлаждения технических систем без движущихся частей. Сформированы общие подходы к проектированию подобных устройств. По результатам макетирования можно констатировать, что наиболее перспективный образец показал лучшие результаты, а именно более высокую производительность 0,57 л/мин.

Показано, что дальнейшую модернизацию устройств охлаждения целесообразно проводить, как модифицируя саму геометрическую конструкцию, так и применяя новые пьезоматериалы с более высокими электрофизическими параметрами. Всё это позволит повысить рабочую частоту устройств до 30-40 кГц, что увеличит производительность системы охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
2. *Матаушек И.* Ультразвуковая техника: монография. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 278 с.
3. *Геригал Д.А., Фридман В.М.* Ультразвуковая технологическая аппаратура. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.
4. *Харкевич А.А.* Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы: монография. – М.: Наука, 1973. – 398 с.
5. *Каневский И.Н.* Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн: монография. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
6. *Мезон У.* Физическая акустика: монография. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
7. *Сильвестер П., Феррари Р.* Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
8. *Галлагер Р.* Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
9. *Vatulian A.O., Kublikov V.L.* Boundary element method in electroelasticity // *Boundary Elem. Commun.* – 1995. – Vol. 6. – P. 59-61.
10. *Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.* ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. – М.: УРСС, 2003. – 269 с.
11. *Басов К.А.* ANSYS в примерах и задачах / под общ. ред. Красковского Д.Г. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
12. *Митько В.Н., Крамаров Ю.А., Панич А.А.* Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2009. – 168 с.
13. *Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В.* Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // *Инженерный вестник Дона.* – 2011. – № 1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (доступ свободный). – Загл. с экрана. Яз. рус.
14. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613572 «Система управления измерениями и расчёта параметров Nioki ZKeff (коэффициент электромеханической связи) Nioki ZKeff v. 1.0» 06.05.2011.
15. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613567.
16. «Система управления измерениями и расчёта параметров Nioki B (реактивная составляющая проводимости пьезоэлемента) Nioki B v. 1.0» 06.05.2011.
17. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613570 «Система управления измерениями и расчёта параметров Nioki Y (полная проводимость пьезоэлемента) Nioki Y v. 1.0» 06.05.2011.
18. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613569 «Система анализа данных и управления измерениями Nioki Manager» «Nioki Manager v. 1.0» 06.05.2011.
19. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613568 «Система управления измерениями и расчёта параметров Nioki G (активная составляющая проводимости пьезоэлемента) Nioki G v. 1.0» 06.05.2011.
20. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613571 «Система управления измерениями и расчёта параметров Nioki ZC (полное сопротивление и ёмкость пьезоэлемента) Nioki ZC v. 1.0» 06.05.2011.

REFERENCES

1. *Prandtl' L.* *Gidraeromekhanika [Hydroaeromechanics].* Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2000, 576 p.
2. *Mataushek I.* *Ul'trazvukovaya tekhnika: monografiya [Ultrasonic technology: monograph].* Moscow: Metallurgizdat, 1962, 278 p.

3. *Gershgal D.A., Fridman V.M.* Ul'trazvukovaya tekhnologicheskaya apparatura [Ultrasonic technological equipment]. 3 rd ed. Moscow: Energiya, 1976, 320 p.
4. *Kharkevich A.A.* Teoriya elektroakusticheskikh preobrazovateley. Volnovye protsessy: monografiya [The theory of electroacoustic transducers. Wave processes: monography]. Moscow: Nauka, 1973, 398 p.
5. *Kanevskiy I.N.* Fokusirovanie zvukovykh i ul'trazvukovykh voln: monografiya [Focusing sound and ultrasonic waves: monograph]. Moscow: Nauka, 1977, 336 p.
6. *Mezon U.* Fizicheskaya akustika: monografiya [Physical acoustics: monograph]. Moscow: Mir, 1966, 592 p.
7. *Sil'vester P., Ferrari R.* Metod konechnykh elementov dlya radioinzhenerov i inzhenerov-elektrikov [Finite element method for radio engineers and electrical engineers]. Moscow: Mir, 1986, 229 p.
8. *Gallager R.* Metod konechnykh elementov. Osnovy [Finite element method. The basics: transl. from engl. МЩЫЩЩЩ: Mir, 1984, 428 p.
9. *Vatulian A.O., Kublikov V.L.* Boundary element method in electroelasticity, *Boundary Elem. Commun.*, 1995, Vol. 6, pp. 59-61.
10. *Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A.* ANSYS v rukakh inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo [ANSYS in the hands of an engineer. Practical guide]. Moscow: URSS, 2003, 269 p.
11. *Basov K.A.* ANSYS v primerakh i zadachakh [ANSYS in examples and problems], under the general ed. of Kraskovskogo D.G. Moscow: Komp'yuterPress, 2002, 224 p.
12. *Mit'ko V.N., Kramarov Yu.A., Panich A.A.* Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v p'ezoelektricheskom priborostroenii: monografiya [Mathematical modeling of physical processes in piezoelectric instrumentation: monograph]. Rostov-on-Don: YuFU, 2009, 168 p.
13. *Panich A.A., Marakhovskiy M.A., Motin D.V.* Kristallicheskie i keramicheskie p'ezoelektriki [Crystal and ceramic piezoelectrics], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2011, No. 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (dostup svobodnyy).
14. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613572 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki ZKeff (koeffitsient elektromekhanicheskoy svyazi) Hioki ZKeff v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613572 "hioki ZKeff measurement control and parameter calculation System (Electromechanical coupling coefficient) Hioki ZKeff V. 1.0" 06.05.2011].
15. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613567 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613567].
16. «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki V (reaktivnaya sostavlyayushchaya provodimosti p'ezoelementa) Hioki V v. 1.0» 06.05.2011 ["Hioki measurement control and parameter calculation system in (reactive component of piezoelectric element conductivity) Hioki in V. 1.0" 06.05.2011].
17. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613570 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki Y (polnaya provodimost' p'ezoelementa) Hioki Y v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613570 "hioki Y measurement control and parameter calculation System (full piezoelectric conductivity) Hioki Y V. 1.0" 06.05.2011].
18. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613569 «Sistema analiza dannykh i upravleniya izmereniyami Hioki Manager» «Hioki Manager v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613569 "Hioki Manager data analysis and measurement management System" "Hioki Manager V. 1.0" 06.05.2011].
19. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613568 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki G (aktivnaya sostavlyayushchaya provodimosti p'ezoelementa) Hioki G v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613568 "hioki G measurement control and parameter calculation System (active component of piezoelectric element conductivity) Hioki G V. 1.0" 06.05.2011].

20. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613571 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki ZC (polnoe soprotivlenie i emkost' p'ezoelementa) Hioki ZC v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613571 "hioki ZC measurement control and parameter calculation System (total resistance and piezoelectric element capacity) Hioki ZC V. 1.0" 06.05.2011].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.А. Строщев.

Алексунин Евгений Сергеевич – Научное конструкторско-технологическое бюро пьезоэлектрического приборостроения ЮФУ; e-mail: aleksunin@gmail.com; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10, оф. 406; тел.: +79289098093; инженер по информационной безопасности.

Aleksunin Evgeniy Sergeevich – Science design and technology bureau "Piezopribor" Southern Federal University; e-mail: aleksunin@gmail.com; 10, Mil`chakov street, of. 406, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79289098093; information security engineer.

УДК 621.311.24

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-16-29

А.С. Болдырев, А.Л. Веревкин, К.В. Пшихопова, Л.С. Веревкина
МЕТОДИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ
ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ
ПЛАТФОРМАМИ

Одним из актуальных направлений развития робототехники являются проектирование систем группового управления. В предложенной структуре группа из пяти роботизированных платформ (РП) управляется с носимого или стационарного пультов. Такой состав группы предопределяет схемы с перестраиваемыми связями между составными частями и изменением принципов функционирования. В статье приведены экспериментальные исследования вычислительной эффективности методов планирования траекторий РП в пространстве и определены оптимальный метод и требуемые параметры вычислителя РП. Рассмотрены варианты схем с разным числом РП и модели холодного резервирования РП, пультов и общего всей системы. При таком многообразии конфигураций возникают проблемы, обоснования и выбора методов расчета, и однозначного, обобщенного представления параметров надежности системы группового управления. Повышенные требования к надежности компонент системы группового управления, требуют точной оценки надежности и продиктованы значительной стоимостью оборудования и функциональным назначением. Разработанная методика предназначена для моделирования надежности разработанной системы группового управления роботизированными платформами РП. В предложенной методике показано использование структурного, вероятностного и матричного методов для расчета моделей надежности системы группового управления. А также предложен подход к моделированию надежности целочисленного, избыточного, скользящего, холодного резервирования РП и пультов управления. Полученные результаты численных расчетов параметров надежности системы группового управления, позволяют оценить риски и выбирать режимы, в зависимости от требуемой эффективности выполнения миссии.

Система группового управления; роботизированные платформы; наработка на отказ; надежность; резервирование; алгоритм; моделирование.

A.S. Boldyrev, A.L. Verevkin, K.V. Prihodova, L.S. Verevkin
METHODOLOGY AND RELIABILITY MODELING OF THE GROUP
CONTROL SYSTEM FOR ROBOTIC PLATFORMS

One of the most relevant areas of robotics development is the design of group control systems. In the proposed structure, a group of five robotic platforms (RP) is controlled from a wearable or stationary remote control. This composition of the group determines schemes

with tunable connections between the components and changes in the principles of operation. The article presents experimental studies of the computational efficiency of methods for planning RP trajectories in space and defines the optimal method and the required parameters of the RP computer. Variants of schemes with different numbers of RP are considered, as well as models of cold backup of RP, remote controls, and the entire system. With such a variety of configurations, problems arise in justifying and selecting calculation methods, and in providing an unambiguous, generalized representation of the reliability parameters of a group control system. Increased requirements for the reliability of components of the group management system require an accurate assessment of reliability and are dictated by the significant cost of equipment and functional purpose. The developed method is intended for modeling the reliability of the developed system of group control of robotic platforms RP. The proposed method shows the use of structural, probabilistic and matrix methods for calculating reliability models of a group control system. An approach to modeling the reliability of integer, redundant, sliding, and cold redundancy of RP and control panels is also proposed. The results of numerical calculations of the reliability parameters of the group management system allow us to assess the risks and choose modes, depending on the required efficiency of the mission.

Group control system, robotic platforms, time to failure, reliability, resetting, algorithm, modeling.

Введение. Одним из актуальных направлений развития робототехники являются системы группового управления, так в работах [1–4] исследуются возможности и задачи, которые эффективно решаются группой роботизированных устройств. В статье [5] решается задача движения группы роботов строем с обходом препятствий в заданный район. В статье [6] решается задача группового преследования уклоняющихся объектов. Роботы охотники должны распознать членов своей группы и совместно спланировать траектории для эффективной поимки стационарных или подвижных объектов.

1. Постановка задачи. В статье предлагается следующий подход к исследованию системы группового управления, с позиций выбора метода управления, требуемых вычислительных возможностей и повышения надежности и ставятся задачи:

- ◆ разработать гибкую расчлененную структурную схему;
- ◆ экспериментально определить требуемую вычислительную мощность бортового вычислителя РП и выбрать метод планирования движения;
- ◆ определить возможность реализации системы;
- ◆ провести анализ на соответствие требований ЕСКД, определить номенклатуру задаваемых параметров надежности и их достаточность;
- ◆ разработать методику моделирования надежности с учетом, гибкости многовариантной структуры системы и возможности резервирования структурных частей;
- ◆ выполнить численное моделирование надежности, как системы группового управления, так и составных частей.

Такой подход позволяет еще на стадии проектирования, обеспечить эффективность выполнения миссии и определиться с рисками.

2. Структура системы группового управления. В числе приоритетных направлений проектирования робототехники является надежность систем, в том числе и группового управления робототехническими платформами. Общий вид РП и задание группе РП на экране монитора, приводятся на рис. 1.



Рис. 1. Робототехническая платформа и задание группе РП на экране монитора

Система группового управления обеспечивает:

- ♦ дистанционное управление движением со стационарного пульта управления (СПУ) или носимого пульта управления (НПУ), а число РП может варьироваться от 1 до 5штук;

- ♦ управление может быть в режиме он лайн, или в виде заданного задания для всей группы или для каждой РП в отдельности.

Основные принципы формирования структуры системы группового управления, изложенные в литературе [7, 8]. Структурная схема системы группового управления РП представлена на рис. 2. Структура относится к расчлененной системе потому, что оборудование находится не на одном объекте.

Предложенная схема может работать в различных режимах и позволяет широко использовать изменение принципов функционирования схемы и структуры за счет ее большой гибкости.

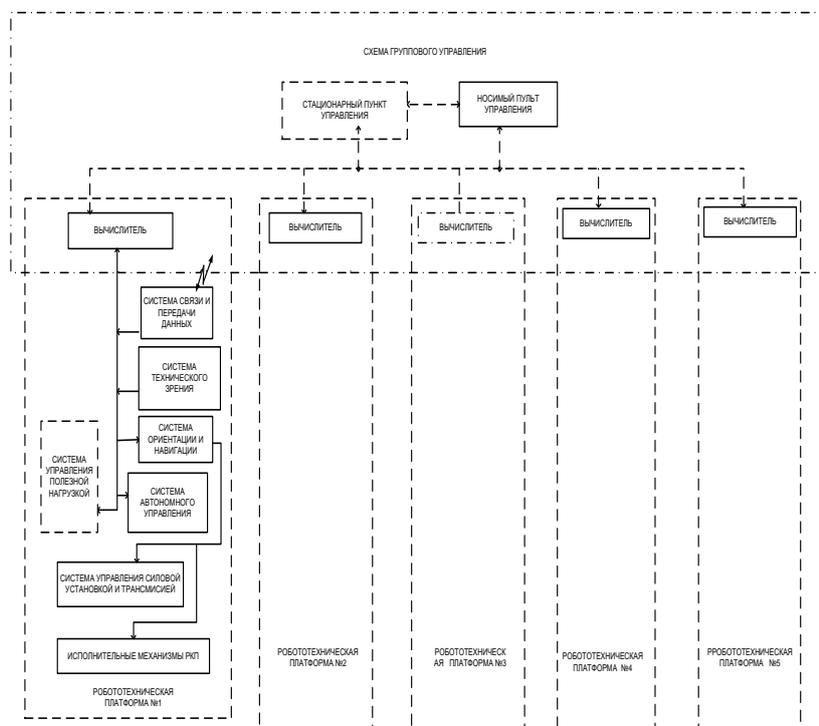


Рис. 2. Структурная схема системы группового управления РП

Роботизированная платформа в составе, которой должно быть оборудование:

- ◆ система ориентации и навигации СОН;
- ◆ система технического зрения СТЗ;
- ◆ система связи и передачи данных СПД;
- ◆ система управления полезной нагрузкой;
- ◆ системы автономного управления РТП;
- ◆ система управления силовой установкой и трансмиссией.

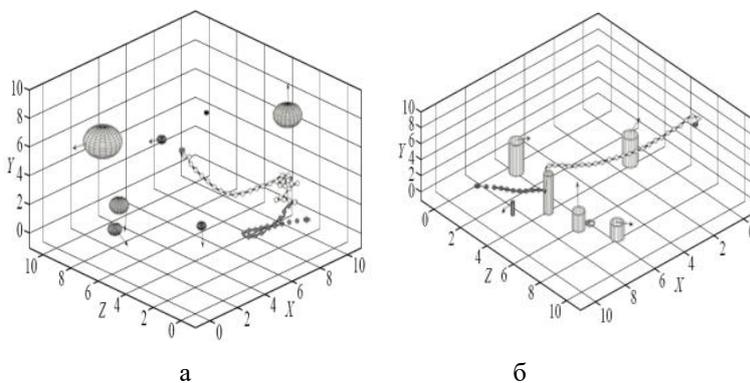
Каждая робототехническая платформа комплектуем бортовым вычислителем являющейся составной частью системы группового управления. Бортовой вычислитель позволяет перераспределить вычислительные ресурсы между ним и пультом управления.

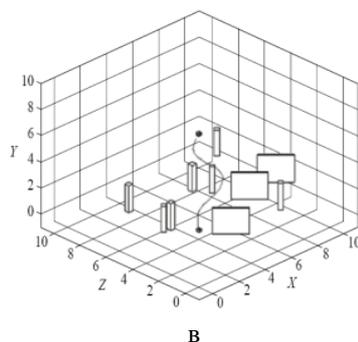
3. Экспериментальные исследования требуемой вычислительной мощности бортового вычислителя РП. В настоящее время наблюдается бурное развитие теории и методов группового функционирования роботизированных устройств. При проектировании таких систем предъявляются большие требования к вычислительным возможностям оборудования [9]. Как показано в работах [10-12] в условиях неопределенности, при применении нелинейных моделей синтез закона терминального управления становится очень сложной задачей. А для расчета оптимального пути и обхода препятствий РП, в работах [13-15] используется позиционное-траекторное управление и метод потенциальных полей. Проведены экспериментальные исследования с минимально возможной аппаратной конфигурацией бортового вычислителя, способной удовлетворить требованиям быстродействия программного обеспечения РП.

Для эксперимента выбраны методы [16], решающие задачи планирования траекторий перемещения одиночных РП в среде (пример рис. 2), с нестационарными препятствиями:

- ◆ метод виртуальных полей;
- ◆ метод на базе неустойчивых режимов;
- ◆ метод на базе неустойчивых режимов с интеллектуальным модулем;
- ◆ гибридные: VFC-метод, VVF-метод, и VFFL-метод;
- ◆ гибридный нейросетевой метод DVH3D-NN;
- ◆ базовый нейросетевой метод DVH3D;
- ◆ бионический метод интеллектуального планирования на базе нейроподобных структур.

Каждый из представленных методов оценивался объемом проводимых вычислений в единицу времени для решения задач планирования траекторий одиночных РП. Примеры конфигурации сред приведены на рис. 3:





В

Рис. 3. Примеры конфигурации сред а - VFC метода; б - VVF метода; в - DVH3D-NN метода

Полученные результаты экспериментального сравнения, характеризующего количество проведенных операций планирования траекторий за единицу времени 0,1 сек, представлены на диаграмме рис. 3.

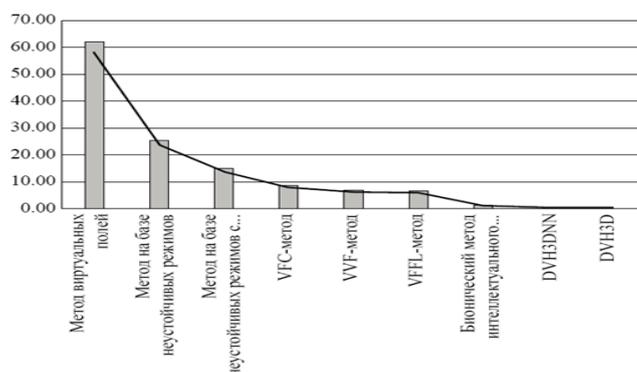


Рис. 4. Диаграмма количества проведенных операций планирования траекторий за 0,1 сек различными методами

Как показано на диаграмме, наибольшей вычислительной эффективностью обладает метод виртуальных полей.

Для управления РП выбран метод виртуальных полей. Экспертным путем определены необходимые вычисления и количество математических операций, выполняемых системой группового управления, что позволяет определиться, с мощностью применяемой ЭВМ и требуемыми характеристиками приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики бортового вычислителя системы группового управления

Характеристика	Значение
Платформа	Intel
Процессор	Intel(R) Core(TM) i7-7700
Число процессоров	1 (8 ядер)
Тактовая частота	3600 GHz
Оперативная память	32 Gb
Свободное дисковое пространство	200 Gb
Тип жесткого диска	SSD

Характеристикам табл. 1 удовлетворяет промышленная безвентиляторная встраиваемая малогабаритная ЭВМ Vecow ECS-9280.

4. Методика моделирования надежности системы. Систему группового управления расчленяется на отдельные на части так, чтобы для каждой можно определить показатели надежности, из этих частей конфигурируются структурные схемы - модели надежности системы.

Схема, расчлененной системы группового управления позволяет реализовать разные способы резервирования: холодное или горячее (целочисленное; скользящее; избыточное); мажоритарное резервирование.

Так как в составе системы группового управления есть два пульта управления и РП от одной до пяти, необходимо рассчитать показатели надежности для разных вариантов резервирования приведены в табл. 2, и обозначено О – основной, Р – резервный.

Таблица 2

Способы холодного резервирования РП

Резервирование	Структурная часть				
	РП	РП	РП	РП	РП
1. Структурное раздельное	РП	РП	РП	РП	РП
Целочисленное РП	О	Р	О	Р	-
	О	О	Р	Р	-
Скользящее РП	О	О	Р	-	-
	О	О	О	Р	
	О	О	О	Р	Р
	О	О	О	О	Р
Избыточное РП	О	Р	Р	-	-
	О	Р	Р	Р	-
	О	Р	Р	Р	Р
	О	О	Р	Р	Р
2. Общее всей системы	О	Р	-	-	-
	О	О	р	Р	-
	р	Р	О	О	О

При таком многообразии вариантов моделей схем резервирования, как РП, так и пультов управления СПУ и НПУ, а так же возможности общего резервирования системы, возникают проблемы выбора методов расчета, и однозначного, обобщенного представления параметров надежности системы группового управления, которые решаются в данной статье.

Для моделирования надежности принимаем следующие допущения и предлагается следующая методика расчета.

1) РП равно надежны и полагаем, что вероятность отказа каждой РП и пультов носит экспоненциальный характер:

$$P(t) = e^{-\lambda t}.$$

2) Строится структурная схема расчета надежности и классическим структурным методом для расчленённой сложной системы, элементы объединяются в группы $S1 \dots SN$:

- ◆ в группе $S1$ элементы стационарного пульта управления;
- ◆ в группе $S2$ элементы носимого пульта управления;
- ◆ в группе $SP11 \dots SP15$ элементы РП.

Любая группа элементов может быть, как в отключённом, так и в рабочем состоянии.

3) Для каждой группы $S1 \dots SN$ рассчитывается классическим структурным методом интенсивность отказов λ_{SN} , наработка на отказ T_{SN} и графики вероятности безотказной работы $P_{SN}(t)$ [17]:

$$\lambda_{SN} = \sum_{i=1}^n n_i \lambda_i, \quad T_{SN} = 1/\lambda_{SN}, \quad P(t) = e^{-\lambda t},$$

где n – число элементов в группе;

λ_i – интенсивность отказов элемента, с учетом режимов работы и условий эксплуатации;

SN – обозначение группы.

4) Далее для каждого варианта компоновки системы группового управления, матричным методом, рассчитывается матрица интенсивности отказов Λ_N и наработка на отказ T_N в ПО Mathcad.

$$\Lambda_N = \begin{pmatrix} \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & \lambda_{РП4} & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & \lambda_{РП4} & \lambda_{РП5} \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & \lambda_{РП4} & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & \lambda_{РП4} & \lambda_{РП5} \end{pmatrix} * 1 \quad \text{и} \quad T_N = [\Lambda_N]^{-1}$$

где $\lambda_{S1} \dots \lambda_{S2}$ – интенсивность отказов СПУ и НПУ;

$\lambda_{РП1} \dots \lambda_{РП5}$ – интенсивность отказов РП1... РП5.

Каждая строка матрицы соответствует определенной конфигурации системы группового управления с различным числом N от 1 до 5 рабочих РП.

Графики вероятности безотказной работы $P_N(t)$ для каждого количества работающих РП от 1 до 5 рассчитывают в ПО Mathcad по формуле

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T_0}},$$

5) При холодном целочисленном резервировании РП, схемы: $N=1+1$; $2+2$ и избыточном резервировании схемы: $N=1+2$; $1+3$; $1+4$; $2+3$ определяют наработку на отказ T_{NS} по формуле, полученной вероятностным методом [18]:

$$T_{NS} = n * T_{S1},$$

где n – всего РП, основных и резервируемых в схеме.

Интенсивность отказов РП при холодном целочисленном и избыточном их резервировании рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{NS} = 1/T_{NS}.$$

6) При скользящем холодном резервировании T_{NS} , резервных РП меньше числа основных, и они находятся в выключенном состоянии. Резервная РП, может быть включена взамен любой из отказавших РП. Для схем резервирования $N=3+1$;

2+1; 4+1; 3+2; интенсивность отказов равна $n\lambda_{SI}$ и отказ системы произойдет в момент отказа $(m+1)$ -го РП, поэтому средняя наработка на отказ РП, полученная вероятностным методом, определяется по формуле [19]:

$$T_{NS} = (m+1) / n\lambda_{SI},$$

где T_{NS} – наработка на отказ всех РП при скользящем холодном резервировании; λ_{SI} – интенсивность отказов одной РП; n – основных РП; m – резервных РП.

Интенсивность отказов всех РП при скользящем холодном резервировании рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{NS} = I / T_{NS}.$$

7) Интенсивность отказов $\lambda_{N.X}$ системы в целом, при холодном резервировании, определяется как сумма интенсивности отказов пульта управления λ_{SI} , (λ_{S2}), который находится в рабочем состоянии, и интенсивности отказов РП:

$\lambda_{N.X} = \lambda_{SI} + \lambda_{SN.IX}$ для схем $N=1+1$; 2+2 холодного целочисленного резервирования;

$\lambda_{N.X} = \lambda_{SI} + \lambda_{SN.IX}$ для схем $N=1+2$; 1+3; 2+3 холодного избыточного резервирования;

$\lambda_{N.X} = \lambda_{SI} + \lambda_{SN.CX}$ схемы $N=3+1$; 2+1; 4+1; 3+2 холодного скользящего резервирования.

Аналогично эта задача решается в цикле и для носимого пульта управления.

8) Средняя наработка на отказ пультов управления с холодным резервированием с различными интенсивностями отказов определена вероятностным методом:

$$\lambda_{S1+S2} = \frac{\lambda_{S1} + \lambda_{S2}}{\lambda_{S1} * \lambda_{S2}}.$$

9) Нарботка на отказ при холодном общем резервировании всей системы группового управления рассчитывается для каждой схемы резервирования РП по формуле:

$$T_{N.X} = I / \lambda_{N.X}.$$

5. Численное моделирование надежности системы с разным числом РП без резервирования. Исходными данными для моделирования надежности системы группового управления является наработка на отказ структурных элементов и интенсивность отказов, приведенные в базе данных [20].

Для расчета надежности системы группового управления разработаны модели схем надежности системы группового управления без резервирования приведенные на рис. 3, число РП может быть от 1 до 5, пульт управления СПУ или НПУ.

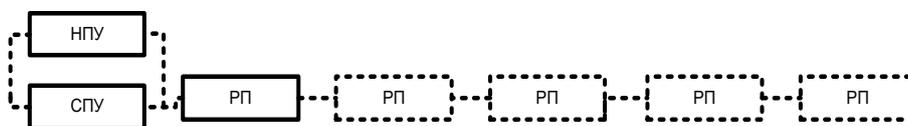


Рис. 5. Модели надежности системы с разным числом РП

Используя формулы и приведенную методику в ПП «Mathcad» на ЭВМ выполнен расчет надежности системы группового управления. Результаты численных расчетов интенсивности отказов и наработки на отказ системы группового управления при работе с различным числом от 1 до 5 РП, без резервирования, представлены матрицами столбцами:

$$\Lambda_R = \begin{pmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \\ \Lambda_3 \\ \Lambda_4 \\ \Lambda_5 \\ \Lambda_{1Н} \\ \Lambda_{2Н} \\ \Lambda_{3Н} \\ \Lambda_{4Н} \\ \Lambda_{5Н} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 146,52 \cdot 10^{-6} \\ 151,05 \cdot 10^{-6} \\ 155,6 \cdot 10^{-6} \\ 160,14 \cdot 10^{-6} \\ 164,68 \cdot 10^{-6} \\ 156,61 \cdot 10^{-6} \\ 161,15 \cdot 10^{-6} \\ 165,69 \cdot 10^{-6} \\ 170,23 \cdot 10^{-6} \\ 174,77 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix} \text{ 1/ч и } T_R = \begin{pmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \\ \Lambda_3 \\ \Lambda_4 \\ \Lambda_5 \\ \Lambda_{1Н} \\ \Lambda_{2Н} \\ \Lambda_{3Н} \\ \Lambda_{4Н} \\ \Lambda_{5Н} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_{1Н} \\ T_{2Н} \\ T_{3Н} \\ T_{4Н} \\ T_{5Н} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6\ 825,0 \\ 6\ 620,3 \\ 6\ 426,7 \\ 6\ 244,5 \\ 6\ 072,0 \\ 6\ 385,3 \\ 6\ 205,0 \\ 6\ 035,4 \\ 5\ 874,0 \\ 5\ 721,8 \end{pmatrix} \text{ (час).}$$

Графики вероятности безотказной работы системы группового управления, с числом от одной до пяти РП, без резервирования, показаны на рис. 3.

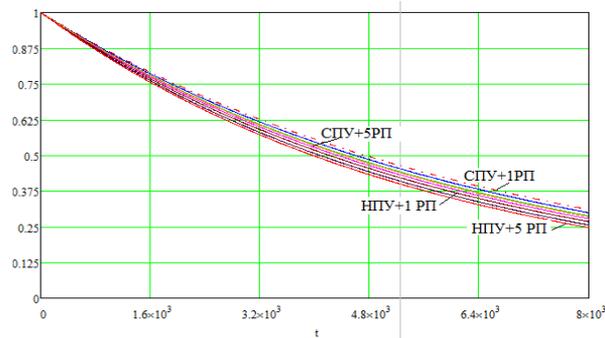
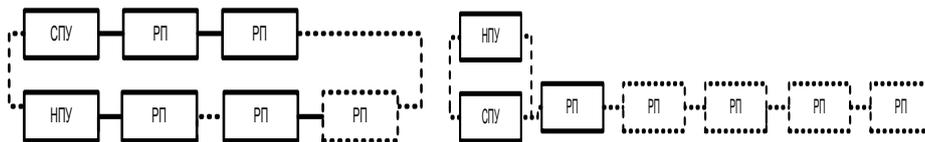
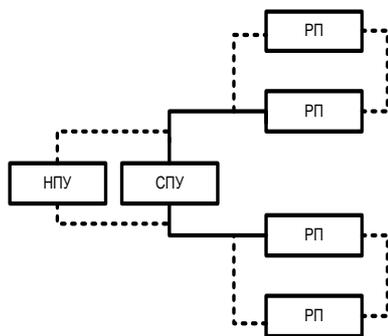


Рис. 7. Графики вероятности безотказной работы системы с РП в количестве от 1 до 5 без резервирования

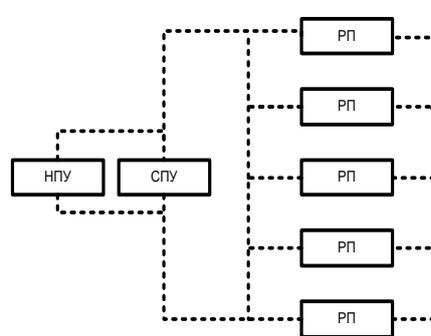
6. Численное моделирование надежности системы с холодным (ненагруженным) резервированием. Модели схем целочисленного, избыточного, скользящего резервирования структурных частей и в целом системы представлены на рис. 5.



а – модели общего и раздельного резервирования



б – целочисленное N=2+2



в – избыточное N=2+3

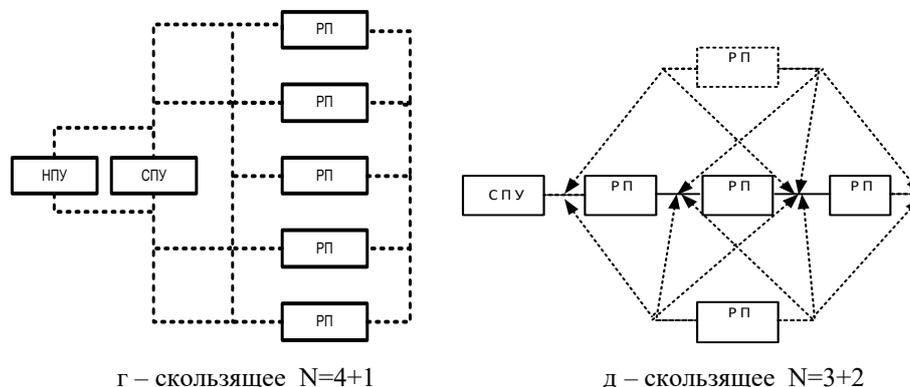


Рис. 6. Модели надежности холодного резервирования РП и пультов

Результаты моделирования интенсивности отказов и времени наработки на отказ системы группового управления со стационарным или носимым пультом управлением и разным числом РП от одной до пяти в миссии с холодным резервированием приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Результаты моделирования надежности системы группового управления без резервирования

Параметр	Число РП				
	1	2	3	4	5
Интенсивность отказов РП, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	4,54	9,07	13,62	18,16	22,7
Интенсивность отказов СПУ, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	141,98				
Интенсивность отказов РП+СПУ, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	146,52	151,05	155,6	160,14	164,68
Наработка на отказ РП+СПУ, час	6 825	6620,32	6 426,74	6 244,54	6 072,38
Интенсивность отказов НПУ, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	152,07				
Интенсивность отказов РП+НПУ, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	156,61	161,15	165,69	170,23	174,77
Наработка на отказ РП+ НПУ, Т, час	6 385,3	6205,4	6035,4	5874,4	5721,8

Среднее время безотказной работы стационарного пульта управления $T_{СПУ} = 7043,25$ час, а носимого пульта управления $T_{НПУ} = 6 570$ час. Носимый пульт управления может работать без подзарядки 13 часов, после чего требуется 3 часа зарядки.

Результаты моделирования надежности при холодном целочисленном, избыточном, скользящем резервировании РП, для n основных и m резервных РП, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Наработка на отказ при холодном резервировании РП

Параметр	Целочисленное		Избыточное РП			Скольльзящее РП		
	1+1	2+2 1+3	1+2	1+4 2+3	1+3	2+1 3+2	3+1	4+1
Наработка на отказ, час*10 ³	441	882	662	1 103	882	220	147	110

Графики наработки на отказ, при холодном целочисленном, избыточном, скользящем резервировании РП, для n основных и m резервных РП, показаны на рис. 7.

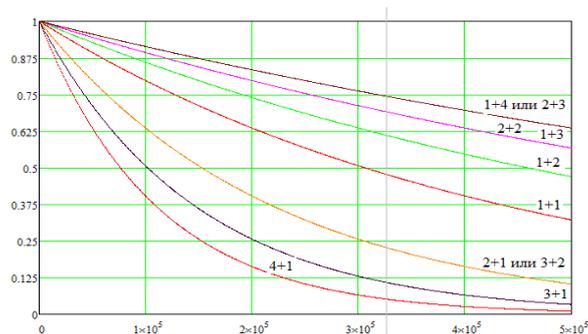


Рис. 7. Графики вероятности безотказной при холодном резервировании РП

Результаты численного моделирования надежности системы группового управления при холодном общем резервировании системы, при котором РП разделены на две группы, одна управляется с СНП, а другая с НПУ (схема рис. 6,а) представлены в табл. 5.

Таблица 5

Наработка на отказ, группы основной СПУ+РП и резервной НПУ+РП холодного общего резервирования системы

Параметр	Сема общего холодного резервирования			
	(СПУ+1РПУ)/ (НПУ+1РПУ)	(СПУ+2РПУ)/ (НПУ+2РПУ)	(СПУ+3РПУ)/ (НПУ+2РПУ)	(СПУ+2РПУ)/ (НПУ+3РПУ)
Наработка на отказ, час	13 210,3	12 825,7	12 655,7	12 632,1

Заключение. Разработанная схема системы группового управления обеспечивает высокие параметры надежности в различных режимах и позволяет широко использовать: изменение принципов функционирования; изменение структуры за счет ее большой гибкости. Экспериментально определен метод управления и параметры вычислителя РП.

Предложенная методика комбинирования вероятностного, классического структурного и матричного методов расчета параметров надежности расчлененной структуры, позволяет наглядно и однозначно определять параметры надежность системы группового управления. Подтверждена возможность двукратного повышения надежности системы группового управления посредством холодного резервирования и показано, что наработка на отказ существенно зависит от конфигурации системы и ее миссии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / под ред. В.И. Сырямкина. – Томск: STT, 2018. – 140 с.
2. *Bayindir L.* A review of swarm robotics tasks // *Neurocomputing*. – 2016. – Vol. 292. – P. 292-321.
3. *Francesca G., Birattari M.* Automatic design of robot swarms: Achievements and challenges // *Frontiers Robotics AI*. – 2016. – Vol. 3 (1).
4. *Rizk Y., Awad M., Tunstel, E.W.* Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey // *ACM Computing Surveys Volume*. – 2019. – Vol. 52 (2).
5. *Yu J., Ji J., Miao Z., Zhou J.* Neural network-based region reaching formation control for multi-robot systems in obstacle environment // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 333. – P. 11-21.
6. *Agrawal P., Agrawal H.* Adaptive algorithm design for cooperative hunting in multi-robots // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. – 2018. – Vol. 10 (12). – P. 47-55.
7. *Каляев И.А., Гайдук А.П., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физмат, 2009.
8. *Зенкевич С.Л.* Принципы построения систем управления роботами // *Робототехнические системы и автоматическое управление: Межвуз. сб. научн. тр.* – М.: МИРЗА, 1985.
9. *Ivanov D.Ya.* Distribution of roles in groups of robots with limited communications based on the swarm interaction // *Procedia Comput. Sci.* – 2019. – Vol. 150. – P. 518-523.
10. *Yiguang Hong, Guowu Yang, Daizhan Cheng, Sarah Spurgeon.* A New Approach To Terminal Sliding Mode Control Design // *Asian Journal of Control*. – June 2005. – Vol. 7, Issue 2. – P. 177-181.
11. *Wang Shikai, Jin Hongzhang, Meng Lingwei.* Trajectory tracking for underactuated UUV using terminal sliding mode control 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – 2016. – P. 6833-6837. – DOI: 10.1109/CCDC.2016.7532229.
12. *Pshikhopov V.K., Fedotov A.A., Medvedev M.Yu., Medvedeva T.N., Gurenko B.V.* Position-trajectory system of direct adaptive control marine autonomous vehicles. Authors of Document 2014 the 4th International Workshop on Computer Science and Engineering - Summer, WCSE 2014.
13. *Pshikhopov V.* Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments // eBook ISBN: 9780128123065, Paperback ISBN: 9780128123058, Imprint: Butterworth-Heinemann, 1st February 2017. – 312 p.
14. *Soloviev V.V., Pshikhopov V.K., Shapovalov I.O., Finaev V.I., Beloglazov D.A.* Planning of the mobile robot motion in non-deterministic environments with potential fields method // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 21 Number 2015. – Vol. 10. – P. 41954-41961. – ISSN 0973-4562.
15. *Denis Belogalov, Valeriy Finaev, Mikhail Medvedev, Igor Shapovalov, Victor Soloviev.* Decentralized Control of a Group of Robots Using Fuzzy Logic // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – No. 12 (9). – P. 2492-2498.
16. *Казakov К.А., Семенов В.А.* Обзор современных методов планирования движения // *Тр. ИСП РАН*. – 2016. – Т. 28. – Вып. 4. – С. 241-294.
17. *Вережкина Л.С., Алпатова О.В., Вережкин А.Л.* Стадии разработки и уровни расчета надежности // *Всемирный технологический университет ЮНЕСКО. Московский технологический институт: Матер. международного форума*. – Вып. 2. «Человек в современном мире». – Ростов-на-Дону: Гинго, 2014. – С. 308-312.
18. https://studopedia.ru/14_58030_raschet-nadezhnosti-sistem-rezervirovaniem.html.
19. http://libraryno.ru/5-raschet-harakteristik-nadezhnosti-nevosstanavlivaemyh-rezervirovannyh-izdeliy-teor_nadejnosti/:
20. *Болдырев А.С., Вережкина Л.С., Вережкин А.Л.* Надежность компонентов многофункциональных, робототехнических и автоматизированных систем. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019621637 от 09.09.2019.

REFERENCES

1. Kollektivny intellektual'nykh robotov. Sfery primeneniya [Teams of intelligent robots. Scope of application], by ed. V.I. Syryamkina. Tomsk: STT, 2018, 140 p.
2. *Bayindir L.* A review of swarm robotics tasks, *Neurocomputing*, 2016, Vol. 292, pp. 292-321.
3. *Francesca G., Birattari M.* Automatic design of robot swarms: Achievements and challenges, *Frontiers Robotics AI*, 2016, Vol. 3 (1).
4. *Rizk Y., Awad M., Tunstel, E.W.* Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey, *ACM Computing Surveys Volume*, 2019, Vol. 52 (2).

5. Yu J., Ji J., Miao Z., Zhou J. Neural network-based region reaching formation control for multi-robot systems in obstacle environment, *Neurocomputing*, 2019, Vol. 333, pp. 11-21.
6. Agrawal P., Agrawal H. Adaptive algorithm design for cooperative hunting in multi-robots, *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2018, Vol. 10 (12), pp. 47-55.
7. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective management in robot groups]. Moscow: Fizmat, 2009.
8. Zenkevich S.L. Printsipy postroeniya sistem upravleniya robotami [Principles of building robot control systems], *Robototekhnicheskie sistemy i avtomaticheskoe upravlenie: Mezhdvuz. sb. nauchn. tr.* [Robotic systems and automatic control: Intercollegiate collection of scientific papers]. Moscow: MIRZA, 1985.
9. Ivanov D.Ya. Distribution of roles in groups of robots with limited communications based on the swarm interaction, *Procedia Comput. Sci.*, 2019, Vol. 150, pp. 518-523.
10. Yiguang Hong, Guowu Yang, Daizhan Cheng, Sarah Spurgeon. A New Approach To Terminal Sliding Mode Control Design, *Asian Journal of Control*, June 2005, Vol. 7, Issue 2, pp. 177-181.
11. Wang Shikai, Jin Hongzhang, Meng Lingwei. Trajectory tracking for underactuated UUV using terminal sliding mode control 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2016, pp. 6833-6837. DOI: 10.1109/CCDC.2016.7532229.
12. Pshikhopov V.K., Fedotov A.A., Medvedev M.Yu., Medvedeva T.N., Gurenko B.V. Position-trajectory system of direct adaptive control marine autonomous vehicles. Authors of Document 2014 the 4th International Workshop on Computer Science and Engineering - Summer, WCSE 2014.
13. Pshikhopov V. Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments, eBook ISBN: 9780128123065, Paperback ISBN: 9780128123058, Imprint: Butterworth-Heinemann, 1st February 2017, 312 p.
14. Soloviev V.V., Pshikhopov V.K., Shapovalov I.O., Finaev V.I., Beloglazov D.A. Planning of the mobile robot motion in non-deterministic environments with potential fields method, *International Journal of Applied Engineering Research*, 21 Number 2015, Vol. 10, pp. 41954-41961. ISSN 0973-4562.
15. Denis Belogalov, Valeriy Finaev, Mikhail Medvedev, Igor Shapovalov, Victor Soloviev. Decentralized Control of a Group of Robots Using Fuzzy Logic, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, No. 12 (9), pp. 2492-2498.
16. Kazakov K.A., Semenov V.A. Obzor sovremennykh metodov planirovaniya dvizheniya [Review of modern traffic planning methods], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2016, Vol. 28, Issue 4, pp. 241-294.
17. Verevkin A.L., Alpatova O.V., Verevkin A.L. Stadii razrabotki i urovni rascheta nadezhnosti [Stages of development and levels of reliability calculation], *Vsemirnyy tekhnologicheskii universitet YuNESKO. Moskovskiy tekhnologicheskii institut: Mater. mezhdunarodnogo foruma* [UNESCO world University of technology. Moscow Institute of technology. Materials of the international forum]. Vyp. 2. «Chelovek v sovremennom mire» [Issue 2. "Man in the modern world"]. Rostov-on-Don: Gingo, 2014, pp. 308-312.
18. Available at: https://studopedia.ru/14_58030_raschet-nadezhnosti-sistem-rezervirovaniem.html.
19. Available at: http://libraryno.ru/5-raschet-harakteristik-nadezhnosti-nevosstanavlivaemyh-rezervirovannyh-izdeliy-teor_nadezhnosti/.
20. Boldyrev A.S., Verevkin A.L., Verevkin A.L. Nadezhnost' komponentov mnogofunktsional'nykh, robototekhnicheskikh i avtomatizirovannykh sistem. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh №2019621637 ot 09.09.2019 [Reliability of components of multifunctional, robotic and automated systems. Certificate of state registration of the database no. 2019621637 dated 09.09.2019].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.И. Матвеев.

Болдырев Антон Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: boldyrev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел. +78634371634; Институт радиотехнических систем и управления; к.т.н.; директор.

Веревкин Александр Леонидович – e-mail: verevkin.a@mail.ru; кафедра летательные аппараты; аспирант.

Пшихопова Карина Вячеславовна – e-mail: pshihopova@yandex.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко 2; тел. +78634371694; НИИ Робототехники и процессов управления; инженер.

Веревкина Лина Станиславовна – e-mail: lverevkina@sfnedu.ru; тел.: +78634371694; кафедра электротехники и механики; к.т.н.; доцент.

Boldyrev Anton Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: boldyrev@sfnedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; Institute of Radio Engineering Systems and Control; cand. tng. sc.; director.

Verevkin Alexander Leonidovich – e-mail: verevkin.a@mail.ru; the department of aircraft; graduate student.

Pshikhopova Karina Vyacheslavovna – e-mail: pshihopova@yandex.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371694; Research Institute of Robotics and Control Processes; engineer.

Verevkina Lina Stanislavovna – e-mail: lverevkina@sfnedu.ru; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; cand/ uf eng. sc.; associate professor.

УДК 629.735.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-29-39

О.Ю. Воронков

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ»

Работа посвящена синергетическому синтезу асимптотического наблюдателя гармонических возмущений для иерархической системы управления летательным аппаратом. Статья содержит общее описание вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» и асимптотического наблюдателя внешних возмущающих воздействий (например, ветровых), изменяющихся по гармоническому закону и приводящих к периодическим изменениям высоты полёта, а также углов тангажа и крена. Асимптотический наблюдатель должен обеспечить асимптотическую устойчивость замкнутой системы, выполнение технологических инвариантов, оценку ненаблюдаемых внешних воздействий по текущим значениям наблюдаемых координат состояния и поглощение гармонических ветровых возмущений. Также в статье приведена расширенная математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения в условиях внешних гармонических возмущающих воздействий, включающая математическое описание динамики возмущений, и на основе заданных технологических инвариантов синтезированы алгоритмы управления верхнего уровня иерархии. Кроме этого, проведён расчёт уравнений асимптотического наблюдателя возмущающих воздействий, которыми дополняется математическая модель «летающей платформы» в условиях возмущённого движения, и уравнений для асимптотических оценок ненаблюдаемых переменных, в дальнейшем включаемых в законы управления верхнего уровня иерархии. Возможность синтеза наблюдателя возмущений проверена с помощью критерия наблюдаемости. Наконец, показаны результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики верхнего и нижнего уровней иерархии в условиях возмущённого движения с подавлением внешних возмущений асимптотическим наблюдателем, а также результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики аппарата в условиях возмущённого движения без асимптотического наблюдателя для возможности наглядной оценки качества работы наблюдателя путём сравнения. Актуальность работы состоит в необходимости создания вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» для повышения эффективности спасения людей из зон бедствий, где вертолёты и другие современные средства не справляются с задачами. Научная новизна работы заключается в применении синергетических подходов к разработке системы балансировки пространственного положения аппарата, оснащённой асимптотическим наблюдателем для подавления возмущающих воздействий.

«Летающая платформа»; вентилятор в кольце; синергетическая теория управления; гармонические возмущения; асимптотический наблюдатель.

O.Yu. Voronkov

SYNERGETIC SYNTHESIS OF A DISTURBANCE OBSERVER FOR THE “FLYING PLATFORM” CONTROL SYSTEM

The work is devoted to the synergetic synthesis of the harmonic disturbance asymptotic observer for the aircraft hierarchical control system. The paper contains the general description of “flying platform” type vertical take-off & landing aircraft & an asymptotic observer of external disturbing influences (for example, wind) that have a harmonic dynamics & cause periodic changes in flight height, as well as in pitch & roll angles. An asymptotic observer must ensure the asymptotic stability of a reserved system, the implementation of technological invariants, the estimation of unobservable external influences from the current values of the observed state-space variables, & the absorption of harmonic wind disturbances. The article also presents an extended mathematical model of the “flying platform” in the vertical movement mode under external harmonic disturbing influences, including a mathematical description of the disturbance dynamics, & the upper hierarchy level control algorithms based on the given technological invariants are synthesized. In addition, the equations of the disturbing influences asymptotic observer are calculated, which supplement the mathematical model of the “flying platform” under disturbed motion, & the equations for asymptotic estimates of unobserved variables are calculated, which are further included in the upper hierarchy level control laws. The possibility of the disturbance observer synthesis was verified using the observability criterion. Finally, the results of computer simulation of the upper & the lower hierarchy levels’ nonlinear dynamics under disturbed motion with suppression of external disturbances by an asymptotic observer are shown, as well as the results of computer simulation of the vehicle’s nonlinear dynamics under disturbed motion without an asymptotic observer to allow a visual assessment of the observer’s performance by comparison. The relevance of the work consists in the necessity of “flying platform” type vertical take-off & landing aircraft creation to increase the effectiveness of people rescue operations in those disaster areas where helicopters & other modern means don’t cope with a task. The scientific novelty of the work consists in synergetic approach application to the design of the vehicle’s spatial position system equipped with an asymptotic observer to suppress disturbing influences.

“Flying platform”; fan in the ring; synergetic control theory; harmonic disturbance; asymptotic observer.

Введение. В данной работе рассматривается летательный аппарат, описанный ранее в материалах [1–4] и относящийся к типу «летающая платформа». Этот тип представляет собой вертикально взлетающий аппарат [5], оснащённый подъёмными вентиляторами, которые обычно помещены в аэродинамические кольца, предназначенные для создания дополнительной тяги и для защиты вентиляторов от механических воздействий [6].

Предлагаемая «летающая платформа» содержит фюзеляж в виде аэродинамического крыла малого удлинения, обеспечивающего небольшую подъёмную силу на высоких скоростях (до 150 км/ч) в дополнение к основной тяге вентиляторов. Внутри фюзеляжа расположено четыре электрических двигателя с вентиляторами (два передних и два задних), получающих энергию от турбогенераторной установки. Продольное управление аппаратом осуществляется путём дифференциального изменения тяги пары передних и пары задних вентиляторов, а поперечное управление аппаратом осуществляется путём дифференциального изменения тяги пары правых и пары левых вентиляторов. Система автоматического управления представляет собой автопилот [7–13] для балансировки пространственного положения аппарата. Эта система основана на принципах синергетической теории, развиваемой на Кафедре синергетики и процессов управления Южного федерального университета под руководством проф. А.А. Колесникова [14–17].

Описание наблюдателя возмущений для «летающей платформы». В работах [2, 4] был выполнен синергетический синтез иерархической [18] системы балансировки пространственного положения «летающей платформы» с учётом наблюдаемости всех координат состояния и отсутствия внешних воздействий. В действительных условиях математическая модель верхнего уровня иерархии (математическая модель «летающей платформы») неизбежно подвергается влиянию возмущений, например, ветровых, переменные состояния которых являются неизмеряемыми.

Следовательно, возникает необходимость в построении асимптотического наблюдателя [3], функцией которого является оценка координат возмущений по текущим значениям измеряемых переменных в динамической модели объекта. В ходе применения метода АКАР внешние возмущения погружаются в общую структуру системы и в дальнейшем рассматриваются как координаты состояния объекта. В связи с этим не возникает никакой разницы между процедурами построения асимптотических наблюдателей координат состояния и внешних возмущений [16].

Для того чтобы оказалась возможной процедура учёта и компенсации внешних возмущающих воздействий, требуется дополнить математическую модель «летающей платформы», находящуюся на верхнем уровне иерархии, моделями гармонических ветровых возмущений, приводящих к периодическим изменениям высоты полёта, а также углов тангажа и крена. Асимптотический наблюдатель гармонических возмущающих воздействий синтезируется в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{y}}(t) &= \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \\ \hat{\mathbf{z}}(t) &= \mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}).\end{aligned}\quad (1)$$

В системе (1) \mathbf{y} – вектор состояния наблюдателя (первое уравнение), $\hat{\mathbf{z}}$ – вектор оценок ненаблюдаемых внешних возмущений (второе уравнение).

Асимптотический наблюдатель (1) должен обеспечить:

- ◆ асимптотическую устойчивость замкнутой системы,
- ◆ выполнение технологических инвариантов [2–4],
- ◆ оценку ненаблюдаемых внешних воздействий по текущим значениям ненаблюдаемых координат состояния,
- ◆ поглощение гармонических ветровых возмущений.

Вектором состояния наблюдателя \mathbf{y} (1) дополняется математическая модель «летающей платформы» в условиях возмущённого движения, а в законах управления ненаблюдаемые переменные заменяются их асимптотическими оценками $\hat{\mathbf{z}}$ (1) [16].

Алгоритмы управления верхнего уровня иерархии. Расширенная математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения в условиях внешних гармонических возмущающих воздействий показана ниже:

$$\left\{ \begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{u_1 - mg - C_1 x_1^2 + z_7}{m}, \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_2 - C_2 x_2^2 + z_9}{I_x}, \\ \dot{x}_3 &= \frac{u_3 - C_3 x_3^2 + z_{11}}{I_z}, \\ \dot{x}_4 &= x_1, \\ \dot{x}_5 &= x_2, \\ \dot{x}_6 &= x_3, \\ \dot{z}_7 &= a_7 z_8, \\ \dot{z}_8 &= -\left(\frac{\omega_8}{b_8}\right)^2 z_7, \\ \dot{z}_9 &= a_9 z_{10}, \\ \dot{z}_{10} &= -\left(\frac{\omega_{10}}{b_{10}}\right)^2 z_9, \\ \dot{z}_{11} &= a_{11} z_{12}, \\ \dot{z}_{12} &= -\left(\frac{\omega_{12}}{b_{12}}\right)^2 z_{11}.\end{aligned}\right.\quad (2)$$

Здесь $x_1 = V_y$ – вертикальная скорость, $x_2 = \omega_x$ – угловая скорость относительно продольной оси, $x_3 = \omega_z$ – угловая скорость относительно поперечной оси, $x_4 = Y$ – высота, $x_5 = \mathcal{G}$ – угол тангажа, $x_6 = \gamma$ – угол крена, $u_1 = F_y$ – равнодействующая сил двигателей по вертикальной оси, $u_2 = M_x$ – равнодействующая моментов двигателей по продольной оси, $u_3 = M_z$ – равнодействующая моментов двигателей по боковой оси, m – масса аппарата, I_x, I_z – моменты инерции относительно продольной и поперечной осей, g – ускорение свободного падения, C_1, C_2, C_3 – аэродинамические коэффициенты сопротивления [5].

В модели (2) переменные состояния $z_7 \dots z_{12}$ – ненаблюдаемые, они представляют собой внешние возмущения, изменяющиеся по гармоническому закону. При этом воздействие, мешающее стабилизации высоты, представлено переменными z_7, z_8 , воздействие, мешающее стабилизации угла тангажа – переменными z_9, z_{10} , а воздействие, мешающее стабилизации угла крена – переменными z_{11}, z_{12} . Таким образом, возмущения далее рассматриваются как координаты состояния «Аэромобиля», и именно для этих ненаблюдаемых координат будет выполняться построение асимптотического наблюдателя, имеющего целью оценку возмущающих воздействий по текущим значениям наблюдаемых координат с последующей компенсацией возмущений [3].

Технологическими инвариантами (целями управления) являются [2–4]:

- ◆ стабилизация высоты $x_4 = x_4^*$,
- ◆ стабилизация угла тангажа $x_5 = x_5^*$,
- ◆ стабилизация угла крена $x_6 = x_6^*$.

Аналогично статье [4] в соответствии с правилами метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), являющегося основным методом синергетической теории управления [14], синтезируются алгоритмы управления верхнего уровня:

$$\begin{aligned} u_1 &= -m \left(\frac{\Psi_1}{T_1} + \frac{\dot{\Psi}_4}{T_4} \right) + mg + C_1 x_1^2 - z_7, \\ u_2 &= -I_x \left(\frac{\Psi_2}{T_2} + \frac{\dot{\Psi}_5}{T_5} \right) + C_2 x_2^2 - z_9, \\ u_3 &= -I_z \left(\frac{\Psi_3}{T_3} + \frac{\dot{\Psi}_6}{T_6} \right) + C_3 x_3^2 - z_{11}. \end{aligned} \quad (3)$$

Величины, входящие в выражения (3), – это те же самые величины, которые входят в выражения (2) в работе [4].

Уравнения наблюдателя гармонических возмущений. Общий вид математической модели произвольной динамической системы может быть представлен так:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}), \\ \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь n -вектор \mathbf{x} и m -вектор \mathbf{z} – компоненты вектора состояния, \mathbf{u} – вектор управления, причём вектор \mathbf{x} представляется наблюдаемым, а вектор \mathbf{z} – ненаблюдаемым. Задача состоит в построении асимптотической оценки вектора \mathbf{z} по наблюдаемым значениям вектора \mathbf{x} и известному вектору \mathbf{u} [16].

Частным случаем системы (4) является такой случай, когда векторы \mathbf{G} и \mathbf{H} – это линейные функции вектора \mathbf{z} :

$$\begin{aligned}\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) &= \mathbf{G}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{G}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}, \\ \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) &= \mathbf{H}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}.\end{aligned}\quad (5)$$

В соответствии с формулами (4, 5) обобщённая форма модели (2) может быть представлена так:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{G}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{G}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}, \\ \dot{\mathbf{z}}(t) &= \mathbf{H}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}.\end{aligned}\quad (6)$$

Критерий наблюдаемости для динамической системы (6):

$$\text{rank}\left(\mathbf{G}_1^T(\mathbf{x}) \quad \mathbf{H}_1^T(\mathbf{x})\mathbf{G}_1^T(\mathbf{x}) \quad \dots \quad (\mathbf{H}_1^T(\mathbf{x}))^5\mathbf{G}_1^T(\mathbf{x})\right) = 6. \quad (7)$$

Поскольку критерий (7) выполняется, т.е. ранг матрицы управляемости равен порядку динамической системы (6), то общая форма уравнений наблюдателя и оценок ненаблюдаемых переменных (1) – следующая [16]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{y}} &= \mathbf{L}\mathbf{y} - \mathbf{L} \int_0^{\mathbf{x}} \Gamma(\mathbf{x})d\mathbf{x} - \mathbf{H}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \Gamma(\mathbf{x})\mathbf{G}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \\ \hat{\mathbf{z}} &= \int_0^{\mathbf{x}} \Gamma(\mathbf{x})d\mathbf{x} - \mathbf{y}.\end{aligned}\quad (8)$$

В уравнениях (8) матрица \mathbf{L} может быть задана произвольно. Допустимым её вариантом представляется диагональная матрица, на главной диагонали которой находятся числа l_i , $i = \overline{1, 6}$.

Вычисление матрицы Γ производится на основе уравнения:

$$\mathbf{H}_1(\mathbf{x}) - \mathbf{L} = \Gamma(\mathbf{x}) \times \mathbf{G}_1(\mathbf{x}). \quad (9)$$

Результат расчёта по выражению (9) подставляется в (8). Полученные уравнения наблюдателя – первое уравнение в системе (1):

$$\begin{aligned}\dot{y}_1 &= l_1\left(y_1 + l_1 m x_1 - (u_1 - mg - C_1 x_1^2)\right), \\ \dot{y}_2 &= l_2\left(y_2 + \left(\frac{\omega_8}{b_8}\right)^2 m x_1 - \left(\frac{\omega_8}{b_8}\right)^2 (u_1 - mg - C_1 x_1^2)\right), \\ \dot{y}_3 &= l_3\left(y_3 + l_3 m x_2 - (u_2 - C_2 x_2^2)\right), \\ \dot{y}_4 &= l_4\left(y_4 + \left(\frac{\omega_{10}}{b_{10}}\right)^2 I_x x_2 - \left(\frac{\omega_{10}}{b_{10}}\right)^2 (u_2 - C_2 x_2^2)\right), \\ \dot{y}_5 &= l_5\left(y_5 + l_5 m x_3 - (u_3 - C_3 x_3^2)\right), \\ \dot{y}_6 &= l_6\left(y_6 + \left(\frac{\omega_{12}}{b_{12}}\right)^2 I_z x_3 - \left(\frac{\omega_{12}}{b_{12}}\right)^2 (u_3 - C_3 x_3^2)\right).\end{aligned}\quad (10)$$

Полученные уравнения для оценок ненаблюдаемых переменных – второе уравнение в системе (1):

$$\begin{aligned}\hat{z}_7 &= -l_1 m x_1 - y_1, \\ \hat{z}_8 &= -\left(\omega_8 / b_8\right)^2 m x_1 - y_2, \\ \hat{z}_9 &= -l_3 I_x x_2 - y_3, \\ \hat{z}_{10} &= -\left(\omega_{10} / b_{10}\right)^2 I_x x_2 - y_4, \\ \hat{z}_{11} &= -l_5 I_z x_3 - y_5, \\ \hat{z}_{12} &= -\left(\omega_{12} / b_{12}\right)^2 I_z x_3 - y_6.\end{aligned}\quad (11)$$

Далее законы управления (3) с подстановкой в них равенств (11), пройдя через уравнения связи среднего уровня иерархии, поступают в качестве задающих воздействий на нижний уровень иерархии, под влиянием чего система синхронизации электродвигателей «летающей платформы» подстраивается под внешние возмущения для их компенсации, реализуя при этом энергосберегающее управление двигателями аппарата [19, 20].

Моделирование динамики разработанной системы. Графики моделирования «летающей платформы» в условиях внешних гармонических возмущений без асимптотического наблюдателя показаны ниже на рис. 1–6, а с асимптотическим наблюдателем (1, 8, 10, 11) – на рис. 7–16. По сравнению с работой [3] в данной публикации применена уточнённая математическая модель летательного аппарата с учётом всех нелинейностей, присущих реальному объекту, благодаря чему повысилась качество синтеза и моделирования.

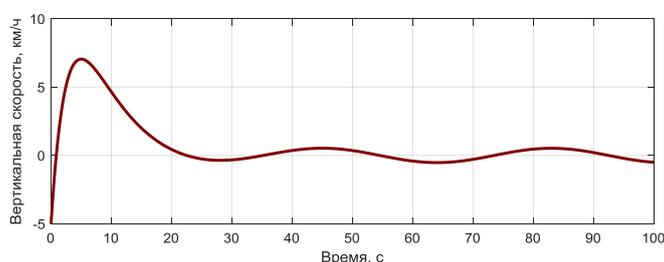


Рис. 1. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

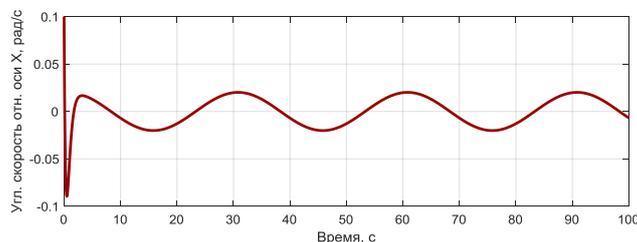


Рис. 2. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

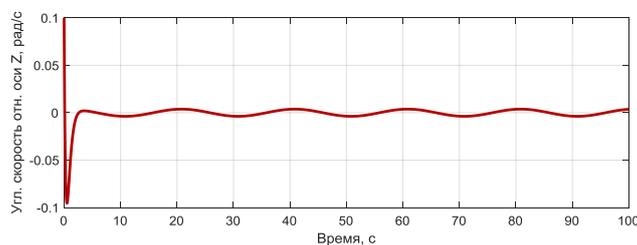


Рис. 3. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

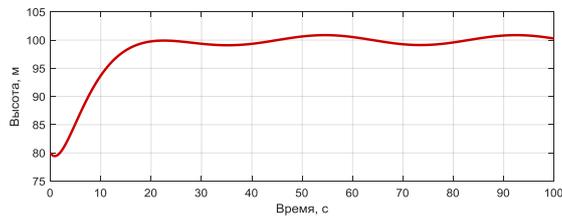


Рис. 4. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

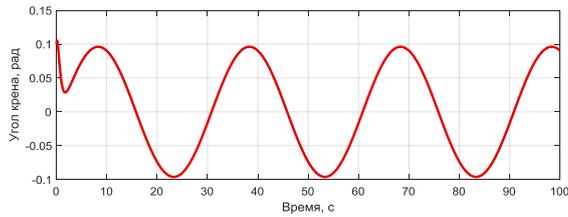


Рис. 5. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

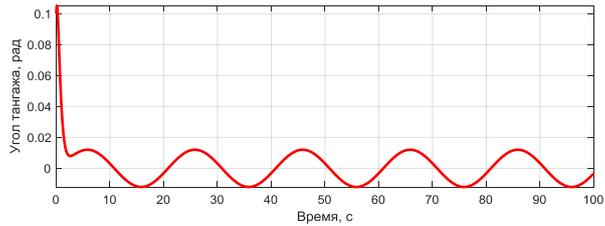


Рис. 6. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

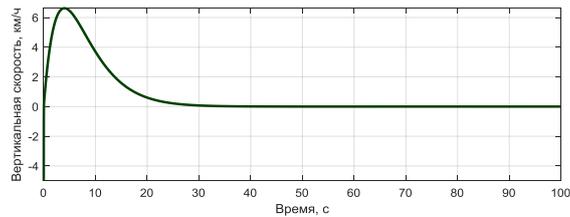


Рис. 7. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

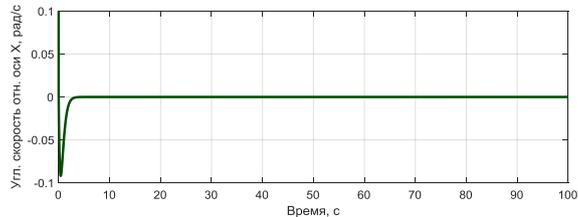


Рис. 8. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

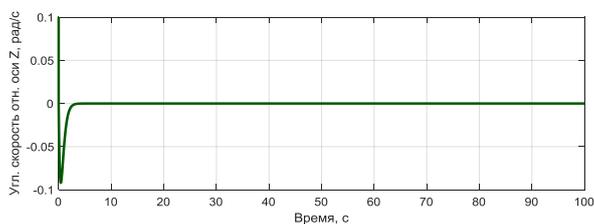


Рис. 9. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

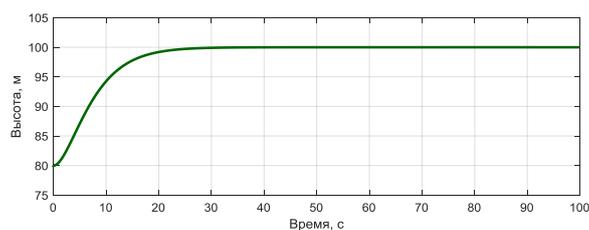


Рис. 10. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

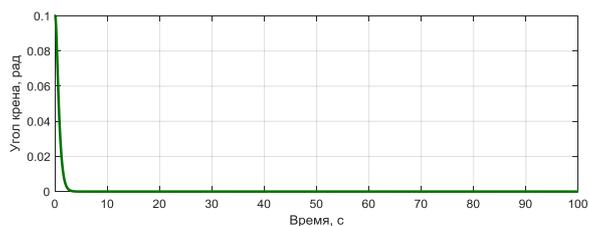


Рис. 11. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

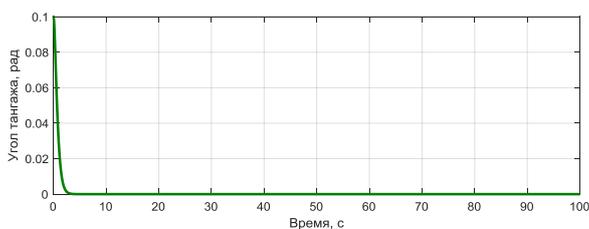


Рис. 12. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

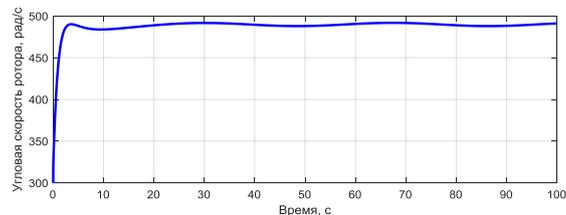


Рис. 13. График изменения угловой скорости ротора (нижний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

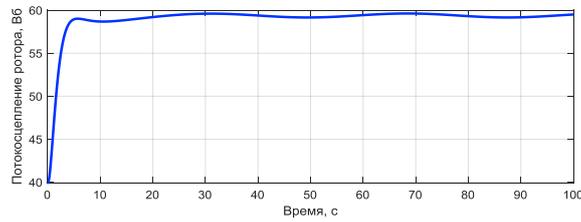


Рис. 14. График изменения потокосцепления ротора (нижний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

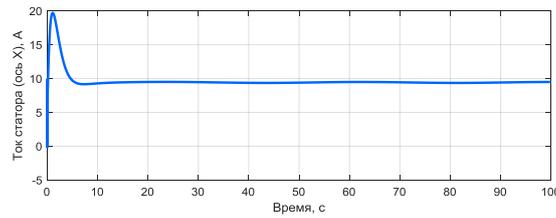


Рис. 15. График изменения проекции тока статора на ось абсцисс (нижний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

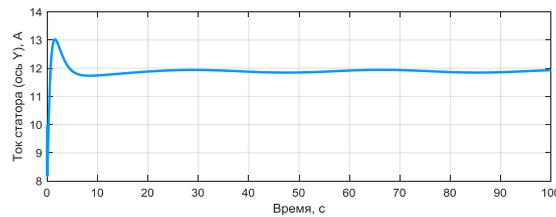


Рис. 16. График изменения проекции тока статора на ось ординат (нижний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

Рис. 13–16 относятся к одному из двигателей; для остальных трёх двигателей графики моделирования аналогичны. Как видно из сравнения рис. 1–6 и рис. 7–12, асимптотический наблюдатель эффективно поглощает внешние гармонические возмущения.

Выводы. В данной работе рассчитан асимптотический наблюдатель гармонических возмущающих воздействий для «летающей платформы» и проведено компьютерное моделирование нелинейной динамики аппарата в условиях внешних возмущений. Асимптотический наблюдатель, эффективно подавляя возмущения, гарантирует невосприимчивость «летающей платформы» к отрицательному влиянию этих возмущений на траекторию полёта, асимптотическую устойчивость замкнутой системы и соблюдение принципов энергосберегающего управления силовыми установками. Результаты работы будут полезны при разработке новых типов пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, не использующих аэродинамические поверхности для создания подъёмной силы, например, квадрокоптеров, для обеспечения их бесперебойного функционирования в условиях значительных ветровых и прочих воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ №2348568. Лёгкий многорежимный летательный аппарат / Ю.С. Воронков, О.Ю. Воронков; Опубл. 10.03.09. Бюл. № 7.
2. *Воронков О.Ю.* Синергетический синтез иерархической системы управления «Аэромобилем» в режиме балансировки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 5 (118). – С. 55-60.
3. *Воронков О.Ю.* Синергетический синтез иерархической системы балансировки «Аэромобилия» с асимптотическим наблюдателем гармонических возмущений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 153-161.
4. *Воронков О.Ю.* Синергетический подход к синтезу системы управления «летающей платформой» // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3 (2019). – С. 161-170.
5. *Курочкин Ф.П.* Основы проектирования самолётов с вертикальным взлётом и посадкой. – М.: Машиностроение, 1970. – 354 с.
6. *Шайдаков В.И.* Аэродинамика винта в кольце. – М.: Изд-во Московского Авиационного Института, 1996. – 88 с.
7. *Буков В.Н.* Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.
8. *Lambregts A.A.* Vertical flight path and speed control autopilot using total energy principles // AIAA P1983. № 2239CP.
9. *Turner M.C., Aouf N., Bates D.G. et al.* A switching scheme for full-envelope control of a V/STOL aircraft using LQ bumpless transfer // Proc. 2002 IEEE Internat. Conf. on Control Applications. – Glasgow, Scotland, U.K., 2002.
10. *Tsourdos A., White B.A.* Adaptive flight control design for nonlinear missile // Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). – Barcelona, 2002.
11. *Blumel A.V., Tsourdos A., White B.A.* Flight control design for a STT Missile: a fuzzy LPV approach // Proc. 15th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. – Bologna/Forli, Italy, 2001.
12. *Tsourdos A., White B.A.* Flight control design for quasi-linear parameter varying missile via pseudolinearisation // Prepr. 5th IFAC Symp. NOLCOS'01. – St. Petersburg, Russia, 2001.
13. *Farren D., Duc G., Harcaut J.P.* Discrete-time LPV controller for robust missile autopilot design // Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). – Barcelona, 2002.
14. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
15. Современная прикладная теория управления. Ч. I: Оптимизационный подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
16. Современная прикладная теория управления. Ч. II: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.
17. Современная прикладная теория управления. Ч. III: Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 656 с.
18. *Колесников А.А., Мушенко А.С.* Синергетическое управление процессами пространственного движения летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 2. – С. 38-45.
19. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал.А.* Синергетическая теория управления нелинейными взаимосвязанными электромеханическими системами. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 182 с.
20. *Попов А.Н.* Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 67 с.

REFERENCES

1. *Voronkov Yu.S., Voronkov O.Yu.* Patent RF No. 2348568. Legkiy mnogorezhimnyy letatel'nyy apparat [Easy multi-mode aircraft]; Published 10.03.09. Bull. No. 7.
2. *Voronkov O.Yu.* Sinergeticheskiy sintez ierarkhicheskoy sistemy upravleniya «Aeromobil» v rezhime balansirovki [Synergetic synthesis of the hierarchical control system "Aeromobil" in balancing mode], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 5 (118), pp. 55-60.

3. Voronkov O.Yu. Sinergeticheskiy sintez ierarkhicheskoy sistemy balansirovki «Aeromobilya» s asimptoticheskim nablyudatelem garmonicheskikh vozmushcheniy [Synergetic synthesis of the hierarchical balancing system "Aeromobil" with an asymptotic observer of harmonic perturbations], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 6 (119), pp. 153-161.
4. Voronkov O.Yu. Sinergeticheskiy podkhod k sintezu sistemy upravleniya «letayushchey platformoy» [A synergistic approach to the synthesis of a control system of "flying platform"], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (2019), pp. 161-170.
5. Kurochkin F.P. Osnovy proektirovaniya samoletov s vertikal'nym vzletom i posadkoy [Fundamentals of aircraft design with vertical takeoff and landing]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 354 p.
6. Shaydakov V.I. Aerodinamika vinta v kol'tse [Aerodynamics of the screw in the ring]. Moscow: Izd-vo Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta, 1996, 88 p.
7. Bukov V.N. Adaptivnye prognoziruyushchie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987, 232 p.
8. Lambregts A.A. Vertical flight path and speed control autopilot using total energy principles, *AIAA P1983*. No. 2239CP.
9. Turner M.C., Aouf N., Bates D.G. et al. A switching scheme for full-envelope control of a V/STOL aircraft using LQ bumpless transfer, *Proc. 2002 IEEE Internat. Conf. on Control Applications*. Glasgow, Scotland, U.K., 2002.
10. Tsourdos A., White B.A. Adaptive flight control design for nonlinear missile, *Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02)*. Barcelona, 2002.
11. Blumel A.V., Tsourdos A., White B.A. Flight control design for a STT Missile: a fuzzy LPV approach, *Proc. 15th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace*. Bologna/Forli, Italy, 2001.
12. Tsourdos A., White B.A. Flight control design for quasi-linear parameter varying missile via pseudolinearisation, *Prepr. 5th IFAC Symp. NOLCOS'01*. St. Petersburg, Russia, 2001.
13. Farren D., Duc G., Harcaut J.P. Discrete-time LPV controller for robust missile autopilot design, *Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02)*. Barcelona, 2002.
14. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Taganrog: TRTU, M.: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
15. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. I: Optimizatsionnyy podkhod v teorii upravleniya [Modern applied control theory. Part I: Optimization approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 400 p.
16. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. II: Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya [Modern applied control theory. Part II: Synergetic approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 559 p.
17. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. III: Novye klassy regulyatorov tekhnicheskikh sistem [Modern applied control theory. Part III: New classes of regulators of technical systems], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 656 p.
18. Kolesnikov A.A., Mushenko A.S. Sinergeticheskoe upravlenie protsessami prostranstvennogo dvizheniya letatel'nykh apparatov [Synergetic control of processes of spatial movement of aircraft], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2004, No. 2, pp. 38-45.
19. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kolesnikov A.I.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya nelineynymi vzaimosvyazannymi elektromekhanicheskimi sistemami [Synergetic theory of control of nonlinear interconnected Electromechanical systems]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 182 p.
20. Popov A.N. Sinergeticheskiy sintez zakonov energosberegayushchego upravleniya elektromekhanicheskimi sistemami [Synergetic synthesis of laws of energy-saving management of Electromechanical systems]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2003, 67 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.М. Першин.

Воронков Олег Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: ovoronkov@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +79508449549; кафедра синергетики и процессов управления; к.т.н.; ассистент.

Voronkov Oleg Yurievich – Southern Federal University; e-mail: ovoronkov@sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79508449549; the department of synergetics & control processes; cand. of eng. sc.; assistant.

С.М. Гушанский, В.И. Божич, В.С. Потапов

РАЗРАБОТКА КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОДОВ ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ВИДОВ КВАНТОВЫХ ОШИБОК

В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к квантовым компьютерам. Их работа основана на использовании для вычислений таких квантово-механических явлений, как суперпозиция и запутывание для преобразования входных данных в выходные, которые реально смогут обеспечить эффективную производительность на 3–4 порядка выше, чем любые современные вычислительные устройства, что позволит решать перечисленные выше и другие задачи в натуральном и ускоренном масштабе времени. Данная статья посвящена решению задачи исследования и разработки корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок, появляющихся при вычислительных процессах в квантовых алгоритмах и моделях квантовых вычислительных устройств. Целью работы является изучение существующих методов исправления различных видов и типов квантовых ошибок и создание 3-кубитного корректирующего кода для квантового исправления ошибок. Работа затрагивает задачи исследования и разработки методов функционирования квантовых схем и моделей квантовых вычислительных устройств. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок в рамках разработки и выполнения квантовых алгоритмов для решения классов задач классического характера. Научная новизна данного направления выражается в исключении одного из недостатков квантового вычислительного процесса. Научная новизна данного направления в первую очередь выражается в постоянном обновлении и дополнении поля квантовых исследований по ряду направлений, а компьютерная симуляция квантовых физических явлений и особенностей слабо освещена в мире. Целью работы является компьютерное моделирование квантового вычислительного процесса с использованием метода исправления фазовых типов ошибок, который позволяет оценить собственную фазу унитарного гейта, получившего доступ к квантовому состоянию, пропорционально собственному вектору.

Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор; сложность алгоритма.

S.M. Gushanskiy, V.I. Bozhich, V.S. Potapov

DEVELOPMENT OF CORRECTION CODES FOR CORRECTING SEVERAL KINDS OF QUANTUM ERRORS

Recently, there has been a rapid increase in interest in quantum computers. Their work is based on the use of quantum-mechanical phenomena such as superposition and entanglement for computing input data into output data that can actually provide effective performance 3 to 4 orders of magnitude higher than any modern computing devices, which will solve the above and others tasks in a natural and accelerated time scale. This article is devoted to solving the problem of research and development of corrective codes for correcting several types of quantum errors that appear during computational processes in quantum algorithms and models of quantum computing devices. The aim of the work is to study existing methods for correcting various types and types of quantum errors and to create a 3-qubit corrective code for quantum error correction. The work touches upon the tasks of research and development of the functioning methods of quantum circuits and models of quantum computing devices. The relevance of these studies lies in the mathematical and software modeling and implementation of corrective codes for correcting several types of quantum errors as part of the development and implementation of quantum algorithms for solving classes of classical problems. The scientific novelty of this area is expressed in the exclusion of one of the shortcomings of the quantum computing process. The scientific novelty of this area is primarily expressed in the constant updating and addition of the field of quantum research in a number of areas, and computer simula-

tion of quantum physical phenomena and features is poorly illuminated in the world. The aim of the work is computer simulation of a quantum computing process using the method of correcting phase types of errors, which allows one to evaluate the own phase of a unitary gate that has gained access to the quantum state in proportion to its own vector.

Modeling; quantum algorithm; qubit; model of a quantum computer; entanglement; superposition; quantum operator; complexity of the algorithm.

Введение. В современной науке и технике постоянно возникает необходимость в решении таких стратегически важных задач, как предсказание погоды и расчет климатических изменений, создание онкологических препаратов, обработка сигналов из Вселенной для поиска внеземных цивилизаций, обработка символической информации, криптоанализ [1], опережающий расчет траекторий движущихся воздушных и космических объектов [2] и другие задачи. Практическая реализация перечисленных задач на современных, даже суперкомпьютерных [3], системах требует недопустимо большого промежутка времени или вообще невозможна.

Для квантовых вычислений необходимы только конечномерные квантовые системы, и для этого достаточно рассмотрения комплексных векторных пространств со скалярным произведением – евклидовых пространств [4].

Состояние квантовой системы и их преобразования можно описать посредством векторов и матриц или, используя более компактные бра и кет обозначения, введенные Дираком [5]. Кет-векторами $|x\rangle$ [6] обозначают векторы-столбцы и обычно используют для описания квантовых состояний [7]. Введенные в предыдущем разделе функции $|0\rangle$ и $|1\rangle$ как раз и являются кет-векторами. Парными бра-векторами $\langle x|$ обозначают сопряжение и транспонирование кет-векторов $|x\rangle$. Иными словами, векторы $|0\rangle, \langle 0|, |1\rangle, \langle 1|$ в матричной форме представляются следующим образом:

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \langle 0| = [1 \ 0], \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \langle 1| = [0 \ 1]. \quad (1)$$

1. Теория квантовых ошибок. В силу специфики пространства состояний кубита [8], считается, что его взаимодействие с окружающей средой может привести к ошибке одного из трех возможных типов:

1) битовые ошибки, приводящие к перебору кубита $|0\rangle \rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow |0\rangle$. Их иначе еще называют X – ошибками, так как их можно представить, как результат произведения матрицы Паули [9] (x) и вектора состояния кубита;

2) фазовые ошибки, приводящие к перевороту фазы кубита $|0\rangle \rightarrow |0\rangle, |1\rangle \rightarrow |1\rangle$. Их называют Z – ошибками (соответствующая матрица Паули (z));

3) смешанные битофазовые ошибки, приводящие одновременно и к перебору кубита и перевороту фазы $|0\rangle \rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow |0\rangle$. Их называют Y – ошибками (соответствующая матрица Паули (y)).

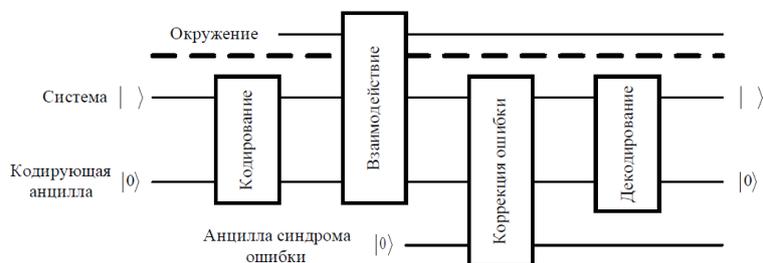


Рис. 1. Базовая схема построения квантовых кодов коррекции

Исправление фазовых ошибок. Классического аналога фазовой ошибки не существует, однако фазовую ошибку возможно трансформировать в классическую. Рассмотрим базис $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} * (|0\rangle + |1\rangle)$, $|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} * (|0\rangle - |1\rangle)$. Оператор фазовой [10] ошибки Z транслирует $|+\rangle$ в $|-\rangle$ и наоборот. Аналогичным образом действует оператор X в базисе $|0\rangle, |1\rangle$. Используя этот факт, скорректировать или исправить данный тип ошибки можно с помощью трехкубитового кодирования: $|0\rangle \rightarrow |+++ \rangle, |1\rangle \rightarrow |-- \rangle$. Используя схему коррекции, легко составить схему исправления фазовой ошибки (рис. 2).

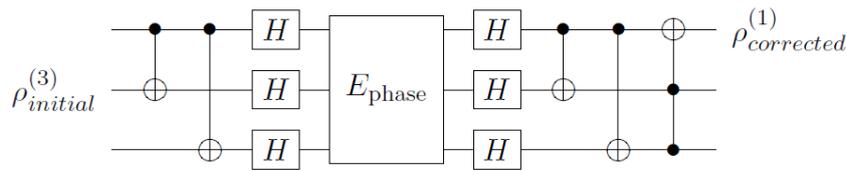


Рис. 2. Схема исправления фазовой ошибки

Зависимость меры декорентности [11] от зашумленности в одном кубите [12] в случае фазовой ошибки будет совпадать со случаем классической ошибки. В соответствии с вышеописанным материалом получаем зависимость ошибки E от меры и чистоты запутанности [13], где значение квантовой ошибки складывается из искажения данных I , зашумленности квантовых состояний Z и декогеренции D : $\sum (I + Z + D) = E$

Система оценок количественных характеристик запутанности. Для реализации преимуществ квантовых вычислений перед классическими, необходимы задачи, с которыми классические вычислительные машины не справляются. Речь идет не о принципиальной "нерешаемости" задачи, а о времени, необходимом им на это решение. Если оно превосходит разумный предел (скажем, один год), то задача считается неразрешимой.

Для количественной характеристики запутанности состояния важное значение имеет понятие меры запутанности. Эта мера E должна удовлетворять следующим условиям:

1. Вариативность относительно локальных [14] квантовых операций (W);
2. Непрерывность (N) [15];

В нерелятивистской квантовой механике [16] сохранение вероятности приводит к уравнению непрерывности. Пусть $P(x, t)$ – плотность вероятности, J – поток вероятности, тогда уравнение запишется в виде

$$\text{div}J + \frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = 0.$$

3. Аддитивность (A) [17]. Если существует более одной копии системы, то необходимо выполнение следующего условия:

$$E(|\psi_{AB}\rangle \otimes |\varphi_{AB}\rangle) = E(|\psi_{AB}\rangle) + E(|\varphi_{AB}\rangle).$$

Также важным считается свойство аддитивности $E(|\psi\rangle \otimes |\varphi\rangle) = E(|\psi\rangle) + E(|\varphi\rangle)$, которое может быть сформулировано в двух вариантах:

1. Аддитивность в смысле добавления кубитов. Состояния $|\Psi\rangle$ и $|\varphi\rangle$ находятся в пространствах $H_1 \otimes \dots \otimes H_n$ и $H_{n+1} \otimes \dots \otimes H_{n+k}$, соответственно. Тогда

состояние $|\Psi\rangle \otimes |\varphi\rangle$ описывается в пространстве $H_1 \otimes \dots \otimes H_n \otimes H_{n+1} \otimes \dots \otimes H_{n+k}$ и его запутанность рассматривается между подсистемами $H_1, \dots, H_n, H_{n+1}, \dots, H_{n+k}$. Таким образом, количество кубитов складывается.

2. Аддитивность в смысле расширения пространства [18]. Состояния $|\Psi\rangle$ и $|\varphi\rangle$ находятся в пространствах $H_1 \otimes \dots \otimes H_n$ и $H'_1 \otimes \dots \otimes H'_n$. Тогда состояние $|\Psi\rangle \otimes |\varphi\rangle$ рассматривается в пространстве $(H_1 \otimes H'_1) \otimes (H_2 \otimes H'_2) \otimes \dots \otimes (H_n \otimes H'_n)$, а запутанность рассматривается между подсистемами [19] $H_1 \otimes H'_1, H_2 \otimes H'_2, \dots, H_n \otimes H'_n$. В данном случае перемножаются размерности [20] соответствующих кубитов, происходит расширение пространства состояний кубитов. В соответствии с вышеописанными характеристиками была сформирована система [21] оценок количественных характеристик запутанности:

$$\left\{ \begin{array}{l} W, \text{ где } 1 < W < \infty \\ \operatorname{div} J + \frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = 0 \\ A \equiv E(|\psi_{AB}\rangle \otimes |\varphi_{AB}\rangle) = E(|\psi_{AB}\rangle) + E(|\varphi_{AB}\rangle) \end{array} \right.$$

Исходя из данной системы, необходимым и достаточным набором условий успешной реализации квантовой запутанности для дальнейшей работы квантовых алгоритмов [22] и вычислений является выполнение одновременно всех строк системы. Наибольшей важностью отличается условие непрерывности [23], необходимость непрерывного изменения некоторой величины. В данном случае речь идет о квантовом состоянии и процессе его получения, для которого неожиданная остановка процесса измерения (изменения) аналогична ошибке на выходе системы. Также не менее важным условием является аддитивность. В квантовой механике аддитивность величины означает, что величина, относящаяся к квантовой системе в целом, равна сумме величин, относящихся к её составным частям. Свойство аддитивности для некоторых физических величин эквивалентно принципу суперпозиции.

Заключение. Квантовая коррекция ошибок [24] используется для защиты информации в квантовой связи (где квантовые состояния проходят через шумные каналы) и квантовые вычисления (где квантовые состояния преобразуются через последовательность несовершенных вычислительных шагов в присутствии декогеренции [25] окружающей среды для решения вычислительной задачи). В квантовой обработке информации эволюция времени квантового вычислительного процесса обычно рассматривается как дискретная, представление полной эволюции квантовой системы за конечный интервал времени (например, один вычислительный шаг).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № НК 20-07-00368.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Квантовая криптография // Википедия. – URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (дата обращения: 07.03.2017).
2. Трубицын А.А. Расчет траектории движения материальной точки в двумерном (осесимметричном) консервативном поле // Вычислительная математика и математическая физика. – 1990. – Т. 30:7. – С. 1113-1115.
3. Arthur Trew (ed.), Greg Wilson (ed.). Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computer Systems. – Springer, 1991. – 392 p. – ISBN 9783540196648.

4. Quantum phase estimation algorithm. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2016, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789.
5. *Richard G. Milner*. A Short History of Spin // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. – arXiv:1311.5016.
6. *Гушанский С.М., Потанов В.С.* Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.
7. *Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потанов В.С.* Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двухмерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 6 (191). – С. 223-233.
8. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потанов В.С.* Понятие и структура квантового алгоритма // Информатизация и связь. – 2016. – № 1. – С. 35-39.
9. *Hales S. Hallgren*. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12–14, 2000. – 515 p.
10. *Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M.* The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes // 2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2017. – P. 437-441.
11. Attractive photons in a quantum nonlinear medium. Ofer Firstenberg, Mikhail D. Lukin. Nature. – October 2013. – Vol. 502.
12. *Нильсен М., Чанг И.* Квантовые вычисления и квантовая информация = Quantum Computation and Quantum Information. – М.: Мир, 2006.
13. Quantum programming. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:50, September 20, 2016, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291.
14. Wikipedia contributors. (2018, November 27). IBM Q Experience. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:28, January 31, 2019, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=87087480.
15. Quantum mechanics. (2017, March 29). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2017. – URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105.
16. *Boneh D., Zhandry M.* Quantum-secure message authentication codes // In Proceedings of Eurocrypt. – 2013. – P. 592-608.
17. *Chris Ferrie*. Quantum Physics for Babies. – Brdtk edition. – Sourcebooks Jabberwocky, 2017-05-02. – P. 23-24. – ISBN 9781492656227.
18. *Wilde M.* From Classical to Quantum Shannon Theory, arXiv:1106.1445.
19. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Потанов В.С.* Количественные характеристики степени запутанности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 76-86.
20. *Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M.* Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer Verlag, 2016. – Vol. 465. – P. 59-68.
21. *Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн.* Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1296. – ISBN 0-07-013151-1.
22. Оптимизация // Википедия. [2018–2018]. Дата обновления: 10.08.2018. – URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=94448419> (дата обращения: 10.08.2018).
23. *Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V.* Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem // IEEE Transactions on Information Theory. – 2002. – Vol. 48. – P. 26-37.
24. *Kleppner D., Kolenkow R.* An Introduction to Mechanics (Second ed.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.
25. *Потанов В.С., Гушанский С.М.* Квантовые типы ошибок и методы их устранения, зависимость ошибки от меры и чистоты запутанности // Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИТСАиУ-2016. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016 – Т. 3. – С. 123-129.

REFERENCES

1. Kvantovaya kriptografiya [Quantum cryptography], *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (accessed 07 March 2017).
2. *Trubitsyn A.A.* Raschet traektorii dvizheniya material'noy toчки v dvumernom (osesimmetrichnom) konservativnom pole [Calculation of the trajectory of a material point in a two-dimensional (axisymmetric) conservative field], *Vychislitel'naya matematika i matematicheskaya fizika* [Computational mathematics and mathematical physics], 1990, Vol. 30:7, pp. 1113-1115.
3. *Arthur Trew (ed.), Greg Wilson (ed.)*. Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computer Systems. Springer, 1991, 392 p. ISBN 9783540196648.
4. Quantum phase estimation algorithm. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2016, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789.
5. *Richard G. Milner*. A Short History of Spin // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. arXiv:1311.5016.
6. *Gushanskiyyu S.M., Potapov V.S.* Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Method of development and construction of quantum algorithms], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 3, pp. 101-104.
7. *Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S.* Realizatsiya komp'yuternogo modelirovaniya sistemy s chastitsey v odnomernom i dvukhmernom prostranstve na kvantovom urovne [Implementation of computer simulation of a system with a particle in one-dimensional and two-dimensional space at the quantum level], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 6 (191), pp. 223-233.
8. *Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S.* Ponyatie i struktura kvantovogo algoritma [The concept and structure of a quantum algorithm], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2016, No. 1, pp. 35-39.
9. *Hales S. Hallgren*. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12-14, 2000*, 515 p.
10. *Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M.* The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes, *2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, pp. 437-441.
11. Attractive photons in a quantum nonlinear medium. Ofer Firstenberg, Mikhail D. Lukin. Nature, October 2013, Vol. 502.
12. *Nil'sen M., Chang I.* Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informatsiya = Quantum Computation and Quantum Information [Quantum computing and quantum information = Quantum computing and Quantum Information]. Moscow: Mir, 2006.
13. Quantum programming. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:50, September 20, 2016, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291.
14. Wikipedia contributors. (2018, November 27). IBM Q Experience. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:28, January 31, 2019, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=87087480.
15. Quantum mechanics. (2017, March 29). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2017. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105.
16. *Boneh D., Zhandry M.* Quantum-secure message authentication codes, *In Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.
17. *Chris Ferrie*. Quantum Physics for Babies. Brdbk edition. Sourcebooks Jabberwocky, 2017-05-02, P. 23-24. ISBN 9781492656227.
18. *Wilde M.* From Classical to Quantum Shannon Theory, arXiv:1106.1445.
19. *Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Potapov V.S.* Kolichestvennyye kharakteristiki stepeni zaputannosti [Quantitative characteristics of the degree of entanglement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), pp. 76-86.
20. *Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M.* Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, 2016, Vol. 465, pp. 59-68.

21. *Tomas Kh. Kormen, Charl'z I. Leyzerson, Ronal'd L. Rivest, Klifford Shtayn.* Algoritmy: postroenie i analiz = Introduction to Algorithms [Algorithms: construction and analysis = Introduction to Algorithms]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2006, pp. 1296. ISBN 0-07-013151-1.
22. Optimizatsiya [Optimization], Vikipediya [Wikipedia]. [2018–2018]. Data obnovleniya: 10.08.2018. Available at: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=94448419> (accessed 10 August 2018).
23. *Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V.* Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, pp. 26-37.
24. *Kleppner D., Kolenkow R.* An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.
25. *Potapov V.S., Gushanskiy S.M.* Kvantovye tipy oshibok i metody ikh ustraneniya, zavisimost' oshibki ot mery i chistoty zaputannosti [Quantum types of errors and methods of their elimination, the dependence of errors on the measure and purity of entanglement], *Sb. trudov XIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov ITSAiU-2016* [Proceedings of the XIV all-Russian scientific conference of young scientists, postgraduates and students of Itsaiu-2016]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, Vol. 3, pp. 123-129.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.Ю. Поленов.

Гушанский Сергей Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Потанов Виктор Сергеевич – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Божич Владимир Иванович – ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)», Таганрогский институт им. А.П. Чехова, e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: 88634367866; кафедра естествознания и безопасности жизнедеятельности; д.т.н.; профессор.

Gushanskiy Sergey Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Potapov Victor Sergeevich – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; the department of computer engineering; assistant.

Bozhich Vladimir Ivanovich – FSBEI HE “RSEU (RINH)”, Taganrog Institute A.P. Chekhov, e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; 347928, Taganrog, st. Initiative, 48; phone: 88634367866; the department of natural sciences and life safety; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-46-55

С.И. Клевцов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ФОРМЫ СОВОКУПНОСТИ ЕГО ЗНАЧЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Одной из важных задач мониторинга технических объектов является предотвращение аварийных ситуаций. Эта задача связана с выполнением достоверной и адекватной оценки работоспособности объекта. Оценка работоспособности объекта основывается на анализе поведения его контролируемых параметров в реальном времени. Тогда она будет актуальной. В работе предложен метод определения характера изменения параметра, основанный на анализе последовательности специальных пространственных графических форм, называемых графиками Пуанкаре. Выбранный параметр должен в значительной степени определять работоспособность контролируемого объекта. Графики формируются на основе временного ряда контролируемого параметра. Выбирается временное

окно, которое вырезает заданное количество значений параметра. График строится для каждого шага перемещения окна по временному ряду параметра. Анализируется трансформация формы заданного типа, которая накладывается на совокупность значений параметра, представленных в виде графика. По изменению параметров формы делается вывод о характере изменений параметра. В работе показана возможность использования графиков Пуанкаре для отслеживания изменения состояния технического объекта в реальном времени. При этом учитываются особенности съема информации с датчиков. Оценка реализуется с помощью микропроцессорного модуля, входящего в систему мониторинга. Также предложена структура обобщенной однофакторной модели, которая отслеживает изменение состояния объекта на основе анализа графиков Пуанкаре. Приведен вариант оценки состояния объекта с помощью сравнения характеристик графика с критериями. Критерии получены после предварительной обработки большого массива данных о поведении контролируемого параметра. Каждому значению критерия поставлена в соответствие экспертная оценка, определяющая состояние объекта. Оценка позволяет определить степень работоспособности объекта и реализовать необходимые действия в случае опасности.

График Пуанкаре, оценка работоспособности, модель, микропроцессорный модуль, реальное время.

S.I. Klevtsov

DETERMINING THE NATURE OF PARAMETER CHANGES BASED ON THE ANALYSIS OF DYNAMICS RELATIVE TO THE SHAPE OF ITS VALUES SET IN REAL TIME

One of the important tasks of monitoring technical objects is the prevention of emergency situations. This task is associated with the implementation of a reliable and adequate assessment of the health of the object. The assessment of the object's health is based on an analysis of the behavior of its controlled parameters in real time. Only then it will be relevant. A method for determining the nature of a parameter change based on an analysis of a sequence of special spatial graphical forms called Poincaré graphs is proposed. The selected parameter should largely determine the operability of the controlled object. Charts are formed on the basis of the time series of the controlled parameter. A time window is selected that cuts the specified number of parameter values. A graph is plotted for each step of moving the window along the time series of the parameter. The transformation of the form of a given type is analyzed, which is superimposed on the totality of parameter values presented in the form of a graph. By changing the form parameters, a conclusion is drawn on the nature of the parameter changes. The paper shows the possibility of using Poincaré graphs to track changes in the state of a technical object in real time. This takes into account the peculiarities of information retrieval from sensors. The assessment is implemented using a microprocessor module included in the monitoring system. The structure of a generalized one-factor model is also proposed, which tracks the change in the state of an object based on an analysis of Poincaré graphs. The option of assessing the state of the object by comparing the characteristics of the graph with the criteria is given. The criteria are obtained after preliminary processing of a large array of data on the behavior of the controlled parameter. Each criterion value is associated with an expert assessment that determines the state of the object. The assessment allows you to determine the degree of operability of the facility and implement the necessary actions in case of danger.

Poincaré graph, performance assessment, model, microprocessor module, real time.

Введение. Повышение качества функционирования технического объекта связано с тем, насколько эффективно используются ресурсы управления при возникновении различных нештатных ситуаций [1–3]. Имеются условия, которые способствуют этому. Одним из важнейших условий является выполнение достоверной оценки состояния объекта. Оценка должна быть адекватна возникшей ситуации [2, 4, 5]. Оценка состояния технического объекта осуществляется на основе анализа состояния его параметров [5–8]. В ряде случаев можно выбрать один характерный параметр, определяющий состояние объекта в целом [9–11].

Оценка состояния объектов важна для предотвращения опасных ситуаций и решается различными способами [12–14]. Прогнозная оценка формируется на основе данных о текущем состоянии объекта [9, 10].

Оценка будет актуальной, если она выполняется в реальном времени [8, 10]. Реализация этой задачи возможна с использованием современной микропроцессорной техники. Микропроцессорные модули способны обрабатывать данные, считываемые с датчиков, проводить оценку и формировать команды для управления объектом в реальном времени. Модули, размещенные в системах контроля и управления, могут выполнять эти действия в фоновом режиме, не мешая выполнению основных функций системы [8, 10, 15].

Однако, при этом необходимо учитывать особенности съема информации с датчиков, связанные с цифровой обработкой сигналов [15]. Шаг дискретизации при съеме данных можно установить небольшим. В этом случае изменение параметра в течение нескольких последовательных шагов будет незначительным. Это позволит повысить точность оценки и снизить погрешности.

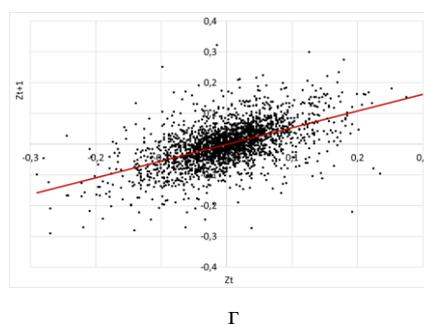
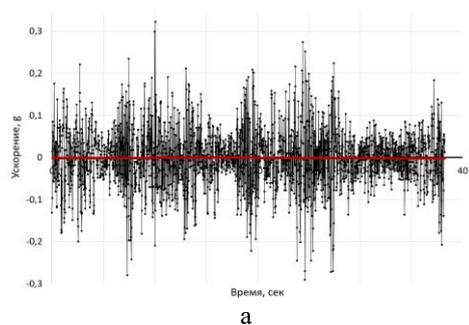
Параметр, используемый для оценки, может характеризоваться высоким уровнем шума. В этом случае необходима фильтрация исходных данных, которая требует дополнительного времени [4, 15]. Продолжительность процедуры зависит от сложности алгоритма.

С другой стороны, для оценки можно использовать временной ряд параметра без предварительной обработки, например, в виде совокупности значений, представленных особым способом. Для оценки предлагается использовать графики Пуанкаре [16–20]. График Пуанкаре представляет собой точечное графическое отображение N значений временной последовательности x_k при $k = 1, \dots, N$ на двумерном поле, в котором ординатой точки является значение x_{k+1} , а абсциссой – предшествующее значение x_k .

Постановка задачи. Как правило, графики Пуанкаре используются при анализе данных стационарных объектов для выявления отклонений состояний этих объектов от нормального состояния [17, 19–21]. Графики Пуанкаре любых динамических процессов, отличных от шума, характеризуются асимметрией относительно центра или осей системы координат [19, 20].

Задача заключается в определении возможности использования графиков Пуанкаре для идентификации различных состояний технического объекта и построением модели или алгоритма идентификации состояний.

Построим графики Пуанкаре для временных рядов параметров динамического объекта, который находится в различных фазах движения. В качестве параметра динамического объекта будем рассматривать ускорение автомобиля по осям X , Y , Z . На рис. 1 представлены результаты измерения ускорения по оси X , Y и Z в процессе выполнения автомобилем поворота налево и соответствующие графики Пуанкаре.



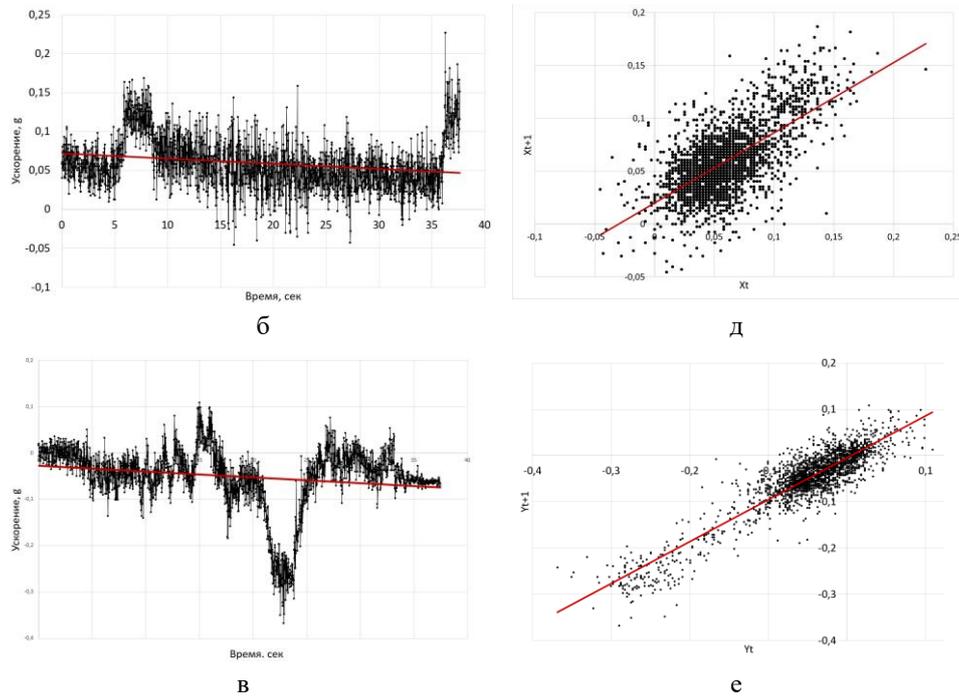


Рис. 1. Изменение ускорения автомобиля по оси Z (а), X (б) и Y (в) и графики Пуанкаре, соответствующие графикам изменения ускорения автомобиля по оси Z (з) и X (д) и Y (е)

Движение автомобиля в направлении поступательного движения (ось X) осуществляется с ускорением, близким к нулевому, что характеризует кривая полиномиального тренда на рис. 1б. Но наблюдаются отдельные участки с незначительным отклонением ускорения от нулевого (до 0,2 м/с²).

Среднее значение ускорения по вертикальной оси практически равно нулю (рис. 1,а).

Такое движение автомобиля определяет его устойчивое состояние в выбранных направлениях осей и характеризуется графиками Пуанкаре, приведенными на рис. 1,д и 1,г соответственно. Точки временного ряда на этих графиках располагаются вдоль тренда, представляющего прямую линию. Их совокупность симметрична относительно тренда и сосредоточена вокруг центра тяжести точек.

Координаты центра масс \bar{G}_Y, \bar{G}_{Y-1} определяются по формулам:

$$\bar{G}_Y = \frac{\sum_{j=in}^{ik} g_j r_j}{\sum_{j=in}^{ik} r_j}; \quad \bar{G}_{Y-1} = \frac{\sum_{j=in-1}^{ik-1} g_j r_j}{\sum_{j=ik-1}^{ik-1} r_j},$$

где \bar{G}_Y, \bar{G}_{Y-1} – координаты центра масс точек на области определения графика Пуанкаре;

g_j, r_j – значение j -го элемента временного ряда значений сигнала и его вес;

Для первого графика (рис. 1,г) центр тяжести равен нулю, для второго графика (рис. 1,д) примерно равен 0,05. незначительное. Следует отметить, что, несмотря на незначительное отклонение параметров движения по оси X от устойчивого состояния, форма графика уже не симметрична относительно центра тяжести и отличается от симметричной формы графика для ускорения по оси Z.

Если же рассматривать временной ряд параметра объекта, характеризующий более высокую динамику изменения состояния объекта, то графики Пуанкаре существенно меняются. На рис.1в и рис.1е представлены результаты измерения ускорения по оси Y и соответствующий график Пуанкаре.

Линейный тренд на рис. 1,в незначительно отреагировал на существенное изменение ускорения на участке $\Delta t = [15; 27]$ сек. Этот участок временного ряда идентифицирует поворот налево, причем в данном случае водитель проходил поворот рывками, что ухудшало устойчивость автомобиля на дороге.

В отличие от графиков Пуанкаре для ускорения по осям X и Z (рис. 1,г,д), данный график характеризуется большим разбросом значений и существенной несимметричностью относительно центра координат. Это говорит о движении объекта, отличном от равноускоренного в данном направлении и, соответственно, отклонении объекта от состояния, характеризующего его стабильное движение при среднем постоянном ускорении.

Таким образом, графики Пуанкаре, соответствующие разным по стабильности контролируемого параметра временным участкам его временного ряда, существенно отличаются по форме и характеру распределения точек временного ряда.

Процесс отслеживания изменения параметра технического объекта. Как правило, при формировании графиков Пуанкаре используется большое количество временных отсчетов [17, 19, 20]. В случае динамических процессов нас может интересовать текущее изменение состояния объекта. Если рассматривать изменение состояния за небольшой промежуток времени, то невозможно сформировать большую выборку исходных данных. Часто сравнение текущего состояния с базовым не может дать достаточной информации о степени опасности для объекта и требуется, например, последовательное сравнение состояний во времени, чтобы отследить динамику их изменения. Очевидно, что требование обеспечения выборки вышеуказанного объема при решении этих задач невыполнимо.

Однако это не является основанием для утверждения, что собственно графики Пуанкаре не подходят для исследования и оценки состояния быстрых динамических процессов.

Для оценки быстропротекающих процессов важно определить, как изменяется состояние процесса во времени. В этом случае можно воспользоваться временным окном, которое будет двигаться вдоль временного ряда, вырезая из множества исходных данных подмножество с неизменным количеством временных отсчетов. Таким образом, подмножество будет характеризоваться постоянным количеством входящих в него элементов и положением на временной оси формирующего это множество временного окна, например, начальная и конечная временные точки для текущей версии подмножества.

Применение данного подхода к построению графиков Пуанкаре позволяет выявить динамику изменения состояния процесса.

Следует отметить, что в качестве временного интервала Δt выбирается минимальный промежуток времени, в течение которого для данного типа объекта характерен переход от одного среднего уровня снимаемого параметра к другому. Для каждого типа объекта и в зависимости от требований решаемой задачи временной интервал Δt будет различным.

Используя графики Пуанкаре, построим процедуру отслеживания изменения состояния объекта, используя только временной ряд определяющего параметра объекта. При этом задача заключается в создании процедуры, обеспечивающей отслеживание изменения состояния объекта в режиме реального времени с использованием микропроцессорного модуля, имеющего ограничения по производительности и объему хранимой информации.

В общем виде структура обобщенной однофакторной модели отслеживания изменения состояния технического объекта в динамике на основе анализа графиков Пуанкаре определяется кортежем

$$\langle X, Dt, Dp, S, R_S \rangle,$$

где X – временной ряд значений параметра объекта; Dt – параметры временного окна для формирования графиков Пуанкаре; Dp – последовательность, состоящая из графиков Пуанкаре, построенных на выборках временного ряда, выделенных соответствующей реализацией временного окна; S – множество различаемых состояний объекта, необходимых для оценки степени его работоспособности с учетом решаемой этим объектом задачи; R_S – совокупность критериев (функциональных и логических соотношений, правил и ограничений), сопоставляющих конкретному графику Пуанкаре соответствующее состояние объекта из множества S .

Процедура отслеживания состояния объекта определяется следующим обобщенным выражением:

$$S = F(Dp, R_S),$$

В результате реализации модели можно получить оценку состояния объекта на основе временного ряда значений параметра в реальном времени.

Для апробации подхода в качестве контролируемого параметра выбрано ускорение. В качестве критерия оценки изменения состояния автомобиля при движении выбрано отношение стандартных отклонений диаграммы рассеяния Пуанкаре, построенной на основе графика Пуанкаре [20]. Диаграмма рассеяния в данном случае обычно представляет собой эллипс, вписанный в график Пуанкаре. Однако, более технологично использовать в качестве диаграммы рассеяния прямоугольник. В целях проверки подхода к оценке установлено, что прямоугольник должен охватывать не менее 95% точек графика Пуанкаре. Центр диаграммы рассеяния совпадает с центром тяжести масс точек.

Анализ временных рядов ускорения при движении автомобиля позволил определить ориентировочные критерии для классификации состояний объекта в процессе движения.

Всего выделено два состояния:

Состояние стабильного движения – движение с «постоянным» ускорением, включая движение с нулевым ускорением ($SD1/SD2 \leq 0,60$).

Состояние нестабильного движения - движение с непостоянным ускорением ($SD1/SD2 > 0,60$).

Для апробации подхода рассмотрим изменение ускорения по оси Y при повороте автомобиля. Представленный на рис. 2 временной ряд не входил в массив рядов, который использовался для выработки критерия.

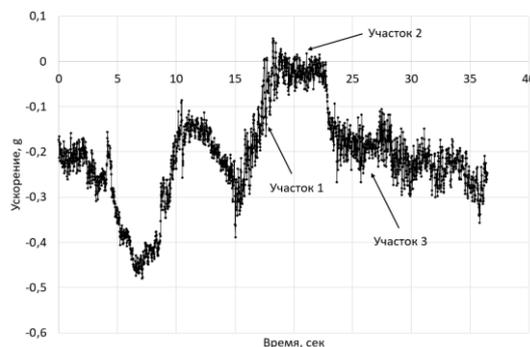


Рис. 2. Ускорение по оси Y

Состоянию стабильного движения в примере соответствует движение объекта, когда его ускорение в течение заданного временного интервала не изменяется на величину больше, чем 10 % от среднего значения на этом же интервале. Под ускорением в данном случае понимается его сглаженное значение (без шумовой составляющей и с учетом исключения выбросов).

Проведенный анализ графиков Пуанкаре для участков 1, 2 и 3 с помощью выработанных критериев показал, что участок 1 соответствует состоянию неустойчивого движения (рис. 3,а), а участки 2 и 3 – состоянию относительно стабильного движения (рис. 3,б,в).

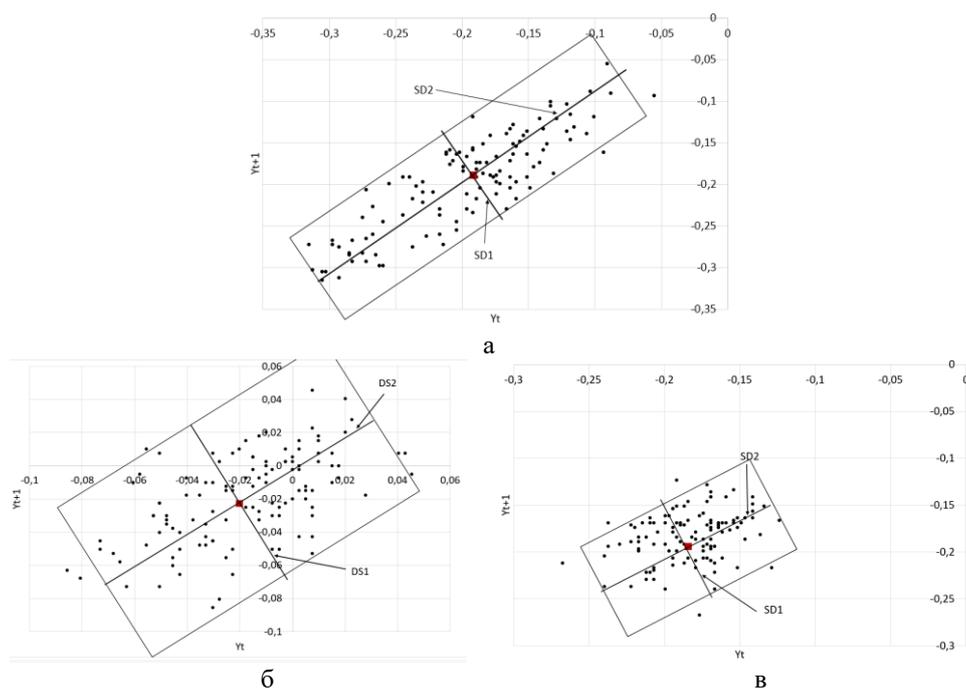


Рис. 11. График Пуанкаре, соответствующий изменению ускорения по оси Y на участках 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Экспертная оценка состояния объекта при движении соответствует полученной в результате процедуры построения и анализа графиков Пуанкаре.

Заключение. Особенность представленного способа классификации состояний объекта заключается в том, что не выполняется предварительная обработка сильно зашумленных исходных данных. Это позволяет выполнять классификацию без дополнительных процедур подготовки данных, например, анализа и исключения выбросов, сглаживании данных и других. Поэтому реализация процедуры классификации возможна в реальном времени в процессе функционирования объекта штатными вычислительными средствами преимущественно в фоновом режиме.

Следует отметить, что конкретная процедура оценки может быть иной. В данном примере в качестве базового компонента диаграммы рассеяния выбран прямоугольник, поскольку процедура его формирования выглядит достаточно простой. Однако, возможны другие подходы к выбору критерия и его вычислению.

Погрешность определения принадлежности состояния объекта к одному из двух классов составила величину не более 15 %. Оценка проводилась с учетом критерия принадлежности к состоянию стабильного движения, сформулированно-

му выше. Определение сглаженного значения ускорения на заданном временном интервале осуществлялось с использованием модели сглаживающего временного ряда первой степени. На величину погрешности существенно влияет объем выборки значений анализируемого временного ряда, которая в свою очередь зависит от величины временного интервала. Однако, увеличение временного интервала может не только не снизить погрешность, но и привести к невозможности классификации состояний, поскольку он формируется на основе анализа особенностей динамики объекта и существенным образом зависит от его инерционных свойств.

Использование двух и более критериев позволит увеличить количество уровней классификации и более точно идентифицировать состояние объекта. Однако количество уровней классификации состояний объекта определяется решаемой задачей мониторинга и управления, а также возможностью выделения состояний на основе контролируемых параметров и выполняемых объектом функций.

Тем не менее, проведенный анализ показал, что графики Пуанкаре на основе обработки экспериментального временного ряда контролируемого параметра могут быть использованы для отслеживания изменения состояния объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 232 с.
2. Васильев В.В., Грездов Г.И., Симак Л.А. и др. Моделирование динамических систем: Аспекты мониторинга и обработки сигналов / под ред. В.В. Васильева. – К.: НАН Украины, 2002. – 344 с.
3. Steblev Yu.I., Susarev S.V., Bykov D.E. The principles of designing automated systems for diagnostic monitoring of the engineering structures of hazardous production objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. – April 2015. – Vol. 51, Issue 4. – P 185-197.
4. Vasiliev V.V. Modern problems of computer monitoring in power engineering // News TSURE. – 2001. – No. 3. – P. 99-120.
5. Pyavchenko O.N., Gorelova G.V., Bojanic A.V. Klevtsov S.I., Klevtsova A.B. Methods and algorithms for modeling of complex situations: the monograph. – Taganrog: Publishing house TRTU, 2003. – 157 p.
6. Krivosheev I.A., Rozhkov K.E., Simonov N.B. Complex Diagnostic Index for Technical Condition Assessment for GTE // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 176-181 (International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017).
7. Jerzy Hoja, Grzegorz Lentka. A family of new generation miniaturized impedance an analyzers for technical object diagnostics // Metrology and measurement systems. – 2013. – Vol. XX, No. 1.
8. Клевицов С.И. Предварительная оценка состояния совокупности параметров технического объекта с использованием интеллектуального микропроцессорного модуля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 5 (106). – С.43-48.
9. Klevtsova A.B. Integral estimation of the object state monitoring // News TSURE. – 2004. – № 2 (37). – P. 58-66.
10. Клевицов С.И. Прогнозирование измерения состояния параметров технического объекта с помощью интеллектуального микропроцессорного модуля // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010: Сб. трудов. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 619-622.
11. Matuszewski J. Application of clustering methods for recognition of technical objects // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2010 International Conference. – 2010. – P. 39-40.
12. Lihua Sun, Yingjun Guo, Haichao Ran. A New Method of Early Real-Time Fault Diagnosis for Technical Process // Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference. – Wuhan, China, 2010. – P. 4912-4915.
13. Stanislaw Duer. Diagnostic system with an artificial neural network in diagnostics of an analogue technical object // Neural Computing and Applications. – February 2010. – Vol. 19, Issue 1. – P. 55-60.

14. *Klevtsov Sergei I.* Identification of the state of technical objects based on analyzing a limited set of parameters // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings. National Research University Higher School of Economics. Russia, Moscow, May 12-14, 2016. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7491752/>.
15. *Pyavchenko O.N.* Conceptual understanding of precision intelligent microprocessor modules for input, measurement and processing of analog signals // *News TSURE*. – 2007. – № 3 (75). – P. 3-13.
16. *Новоселов О.Н.* Идентификация и анализ динамических систем: монография. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ГОУ ВПО МГУИ, 2010. – 424 с.
17. *Гуфельд И.Л., Гаврилов В.А., Корольков А.В., Новоселов О.Н.* Эндогенная активность Земли и декомпрессионная модель сейсмического шума // Докл. РАН. – 2008. – Т. 423, № 6. – С. 811-814.
18. *Орлов В.Н.* Руководство по электрокардиографии. – М.: Медицина, 1984. – 526 с. – DOI: 10.1109/BMEiCon.2013.6687679.
19. *Kannakorn Intharakham, Kesorn Suwanprasert.* Complexity of Autonomic control during Cerebrovascular Reactivity // Proceedings of the 6th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON2013), October 2013.
20. *Carmen González, Erik W. Jensen, Pedro L. Gambús, Montserrat Vallverdú.* Poincaré plot analysis of cerebral blood flow signals: Feature extraction and classification methods for apnea detection // Published PLoS ONE: December 2018. – No. 7. – P. 43-52. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208642>.
21. *Jan Monieta* Selection of Diagnostic Symptoms and Injection Subsystems of Marine Reciprocating Internal Combustion Engines // *Appl. Sci.* – 2019. – No. 9 (8). – P. 1540. – <https://doi.org/10.3390/app9081540>.

REFERENCES

1. *Bukov V.N.* Adaptivnye prognoziryuyushchie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1981, 232 p.
2. *Vasil'ev V.V., Grezdov G.I., Simak L.A. i dr.* Modelirovanie dinamicheskikh sistem: Aspekty monitoringa i obrabotki signalov [Modeling of dynamic systems: Aspects of monitoring and signal processing], ed. by V.V. Vasil'eva. Kyev: NAN Ukrainy, 2002, 344 p.
3. *Steblev Yu.I., Susarev S.V., Bykov D.E.* The principles of designing automated systems for diagnostic monitoring of the engineering structures of hazardous production objects, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, April 2015, Vol. 51, Issue 4, pp 185-197.
4. *Vasiliev V.V.* Modern problems of computer monitoring in power engineering // *News TSURE*. – 2001. – No. 3. – P. 99-120.
5. *Pyavchenko O.N., Gorelova G.V., Bojanic A.V. Klevtsov S.I., Klevtsova A.B.* Methods and algorithms for modeling of complex situations: the monograph. Taganrog: Publishing house TRTU, 2003, 157 p.
6. *Krivoshchev I.A., Rozhkov K.E., Simonov N.B.* Complex Diagnostic Index for Technical Condition Assessment for GTE, *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 206, pp. 176-181 (International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017).
7. *Jerzy Hoja, Grzegorz Lentka.* A family of new generation miniaturized impedance an analyzers for technical object diagnostics, *Metrology and measurement systems*, 2013, Vol. XX, No. 1.
8. *Klevtsov S.I.* Predvaritel'naya otsenka sostoyaniya sovokupnosti parametrov tekhnicheskogo ob"ekta s ispol'zovaniem intellektual'nogo mikroprotsessornogo modulya [Preliminary assessment of the state of a set of technical object parameters using an intelligent microprocessor module], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 5 (106), pp. 43-48.
9. *Klevtsova A.B.* Integral estimation of the object state monitoring, *News TSURE*, 2004, No. 2 (37), pp. 58-66.
10. *Klevtsov S.I.* Prognozirovanie izmereniya sostoyaniya parametrov tekhnicheskogo ob"ekta s pomoshch'yu intellektual'nogo mikroprotsessornogo modulya [Predicting the measurement of the state of technical object parameters using an intelligent microprocessor module], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2010: Sb. trudov* [Problems of development of perspective micro-and nanoelectronic systems-2010: Collection of works]. Moscow: IPPM RAN, 2010, pp. 619-622.

11. *Matuszewski J.* Application of clustering methods for recognition of technical objects, *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2010 International Conference*, 2010, pp. 39-40.
12. *Lihua Sun, Yingjun Guo, Haichao Ran.* A New Method of Early Real-Time Fault Diagnosis for Technical Process, *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference*. Wuhan, China, 2010, pp. 4912-4915.
13. *Stanislaw Duer.* Diagnostic system with an artificial neural network in diagnostics of an analogue technical object, *Neural Computing and Applications*, February 2010, Vol. 19, Issue 1, pp. 55-60.
14. *Klevtsov Sergei I.* Identification of the state of technical objects based on analyzing a limited set of parameters, *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings. National Research University Higher School of Economics. Russia, Moscow, May 12-14, 2016*. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7491752/>.
15. *Pyavchenko O.N.* Conceptual understanding of precision intelligent microprocessor modules for input, measurement and processing of analog signals, *News TSURE*, 2007, No. 3 (75), pp. 3-13.
16. *Novoselov O.N.* Identifikatsiya i analiz dinamicheskikh sistem: monografiya [Identification and analysis of dynamic systems: monograph]. 3 ed. Moscow: GOU VPO MGUL, 2010, 424 p.
17. *Gufel'd I.L., Gavrilov V.A., Korol'kov A.V., Novoselov O.N.* Endogennaya aktivnost' Zemli i dekompressionnaya model' seismicheskogo shuma [Endogenous activity of the Earth and decompression model of seismic noise], *Dokl. RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 2008, Vol. 423, No. 6, pp. 811-814.
18. *Orlov V.N.* Rukovodstvo po elektrokardiografii [Manual of electrocardiography]. Moscow: Meditsina, 1984, 526 p. DOI: 10.1109/BMEiCon.2013.6687679.
19. *Kannakorn Intharakham, Kesorn Suwanprasert.* Complexity of Autonomic control during Cerebrovascular Reactivity, *Proceedings of the 6th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON2013), October 2013*.
20. *Carmen González, Erik W. Jensen, Pedro L. Gambús, Montserrat Vallverdú.* Poincaré plot analysis of cerebral blood flow signals: Feature extraction and classification methods for apnea detection, *Published PLoS ONE: December 2018*, No. 7, pp. 43-52. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208642>.
21. *Jan Monieta* Selection of Diagnostic Symptoms and Injection Subsystems of Marine Reciprocating Internal Combustion Engines, *Appl. Sci*, 2019, No. 9 (8), pp. 1540. Available at: <https://doi.org/10.3390/app9081540>.

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

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; 81, Petrovsky, street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.317

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-55-68

Х.М.Б. Нсуе, В.П. Федосов, С.В. Кучерявенко

ЦИФРОВОЙ УМНОЖИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ LABVIEW

Статья нацелена на измерение параметров гармонического процесса умножительно-преобразовательным методом. Моделирование осуществилось благодаря использованию программной среды LabVIEW, применительно к цифровому умножительно-преобразовательному методу, главные моменты которого представим в виде прогрессирующей цепочки: а) выработка первого гармонического процесса; б) перемножение показателя первого гармониче-

ского процесса на четыре; в) поступление $[s_1(t)]^4$ к полосовому фильтру ПФ1, настроенному на наивысшую частоту, в данном случае $4\omega_0$. з) Параллельно с помощью генератора Г2 генерируется второй исходный сигнал $s_2(t)$; д) Это колебание испытывает возведение в пятую степень, е) используя фильтр ПФ2, настроенный на частоту $5\omega_0$, выделяем пятую гармонику ё) Полученные на выходах фильтров сигналы складываются и результат суммы подвергается нелинейному преобразованию ж) Отсюда из результирующего квадрата суммы используя полосовой фильтр ПФ3, извлекаем лишь низкочастотную гармонику, обладающую частотой ω_0 з) Затем посредством преобразования Гильберта из гармоники извлекаем полную мгновенную фазу и она становится объектом операции производной, что приводит нас к получению функции мгновенной частоты, характеризующейся фиксированной дисперсией. и) Результирующий после использования умножительно-преобразовательных операций закон флуктуаций частоты сравнивается с заданной частотой, и приступаем к определению математического ожидания и среднеквадратического отклонения. Заключение о нестабильности частоты делается исходя из полученных расхождений. Применив нелинейные преобразования колебаний, похожих по нестабильности генераторов и получив тем же путём колебания заданной частоты, устанавливается измеряемая нестабильность по частоте. Если применить этот способ много раз к колебаниям высокостабильных устройств, удастся выработать колебание с повышенной нестабильностью, а затем оценить ее доступным измерительным оборудованием. Таким образом, обходим без больших затрат, выполняя эту операцию. Далее определить первоначальную нестабильность формулами, приведенными в этой статье.

Среднеквадратическое отклонение; фазовый шум; умножительно-преобразовательные операции; математическое ожидание; гармоническое колебание; возведение колебания в степень; кратковременная нестабильность частоты.

J.M.B. Nsue, V.P. Fedosov, S.V. Kucheryavenko

DIGITAL MULTIPLIER-CONVERTING METHOD FOR MEASURING FREQUENCY INSTABILITY USING THE LABVIEW PROGRAMMING ENVIRONMENT

The article is aimed at measuring the parameters of the harmonic process by the multiplication-conversion method. The simulation was carried out through the use of the LabVIEW software environment, as applied to the digital multiplier-conversion method, the main points of which are presented in the form of a progressive chain: a) development of the first harmonic process; b) the multiplication of the indicator of the first harmonic process by four; c) the arrival of $[s_1(t)]^4$ to the band-pass filter PF1 tuned to the highest frequency, in this case, $4\omega_0$ d) simultaneously, using the generator Г2, a second source signal $s_2(t)$ is generated; e) This oscillation is raised to the fifth power, f) using the filter PF2 tuned to a frequency of $5\omega_0$, select the fifth harmonic g) The signals received at the outputs of the filters are added and the result of the sum is subjected to nonlinear transformation h) Then, from the resulting square of the sum of the signals and using a band-pass filter PF3, we extract only the low-frequency harmonic with the frequency ω_0 i) Then, using the Hilbert transform, we extract the total instantaneous phase from the harmonic and it becomes the object of the derivative operation, which leads us to obtain the instantaneous frequency function, characterized by a fixed dispersion. j) The law of fluctuations of the frequency resulting from the use of multiplication-conversion operations is compared with a given frequency, and we proceed to determine the mathematical expectation and standard deviation. The conclusion about the frequency instability is based on the discrepancies obtained. Applying nonlinear transformations of oscillations of oscillators similar in instability and obtaining the oscillations of a given frequency in the same way, the measured frequency instability is established. If you apply this method many times to the oscillations of highly stable devices, you can develop an oscillation with increased instability, and then evaluate it with available measuring equipment. Thus, we bypass without high costs by performing this operation. Then, determine the initial instability by the formulas given in this article.

Phase noise; multiplier-conversion operations; mathematical expectation; and harmonic oscillator; raising the oscillation to a power; short-term frequency instability; and standard deviation.

Введение. Прецизионные генераторы играют важную роль в высокоскоростной связи, навигации, космическом слежении, зондировании дальнего космоса и во многих других важных сферах применения. Измерение частоты их сигналов, а также обеспечение её стабильность представляют собой актуальные задачи в модернизированных радиоэлектронных системах. Приборы, способные совершить эти измерения это частотомеры, имеющие определенные степени чувствительности. В настоящее время наилучшие измерительные приборы в силах обнаружить относительную нестабильность, расположенную в пределах от 10^{-9} – 10^{-11} . Самые стабильные квазигармонические колебания, гарантирующие синхронизацию цифровых сетей связи, имеют относительную нестабильность частоты порядка от 10^{-13} до 10^{-14} и меньше за 2 сек.

В последние годы нередко встречаются требования обеспечить высокую степень фазового шума в передатчиках и приемниках сетей связи, сосредоточенные на мощности передатчиков, шумовой температуре приемников и диапазоне частот запланированных объектов слежения. Например, требование гарантировать 0,2 рад в диапазоне частот дециметровых и сантиметровых длин волн для ширины полосы двухстороннего шума 5 Гц применительно к фазовой нестабильности каких-то приемных устройств [1].

Начнем с выполнением самых важных теоретических выкладок, которые лежат в основе предлагаемого умножительно-преобразовательного метода измерения очень незначительной нестабильности частоты. На первом этапе, алгоритм измерения, в этой статье, для простоты, рассмотрим на примере одного из частных случаев применения данного метода, когда объект исследования является двумя гармоническими колебаниями, с приблизительно одинаковой неустойчивостью, показатель n выберем равным четырем $n = 4$.

В этой работе этот способ будет программно осуществляться благодаря переходу в измерение КНЧ лишь единого высокостабильного генератора, независимо от значения показателя n , к которому подвергается сигнал.

Таким образом, основная идея первого способа для измерения КНЧ состоит в том, что при наличии два гармонических сигналов

$$s_1(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \varphi_1(t)] \quad \text{и} \quad s_2(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \varphi_2(t)],$$

отличающихся лишь их фазовыми шумами, в то время как оставшиеся параметры между собой являются по их характеристикам оценки эквивалентными. Реализации $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ представляют собой случайные функции фазовой неустойчивости пары колебаний. Источники этих колебаний представляют собой независимые, но однотипные генераторы. Фазовые неустойчивости данных реализаций численно, приблизительно одинаковы, так как их дисперсиями σ^2 равны, как основной параметр, по которому принято оценить количественно масштаб фазовой неустойчивости любого генератора. Приведённые колебания становятся объектом преобразования, ниже приведенным алгоритмом, рис. 1 [2].

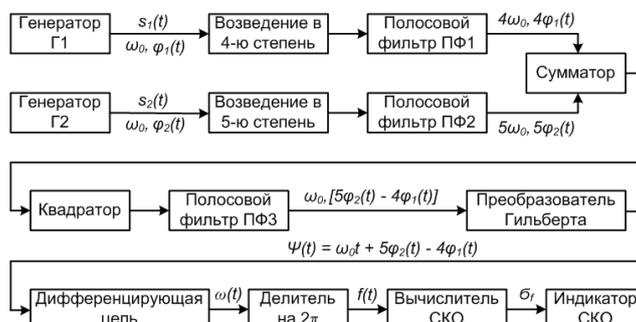


Рис. 1. Структурная схема первого умножительно-преобразовательного алгоритма измерения нестабильности частоты

Таким образом, обладаем первым исходным сигналом $s_1(t)$ на выходе генератора Г1 с некой фазовой неустойчивостью $\varphi_1(t)$:

$$s_1(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \varphi_1(t)], \quad (1)$$

численно фазовая неустойчивость $\varphi_1(t)$ определяется СКО σ . Показатель сигнала $s_1(t)$ умножается на четыре [3]

$$[s_1(t)]^4 = A_0^4 \cos^4[\omega_0 t + \varphi_1(t)]. \quad (2)$$

Простейшими тригонометрическими преобразованиями было показано, что спектр колебания $[s_1(t)]^4$ обладает постоянной составляющей и двумя четными гармониками на частотах $2\omega_0$ и $4\omega_0$:

$$[s_1(t)]^4 = 3 \frac{A_0^4}{8} + \frac{A_0^4}{2} \cos[2\omega_0 t + 2\varphi_1(t)] + \frac{A_0^4}{8} \cos[4\omega_0 t + 4\varphi_1(t)]. \quad (3)$$

Полученное колебание $[s_1(t)]^4$ поступает к полосовому фильтру ПФ1, настроенному на наивысшую, в данном случае частоту $4\omega_0$. Этот фильтр пропускает лишь гармоническую составляющую, частота и мгновенная фаза которой $4\omega_0$ и $4\varphi_1(t)$ соответственно.

$$U_1(t) = U_0 \cos[4\omega_0 t + 4\varphi_1(t)]. \quad (4)$$

Нужно подчеркнуть, что неустойчивость фазового шума данного сигнала ($\sigma_1 = 4\sigma$) стала четверной нестабильности фазового шума первоначального сигнала $s_1(t)$.

Параллельно с помощью генератора Г2 генерируется второй исходный сигнал $s_2(t)$ не меняя частоту ω_0 и с примерно идентичным количеством по σ случайной мгновенной фазы $\varphi_2(t)$, но без корреляции с $\varphi_1(t)$:

$$s_2(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \varphi_2(t)]. \quad (5)$$

Это колебание испытывает возведение в пятую степень

$$[s_2(t)]^5 = A_0^5 \cos^5[\omega_0 t + \varphi_2(t)]. \quad (6)$$

Спектр результирующего сигнала будет обладать тремя гармониками на частотах не кратных двум ω_0 , $3\omega_0$ и $5\omega_0$:

$$[s_2(t)]^5 = \frac{5A_0^5}{8} \cos[\omega_0 t + \varphi_2(t)] + \frac{5A_0^5}{16} \cos[3\omega_0 t + 3\varphi_2(t)] + \frac{A_0^5}{16} \cos[5\omega_0 t + 5\varphi_2(t)]. \quad (7)$$

Подобно первому событию используя фильтр ПФ2, настроенный на частоту $5\omega_0$, выделяем пятую гармонику и выход фильтра ПФ2 пропускает исключительно гармоническую составляющую с наивысшей частотой $U_2(t) = U_0 \cos[5\omega_0 t + 5\varphi_2 t]$. зафиксируем, что неустойчивость фазового шума этого сигнала ($\sigma_2 = 5\sigma$) стала упятеренной нестабильности фазового шума первоначального сигнала $s_2(t)$. Считаем для простоты, что амплитуды составляющих $U_1(t)$ и $U_2(t)$ на выходах фильтров ПФ1 и ПФ2 эквивалентны и равны U_0 .

Полученные на выходах фильтров сигналы складываются:

$$U_1(t) + U_2(t) = U_0 \{ \cos[4\omega_0 t + 4\varphi_1(t)] + \cos[5\omega_0 t + 5\varphi_2(t)] \} \quad (8)$$

и результат суммы подвергается нелинейному преобразованию:

$$[U_1(t) + U_2(t)]^2 = U_0^2 \{ \cos^2[4\omega_0 t + 4\varphi_1(t)] + \cos^2[5\omega_0 t + 5\varphi_2(t)] + 2 \cos[5\omega_0 t + 5\varphi_2 t] \cos[4\omega_0 t + 4\varphi_1 t] \} = U_0^2 \{ \frac{1}{2} \cos[8\omega_0 t + 8\varphi_1(t)] + \frac{1}{2} \cos[10\omega_0 t + 10\varphi_2 t] + \cos[9\omega_0 t + 5\varphi_2(t) + 4\varphi_1(t)] \} + U_0^2 + \frac{1}{2} U_0^2 \cos[8\omega_0 t + 8\varphi_1(t)] + \frac{1}{2} U_0^2 \cos[10\omega_0 t + 10\varphi_2 t].$$

Отсюда из результирующего квадрата суммы сигналов и используя полосовой фильтр ПФЗ, извлекаем лишь низкочастотную гармонику, которая состоит из разностной частоты $\omega_0 = 5\omega_0 - 4\omega_0$, соответствующей частоте первоначальных сигналов [4, 5], и которая включает в себя разностную фазу: $[5\varphi_2(t) - 4\varphi_1(t)]$.

Затем посредством преобразования Гильберта из гармоники извлекаем полную мгновенную фазу

$$\Psi(t) = \omega_0 t + 5\varphi_2(t) - 4\varphi_1(t). \quad (9)$$

Далее полная мгновенная фаза становится объектом операции производной, что приводит нас к получению функции мгновенной частоты

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Psi(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \omega_0 + \frac{d[5\varphi_2(t) - 4\varphi_1(t)]}{dt} \right\} \quad (10)$$

некой смеси пары сигналов с колеблющимися случайно фазами, характеризующаяся фиксированной дисперсией: аддитивная дисперсия линейного множества пары случайных реализаций находится, как приведено ниже:

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \pm 2R\sigma_1\sigma_2, \quad (11)$$

где σ_1 и σ_2 – соответственно СКО случайных мгновенных изменений фазы $4\varphi_1(t)$ и $5\varphi_2(t)$; R – индекс корреляции случайных реализаций $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$.

Случайные реализации $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ представляют собой независимые случайные функции, а значит, индекс корреляции R между ними можно заменить нулём и получить

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2. \quad (12)$$

Увеличивая фазовую нестабильность за счёт возведения колебаний в 4 и в 5 степень соответственно, получаем

$$\sigma_1 = 4\sigma \text{ и } \sigma_2 = 5\sigma. \quad (13)$$

Следует что СКО фазовой нестабильности совокупности двух реализаций:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{16\sigma^2 + 25\sigma^2} = 6,4\sigma. \quad (14)$$

Индекс 6,4 в выражении (14) означает, что неустойчивость частоты сигнала повысилась во 6,4 раз за счет реализованных трансформаций сравнительно с неустойчивостью первоначальных колебаний с источников Г1 и Г2.

Итак, был изучен алгоритм оценки очень мелких значений кратковременной нестабильности частоты, который лежит в основе умножении флуктуаций частоты параллельно с умножением самой частоты. В итоге труда алгоритма, делаем вывод о том, что неустойчивость частоты неоднородного сигнала увеличилась в 6,4 раза по среднеквадратическому отклонению и в 41 раз по дисперсии. Это уже есть положительный итог, но ниже будем рассматривать еще один, более обобщенный принцип осуществления данного алгоритма.

1. Второй способ реализации умножительно-преобразовательного алгоритма измерения КНЧ и его осуществления в LabVIEW

1.1. Основные положения. До этого уже было продемонстрировано, что очень малую КНЧ высокостабильных сигналов нельзя оценить сразу в границах секундного интервала времени. следовательно в реальности чтобы решить эту измерительную задачу нужно применить представленные в настоящей статье **умножительно-преобразовательные приемы**, в основе которых формируются алгоритмы и осуществляется решение задачи оценки КНЧ. Данный алгоритм положен в основе ряда ступенчато трансформаций первоначального сигнала с желанием повысить неустойчивость частоты на порядки. После соответствующего увеличения нестабильности частоты мы можем совершить ее оценку ординарными способами дискретного счета, и в заключительной стадии посредством соответствующего пересчета найти итоговую неустойчивость частоты первоначального колебания.

Тут нужно подчеркнуть, что и сама КНЧ и ее количественная оценка, полученная посредством реальных или условных экспериментов это случайные величины. Таким образом, оценка КНЧ сама обладает определенной дисперсией, и ее можно представить в цифрах лишь используя вероятностные характеристики – математического ожидания и СКО. По этой причине все виртуальные приборы, которые используются для решения задач в данной статье, связаны со случайными величинами, из этого вытекает невозможность определения, например коэффициента увеличения неустойчивости частоты без погрешностей, т.к. он тоже случайный параметр. Кстати эта работа и не посвящена абсолютно точной оценке КНЧ, да это практически и невозможно. Основное – это оценить уровень существующей нестабильности, другими словами, определить в каких пределах она расположена, например, относительная КНЧ примерно равна 10^{-6} , или 10^{-8} , или 10^{-12} .

В данной статье рассматривается новейший алгоритм умножительно-преобразовательного метода, структурная схема которого показана на рис. 2.

Подчеркнем, что отличие между ранее представленным алгоритмом, соответствующая схема которого приведена на рис. 1 и где были исследованы два генератора с примерно идентичной неустойчивостью и возведением в степень 4 и 5 первоначальных сигналов, и алгоритмом на рис. 2 в том, что второй алгоритм, имеет два существенных достоинства.

С одной стороны, он даёт возможность оценить КНЧ лишь одного генератора, а не пары идентичных генераторов, что снимает необходимость иметь к эксперименту два одинаковых генератора, имеющих реально высокой устойчивостью, что заставило бы, как минимум, нас делать большие материальные затраты, чтобы приобрести эти генераторы. С другой стороны, данный алгоритм способствует решению задачи увеличения нестабильности в определённое число раз для выбранного значения показателя степени n . В то время как в степень n возводится одна половина случайного процесса $s(t)$, а вторая часть процесса возводится в степень $n+1$. Важно, что эта рамификация сигнала на две составляющие фактически способствует устранению взаимосвязи между этими половинами. Что приводит к обнулению коэффициента корреляции между ними. А это, в свою очередь, даёт возможность считать корректным выражение (12) для нахождения аддитивной дисперсии.

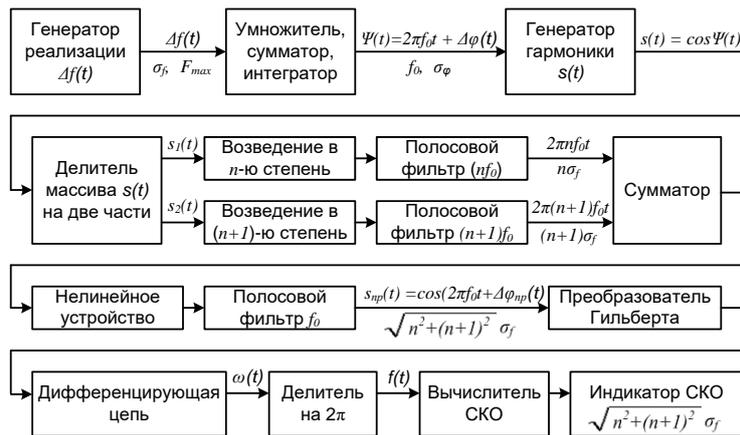


Рис. 2. Структурная схема модернизированного алгоритма измерения нестабильности частоты

1.2. Описание ВП4 «УПМ для заданной $f(t)$ и n ». Выше представленный алгоритм является фундаментом виртуального прибора ВП4 «УПМ для заданной $f(t)$ и n ». Лицевая панель ВП4 приведена на рис. 3, а блок-диаграмма – на рис. 4.

Исходные данные к работе ВП4, как и прежде, являются частотой дискретизации F_d и длительностью реализации T_p , значением центральной частоты сигнала f_0 и параметрами, определяющими неустойчивость частоты сигнала, а именно ее СКО σ_f и максимальной частотой F_{max} в спектре мгновенной частоты $f(t)$. Кроме этого, фиксируется значение показателя степени n и $n + 1$, которым будут подвергаться процессы сигнала $s(t)$ для гарантирования производительности умножительно-преобразовательного метода (УПМ), и в качестве результата этого незначительная неустойчивость частоты сигнала будет увеличиваться в фиксированное число раз.

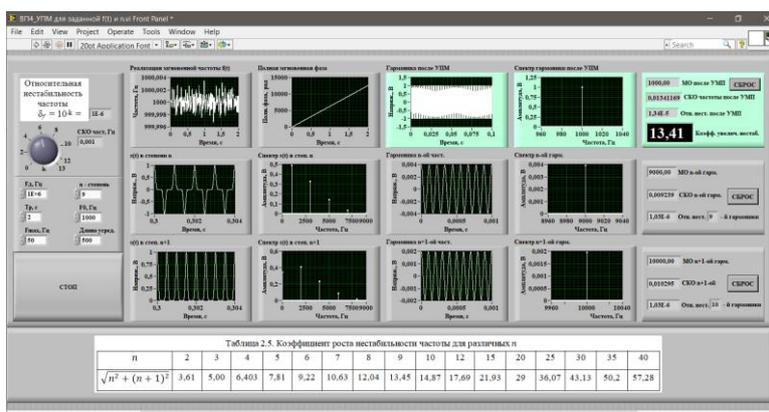


Рис. 3. Лицевая панель ВП4 «УПМ для заданной $f(t)$ и n »

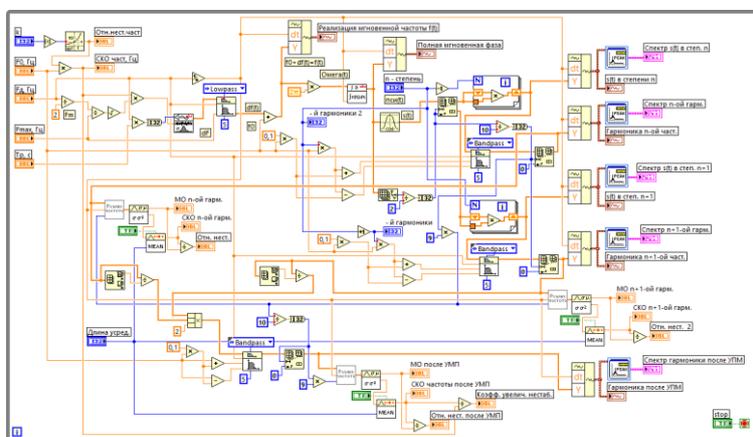


Рис. 4. Блок-диаграмма ВП4 «УПМ для заданной $f(t)$ и n »

Ограничено опишется процесс функционирования ВП4, подчеркивая основные шаги. Для начала осуществляется формирование случайной функции времени, которая имеет физическую интерпретацию флуктуационных трансформаций частоты $\Delta f(t)$. Она включает в себя заданное значение СКО σ_f и максимальную частоту F_{max} . Далее получаем реализацию мгновенной частоты $f(t) = f_0 + \Delta f(t)$, реализация которой выводится на индикатор. Затем совершается переход в круговую частоту $\omega(t) = 2\pi f(t)$, после этого посредством операции интегрирования получаем полную

мгновенную фазу $\psi(t) = \int_0^t \omega(t)dt$, временная диаграмма которой выводится на лицевую панель. В конце начальной стадии вырабатывается сигнал $s(t) = \cos\psi(t) = \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)]$, имеющий заданную частотную неустойчивость σ_f .

Чтобы осуществить умножительно-преобразовательный метод нужно обладать двумя совокупностями отсчетов сигнала $s(t)$ с идентичными частотами f_0 и с эквивалентными неустойчивостями частоты σ_f , которую требуется оценить по окончанию эксперимента. Чтобы получить такие совокупности осуществлённый на предыдущей стадии массив значений сигнала $s(t)$ делится на две равные части, одна от начала и до середины массива, вторая от середины до конца. В итоге имеются два некоррелированных сигнала, первый из них подвергается операции возведения в степень n , а второе – в степень $n + 1$. Данная трансформация сигналов является причиной появления гармоник на кратных частотах, допустим, что n четное, тогда возникнут гармоники на частотах $2f_0, 4f_0, \dots, nf_0$, а для $n + 1$ на нечетных частотах $3f_0, 5f_0, \dots, (n + 1)f_0$. Временные и спектральные реализации сигналов, полученных путём возведения в степень, выводятся на лицевую панель прибора ВП4.

До этого было продемонстрировано, что абсолютная частотная флуктуация высоких гармоник с частотами nf_0 и $(n + 1)f_0$ повышается соответственно в n и $n + 1$ раз. Данные высокие гармоники извлекаются из сигналов благодаря соответствующим полосовым фильтрам, и из полученных массивов вычитается начальная часть элементов (10%), в которой происходят переходные процессы. Временные и спектральные реализации гармоник, очищенных от переходных процессов пропускаются на индикатор. После этого колебания становятся объектом преобразования Гильберта, которое позволяет получить полную мгновенную фазу сигналов, к ней применяется численное дифференцирование, и находятся математическое ожидание и СКО мгновенной частоты обоих колебаний со средними частотами nf_0 и $(n + 1)f_0$. Следовательно, измеряется неустойчивость частоты этих колебаний.

На следующей стадии гармонические колебания с частотами nf_0 и $(n + 1)f_0$ испытывают на себя мультипликативную операцию, и на выходе умножителя формируются сигналы разностной f_0 и суммарной $(2n + 1)f_0$ частот. Применяя полосовая фильтрация, извлекается гармоническое колебание разностной частоты, частота которого равна частоте первоначального колебания. Подобно вышеуказанному случаю, неустойчивость частоты этого колебания приведет неустойчивость первоначального колебания σ_f . Она будет оцениваться по формуле:

$$\sigma_{f_{\text{упм}}} = \sigma_f \sqrt{n^2 + (n + 1)^2}. \quad (15)$$

В табл. 1 приведены значения коэффициента увеличения неустойчивости частоты для различных значений n .

Таблица 1

Коэффициент роста неустойчивости частоты для различных n

n	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sqrt{n^2 + (n + 1)^2}$	3,61	5,00	6,403	7,81	9,22	10,63	12,04	13,45
n	10	12	15	20	25	30	35	40
$\sqrt{n^2 + (n + 1)^2}$	14,87	17,69	21,93	29	36,07	43,13	50,2	57,28

Видим, что по мере вырастания показателя степени n на единицу коэффициент нарастания неустойчивости частоты повышается на $1,4 \approx \sqrt{2}$. В случае если $n = 100$, тогда этот коэффициент будет равен 142,13, а если хочется повысить неустойчивость в 100 раз, тогда нужно присвоить $n = 70$, и мы увидим, что значение коэффициента будет 99,7.

Далее в ВП4 на лицевой панели представляется временная и спектральная диаграмма сигнала, являющегося результатом всех трансформаций. Находится мгновенная частота этого сигнала и измеряем полученную частотную нестабильность $\sigma_{f_{\text{ум}}}$.

1.3. Результаты моделирования с использованием ВП4. Тестирование и первые итоги производительности прибора ВП4 продемонстрировали, что коэффициенты увеличения неустойчивости частоты, которые получились во время испытания прибора для всех n из табл. 1, с высокой точностью совпадают с представленными в таблице значениями. Но тут нужно выразить несколько важных суждений.

Во-первых, нельзя получить абсолютно точное совпадение фактических коэффициентов повышения неустойчивости, полученных во время моделирования, с выкладными значениями в табл. 1. Оно связано, в первую очередь, непредсказуемым характером поведения мгновенной частоты $f(t)$ и случайными оценками ее СКО, которые получаются посредством усреднения окончательных реализаций мгновенной частоты. Например, в ходе моделирования в случае $n = 9$ в течение 10 первых минут, коэффициент увеличения колебался в пределах значений $13,25 \div 13,35$, а в течение следующих 10 минут флуктуировал в пределах значений $13,35 \div 13,40$. Как не крути, после 20-и минутной работы ВП4 разница между измеренным коэффициентом и расчетным из табл. 1 (для $n = 9$ расчетное значение коэффициента равно 13,45) не превышает 1 %. По всей видимости, это является вполне достаточной точностью, для определения уровня повышения неустойчивости и найти коэффициент обратного пересчета, чтобы установить фактической нестабильности частоты высокостабильных генераторов.

Во-вторых, выбирая значения входных параметров устройства нужно это делать компромиссно и осторожно. Например, при всех n из табл. 1 устройство полностью работало эффективно и давало очень близкие показания к расчетным значениям. Однако в случае когда $n = 70$, который принадлежит расчетному значению коэффициента нарастания неустойчивости, равному 100, ВП4 выдал фактически $150 \div 160$, а при $n = 100$ даёт то же повышение в 150 раз. Это говорит о том, что при очень великих значениях показателя степени, которой подвергаются сигналы, стабильность производительности устройства падает и использовать его корректно нельзя. Это наблюдается даже по значениям неустойчивости частоты 100-й и 101-й гармоник: когда относительная нестабильность составляет 10^{-3} , устройство показало у этих гармоник неустойчивость $1,6 \div 1,8$ на 10^{-3} . Тестирование производительности устройства при других, более мелких значениях n показало, что оно стабильно работает при $n = 20$ (коэффициент увеличения неустойчивости 26,17), при $n = 30$ (коэффициент 43,14), при $n = 40$ (коэффициент 57,28). А вот при $n = 50$ устойчивость падает, потому что неустойчивость частоты 50-й и 51-й гармоник внезапно увеличиваются. Следовательно, будем считать, что производительность устройства остаётся неизменной до $n = 40$.

В-третьих, ограничения, накладывавшиеся на частоту дискретизации и длительность реализации, с помощью которых определяется число элементов массивов и способствующие с достаточным объемом оперативной памяти ПК сравнительно быстро работе ВП4, уже оговаривались выше. Предлагается в ВП4 пользоваться частотой дискретизации 1 МГц, при длительности реализации 2 секунды. Значение средней частоты f_0 нужно брать так, чтобы соответствовало частоте дискретизации и задаётся в диапазоне $1 \div 20$ кГц. Наивысшая частота F_{max} у спектра мгновенной частоты сигнала должна определяться действующей скоростью изменения частоты реального генератора, однако, пока она нам неизвестна, в виртуальном генераторе она устанавливается равной $25 \div 50$ Гц. Между прочим, в случае

уменьшения максимальной частоты изменения частоты до $3 \div 5$ Гц, оценка СКО частоты будет обладать большой дисперсией, и устройство будет давать нестабильные и заниженные результаты.

В-четвертых, все ранее приведенные результаты получились при условии, что относительная нестабильность равна 10^{-3} и абсолютная нестабильность 1 Гц, это означает, что несущая частота была равна 1 кГц. Но основным этапом является эффективностью работы устройства ВП4 при сильно мелких неустойчивостях, для этого оно собственно и было разработано. Тестирование продемонстрировало, что ВП4 устойчиво совершает работу когда относительная нестабильность принимает значения вплоть до 10^{-9} , а если пытаться дальше ее уменьшить, мы сталкиваемся с некорректными результатами, в ходе определения СКО частоты сигнала. Получается, что при сильно незначительных среднеквадратических отклонениях СКО частоты, данный момент трансформации влечёт за собой некорректные результаты, другими словами, наблюдается существенная разница между заданной функцией мгновенной частоты и частотой, полученной с применением Гильбертского преобразования. Сделанные выводы подтверждаются графиками приведённых функций для двух значений СКО частоты, представленными на рис. 5 и 6. Ниже исследуется причина этой расхожимости.

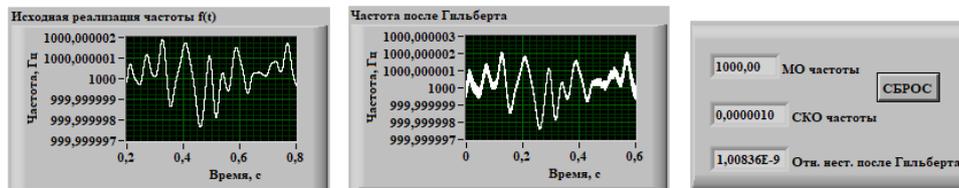


Рис. 5. Графики заданной и полученной частоты при $\delta_f = 10^{-9}$

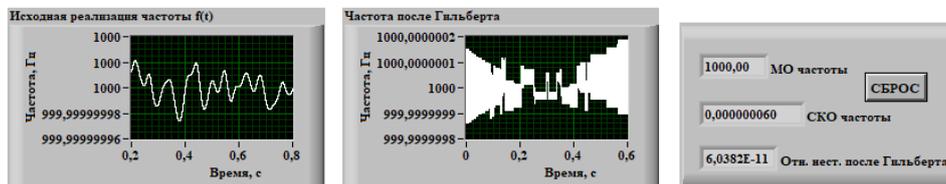


Рис. 6. Графики заданной и полученной частоты при $\delta_f = 10^{-11}$

Видим, что при $\delta_f = 10^{-11}$ временная реализация мгновенной частоты, которая получилась путём преобразования Гильберта, значительно отклоняется от исходной функции частоты. Это влечёт за собой превышение определенного при обработке этой функции значения СКО ожидаемое в 6 раз, что действительно представляет собой грубую погрешность расчётов в устройстве ВП4. Если установить относительную нестабильность $\delta_f = 10^{-10}$ также видим некое отличие между входным СКО и его значением, полученным в программе – тут устройство показало $\delta_f = 1,15 \cdot 10^{-10}$, т.е. разница составила 15 %.

Проделанные анализы свидетельствуют, что при сильно высокостабильных по частоте колебаниях ($\delta_f = 10^{-10}$ и ниже) нужно конкретизировать и улучшать алгоритм оценки СКО частоты, однако эта задача не является объектом исследования в этой статье. Но планируется дальше провести исследования по этому направлению. При реальных условиях в настоящее время мы не работаем с генераторами, которые обладают нестабильностью частоты ниже 10^{-9} и для решения поставленных в данной статье задач эффективности ВП4 хватает.

В итоге данной работы приведём результаты анализа, которые способствуют установлению взаимосвязи между заданной нестабильностью частоты и максимально возможным значением степени n , которой сигнал подвергается, чтобы осуществить УПМ. До этого было сказано, что устройство сохраняет свою работоспособность до $n = 40$, а когда значения n большие, амплитуды n и $n + 1$ гармоник грубо уменьшаются, колеблются во времени и является причиной существенного и неоправданного нарастания частотных флуктуаций. Но с занижением заданной относительной нестабильности будет податься и максимально возможное значение n . Результаты этой зависимости представлены в табл. 2.

Таблица 2

Предельное значение n для заданной нестабильности δ_f

δ_f	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
n_{max}	41	39	35	32	27	22	20	-

Выводы:

1. Как для первого алгоритма, так и для второго, при заданном показателе увеличения нестабильности частоты колебаний n , коэффициент нарастания флуктуации частоты один и тот же.
2. При моделировании в *LabVIEW*, ВП4 устойчиво совершает работу когда относительная нестабильность принимает значения вплоть до 10^{-9} (не меньше).
3. Второй алгоритм преимущественнее первого тем, что при нём требуется только один генератор для увеличения и измерения его нестабильности, а не два как видно при первом. А это экономически выгодно.
4. Ограничение второго пункта связано с тем, что при занижении уровня относительной нестабильности частоты δ_f ниже 10^{-9} , мы попадаем в зону собственных шумов преобразований Гильберта и Фурье.
5. Все ранее приведенные результаты получились при условии, что относительная нестабильность равна $\delta_f = 10^{-3}$ и абсолютная нестабильность $\sigma_f = 1$ Гц, это означает, что несущая частота была равна $f = 1$ кГц
6. Для обоих алгоритмов, флуктуации частоты колебаний увеличились в 6,4 раза по среднеквадратическому отклонению и в 41 раз по дисперсии, при выбранном $n = 4$. Что и ожидалось. Если применить этот способ много раз к колебаниям высокостабильных генераторов, можно выработать колебание с повышенной нестабильностью, а затем оценить её доступным измерительным оборудованием. В этом суть умножительно-преобразовательного метода (УПМ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нсуе Х.М.Б., Федосов В.П., Терешков В.В.* Оценка нестабильности частоты с помощью показателей во временной области // Ростовский научный журнал: сетевой журнал. – 2016. – Т. 4. – Вып. 6. – С. 5-15.
2. *Нсуе Х.М.Б., Федосов В.П., Терешков В.В.* Измерение нестабильности частоты высокостабильных генераторов с помощью показателей во временной области // Ростовский научный журнал: сетевой журнал – 2016. – Т. 4. – Вып. 7. – С. 63-70.
3. *Нсуе Х.М.Б., Федосов В.П.* Цифровой алгоритм измерения кратковременной нестабильности частоты высокостабильных генераторов умножительно-преобразовательным методом // Тенденции развития науки и образования: Сб. науч. трудов, по материалам XV междунар. науч. конф. 25 июня 2016 г. – Изд-во НИЦ «Л-Журнал», 2016. – Ч. 3. – С. 16-18.
4. *Нсуе Х.М.Б., Федосов В.П., Кучерявенко С.В.* Измерение кратковременной нестабильности частоты сверхстабильных квазигармонических сигналов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1.
5. *Нсуе Х.М.Б., Федосов В.П., Кучерявенко С.В.* Экспериментальное измерение относительной нестабильности частоты колебаний цифровым умножительно-преобразовательным методом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5 (207). – С. 69-80.

6. *Нсue X.M.B., Кучерявенко С.В.* Кратковременная нестабильность частоты квазигармонических сигналов // Сб. трудов 18-ой Национальной молодежной научно-практической конференции «Фундаментальные исследования с применением компьютерных технологий в науке, производстве, социальных и экономических процессах», г. Новочеркасск, 2018.
7. *Федосов В.П., Муравицкий Н.С., Кучерявенко С.В.* Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Радиотехника. – 2008. – № 11. – С. 195-204.
8. *Кучерявенко С.В., Рыжов В.П.* Использование технологии National Instruments для моделирования случайных процессов и их преобразований // Матер. Международной научной конференции «Технологии National Instruments в науке, технике и образовании». – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2006. – С. 15-17.
9. *Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V.* Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Architectures, Algorithms, and Applications. – Baltimore: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2016. – P. 98720G.
10. *Федосов В.П., Тарасов С.П., Пивнев П.П., Воронин В.В., Кучерявенко С.В., Лegin А.А., Ломакина А.В., Франц В.А.* Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов: монография. – Ростов-на-Дону – Таганрог, 2018.
11. *Кучерявенко С.В.* Спектры звуковых сигналов в базисе Хаара // Известия ТРТУ. – 1999. – № 2 (12). – С. 43.
12. *Кучерявенко С.В.* Свойства симметрии сигналов и их отображение в различных базисах // Известия ТРТУ. – 1998. – № 3 (9). – С. 14.
13. *Mengali U., D'Andrea A.* Synchronization Techniques for Digital Receivers. – New York: Plenum Press, 1997. – 529 p.
14. *Decina M., deJulio U.* International Activities on Network Synchronization for Digital Communication // IEEE International Communications Conference. – 1979.
15. *Abate J.E., Brandenburg L.H., Lawson J.C., Ross W.L.* The Switched Digital Network Plan // Bell System Technical Journal. – September 1977. – P. 1297-1320.
16. *Pierce J.R.* Synchronizing Digital Networks // Bell System Technical Journal. – March 1969. – P. 615-636.
17. *Collins A.A. Pedersen R.D.* Telecommunications, A Time for Innovation, Merle Collins Foundation, Dallas, Texas 1973.
18. *Byrne C.J., Karafin B.J., Robinson D.B.* Systematic Jitter in a Chain of Digital Repeaters // Bell System Technical Journal. – November 1963. – P. 2679- 2714.
19. *Gardner F.M.* Phaselock Techniques. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, New York, 1979.
20. *Sunde E.D.* Self-Timing Regenerative Repeaters // Bell System Technical Journal. – July 1957. – P. 891-938.
21. *Duttweiler D.L.* The Jitter Performance of Phase-Locked Loops Extracting Timing from Baseband Data Waveforms // Bell System Technical Journal. – January 1976. – P. 37-58.
22. Impact of Jitter on the Second Order Digital Multiplex at 6312 kbit/s // AT&T Submittal to CCITT study group on jitter, Green Book. – Vol. 3. – P. 861-869.
23. *Muratani T. Saitoh H.* Synchronization in TDMA Satellite Communications // IEEE International Conference on Communications. – 1979. – P. 11.4.1-11.4.6.

REFERENCE

1. *Nsue Kh.M.B., Fedosov V.P., Tereshkov V.V.* Otsenka nestabil'nosti chastoty s pomoshch'yu pokazateley vo vremennoy oblasti [Estimation of frequency instability using indicators in the time domain], *Rostovskiy nauchnyy zhurnal: setevoy zhurnal* [Rostov Scientific Journal: Network Journal], 2016, Vol. 4, Issue 6, pp. 5-15.
2. *Nsue Kh.M.B., Fedosov V.P., Tereshkov V.V.* Izmerenie nestabil'nosti chastoty vysokostabil'nykh generatorov s pomoshch'yu pokazateley vo vremennoy oblasti *Rostovskiy nauchnyy zhurnal: setevoy zhurnal* [Rostov Scientific Journal: Network Journal], 2016, Vol. 4, Issue 7, pp. 63-70.

3. *Nsue Kh.M.B., Fedosov V.P.* TSifrovoy algoritm izmereniya kratkovremennoy nestabil'nosti chastoty vysokostabil'nykh generatorov umnozhitel'no-preobrazovatel'nym metodom [A digital algorithm for measuring the short-term frequency instability of highly stable generators by the multiplication-converting method], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya: Sb. nauch. trudov, po materialam XV mezhdunar. nauch. konf. 25 iyunya 2016 g.* [Trends in the Development of Science and Education: Sat. scientific proceedings, according to the materials of the XV int. scientific conf. June 25, 2016]. Izd-vo NITS «L-Zhurnal», 2016, Part 3, pp. 16-18.
4. *Nsue Kh.M.B., Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V.* Izmerenie kratkovremennoy nestabil'nosti chastoty sverkhstabil'nykh kvazigarmonicheskikh signalov [Measurement of short-term frequency instability of superstable quasiharmonic signals], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of the Don], 2018, No. 1.
5. *Nsue Kh.M.B., Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V.* Eksperimental'noe izmerenie odnositel'noy nestabil'nosti chastoty kolebaniy tsifrovym umnozhitel'no-preobrazovatel'nym metodom [Experimental measurement of frequency relative instability of oscillations by digital multiplier-converting method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5 (207), pp. 69-80.
6. *Nsue Kh.M.B., Kucheryavenko S.V.* Kratkovremennaya nestabil'nost' chastoty kvazigarmonicheskikh signalov [Short-term frequency instability of quasi-harmonic signals], *Sb. trudov 18-oy Natsional'noy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fundamental'nye issledovaniya s primeneniem komp'yuternykh tekhnologiy v nauke, proizvodstve, sotsial'nykh i ekonomicheskikh protsessakh», g. Novochoerkassk, 2018* [Proceedings of the 18th National Youth Scientific and Practical Conference "Fundamental Research Using Computer Technologies in Science, Production, Social and Economic Processes", Novochoerkassk, 2018].
7. *Fedosov V.P., Muravitskiy N.S., Kucheryavenko S.V.* Povyshenie effektivnosti radiosvyazi v releevskom kanale na osnove antennoy reshetki [Increasing the efficiency of radio communication in the relay channel based on antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radiotechnics], 2008, No. 11, pp. 195-204.
8. *Kucheryavenko S.V., Ryzhov V.P.* Ispol'zovanie tekhnologii National Instruments dlya modelirovaniya sluchaynykh protsessov i ikh preobrazovaniy [Using national Instruments technology for modeling random processes and their transformations], *Mater. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Tekhnologii National Instruments v nauke, tekhnike i obrazovanii»* [Proceedings of the International scientific conference "National Instruments Technologies in science, technology and education"]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2006, pp. 15-17.
9. *Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V.* Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Architectures, Algorithms, and Applications. Baltimore: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2016*, pp. 98720G.
10. *Fedosov V.P., Tarasov S.P., Pivnev P.P., Voronin V.V., Kucheryavenko S.V., Legin A.A., Lomakina A.V., Frants V.A.* Seti svyazi dlya podvodnykh avtonomnykh robotizirovannykh kompleksov: monografiya [Communication networks for underwater autonomous robotic systems, monograph]. Rostov-on-Don – Taganrog, 2018.
11. *Kucheryavenko S.V.* Spektry zvukovykh signalov v bazise Khaara [Spectra of sound signals in the Haar basis], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 1999, No. 2 (12), pp. 43.
12. *Kucheryavenko S.V.* Svoystva simmetrii signalov i ikh otobrazhenie v razlichnykh bazisakh [Symmetry properties of signals and their display in various bases], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 1998, No. 3 (9), pp. 14.
13. *Mengali U., D'Andrea A.* Synchronization Techniques for Digital Receivers. New York: Plenum Press, 1997, 529 p.
14. *Decina M., deJulio U.* International Activities on Network Synchronization for Digital Communication, *IEEE International Communications Conference*, 1979.
15. *Abate J.E., Brandenburg L.H., Lawson J.C., Ross W.L.* The Switched Digital Network Plan, *Bell System Technical Journal*, September 1977, pp. 1297-1320.
16. *Pierce J.R.* Synchronizing Digital Networks, *Bell System Technical Journal*, March 1969, pp. 615-636.
17. *Collins A.A. Pedersen R.D.* Telecommunications, A Time for Innovation, Merle Collins Foundation, Dallas, Texas 1973.

18. *Byrne C.J., Karafin B.J., Robinson D.B.* Systematic Jitter in a Chain of Digital Repeaters, *Bell System Technical Journal*, November 1963, pp. 2679- 2714.
19. *Gardner F.M.* Phaselock Techniques. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 1979.
20. *Sunde E.D.* Self-Timing Regenerative Repeaters, *Bell System Technical Journal*, July 1957, pp. 891-938.
21. *Duttweiler D.L.* The Jitter Performance of Phase-Locked Loops Extracting Timing from Base-band Data Waveforms, *Bell System Technical Journal*, January 1976, pp. 37-58.
22. Impact of Jitter on the Second Order Digital Multiplex at 6312 kbit/s, *AT&T Submittal to CCITT study group on jitter, Green Book*, Vol. 3, pp. 861-869.
23. *Muratani T. Saitoh H.* Synchronization in TDMA Satellite Communications, *IEEE International Conference on Communications*, 1979, pp. 11.4.1-11.4.6.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Нсue Хасинто Мба Бийе – Южный федеральный университет; e-mail: jacintonsue@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Некрасовский, 44; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Федосов Валентин Петрович – e-mail: vpfedosov@sfnedu.ru, кафедра теоретических основ радиотехники; профессор.

Кучерявенко Светлана Валентиновна – e-mail: svkucheryavenko@sfnedu.ru, кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

Nsue Jacinto Mba Biye – Southern Federal University; e-mail: jacintonsue@gmail.com; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; postgraduate student.

Fedosov Valentin Petrovich – e-mail: vpfedosov@sfnedu.ru, professor.

Kucheryavenko Svetlana Valentinovna – e-mail: svkucheryavenko@sfnedu.ru, associate professor.

УДК 621.372.81

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-68-78

Н.Н. Кисель, А.А. Ваганова, И.А. Ваганов

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА МОЛОКА ЭНЕРГИЕЙ СВЧ ПОЛЯ

Термообработка диэлектрических материалов и пищевых продуктов является одним из важных направлений развития производства различной продукции. Использование энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот для сушки, нагрева, размораживания и пастеризации пищевых продуктов является перспективным, поскольку такие технологии подходят обработки различных диэлектрических материалов и при этом являются эффективными и экологически чистыми. Несмотря на наличие множества разработок в сфере обработки материалов с помощью СВЧ, создание универсального устройства, подходящего для тепловой обработки любых материалов, затруднительно из-за разнообразия их форм и размеров, а также существенного различия электрофизических свойств диэлектриков. Поэтому в каждом конкретном случае требуется создавать оптимальную конструкцию устройства и выбирать вариант возбуждения электромагнитного поля. Данная работа посвящена моделированию поглощения энергии электромагнитного поля СВЧ в устройстве для пастеризации молока. С применением САПР FEKO построена 3D модель устройства и выполнено моделирование его работы. Проведено исследование влияния угла наклона кварцевых трубок на распределение электромагнитного поля в волноводе. Полученные результаты показывают, что большая часть мощности поглощается ближе к началу волновода, причем при увеличении угла наклона трубок это явление имеет более выраженный характер. На основании проведенных расчетов установлен оптимальный угол наклона трубок. Также рассмотрено влияние диаметра и материала трубок. Получены распределения электрического поля и удельной мощности, поглощенной на кг диэлектрика в волноводе.

Выполнена оценка точности результатов. Возможными модификациями предлагаемой конструкции устройства пастеризации могут быть другие варианты расположения трубок с жидкостью. Также влияние на поглощаемую мощность может оказывать толщина стенок трубки. Кроме того, состав молока изменяет его электрофизические свойства, и соответственно также может повлиять на уровень поглощаемой мощности. Однако эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

Имитационное моделирование; СВЧ нагрев; САПР; удельная поглощаемая мощность; SAR; волновод.

N.N. Kisel, A.A. Vaganova, I.A. Vaganov

SIMULATION MODELING OF MILK HEATING BY THE ENERGY OF MICROWAVE FIELD

Heat treatment of dielectric materials and food products is one of the important directions in the development of the production of various products. The use of the electromagnetic field energy of ultrahigh frequencies for drying, heating, defrosting and pasteurizing food products is promising, since such technologies are suitable for processing various dielectric materials and, at the same time, are efficient and environmentally friendly. Despite many developments in the field of microwave processing of materials, the creation of a universal device suitable for heat treatment of any kind of materials is difficult because of the variety of their shapes and sizes, as well as the significant difference in the electrical properties of various dielectrics. Therefore, in each specific case, it is required to create an optimal design of the device and choose the option for exciting the electromagnetic field. This work is devoted to modeling the absorption of energy of the microwave electromagnetic field in a device for milk pasteurization. Using CAD FEKO, a 3D model of the device was built and its operation was modeled. The study of the influence of the angle of inclination of quartz tubes on the distribution of the electromagnetic field in the waveguide is carried out. The results show that most of the power is absorbed closer to the beginning of the waveguide, and this phenomenon is more pronounced with an increase in the angle of inclination of the tubes. On the basis of performed calculations, the optimal angle of inclination of the tubes was determined. The influence of the diameter and material of the tubes was also considered. The distributions of the electric field and specific power absorbed per kg of dielectric in the waveguide are obtained. The accuracy of the results is evaluated. Possible modifications of the proposed design of the pasteurization device can be made by choosing other variants of the arrangement of the tubes with milk. The thickness of the tube's walls can also affect the absorbed power. In addition, the composition of milk can change its electrophysical properties, and therefore can also affect the level of absorbed power. However, these questions require further research.

Simulation modeling; pasteurization; microwave heating; CAD; specific absorption power; SAR; waveguide.

Введение. Термообработка диэлектрических материалов и пищевых продуктов является одним из важных направлений развития производства различной продукции. Использование энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот для сушки, нагрева, размораживания и пастеризации пищевых продуктов является перспективным, поскольку такие технологии подходят обработки различных диэлектрических материалов и при этом являются эффективными и экологически чистыми.

Существует множество исследований, посвященных проблеме разработки СВЧ-устройств, позволяющих обеспечить равномерный нагрев диэлектрического материала [1–22]. Так в работе [4] исследуется возможность применения СВЧ-устройств для плавления снежно-ледяной массы. Работы [5, 6] посвящены проблеме повышения равномерности нагрева диэлектриков в СВЧ-установках резонаторного типа за счет использования распределенных систем возбуждения. При проведении экспериментов в качестве диэлектрического поглощающего материала использовалась вода. Определялось распределение теплового поля в рассматриваем-

мом материале, уровень поглощаемой СВЧ-мощности и неравномерность нагрева. В работах [7, 8] предложен способ повышения равномерности нагрева диэлектрических материалов и пищевых продуктов в резонаторных СВЧ-установках, основанный на распределении энергии СВЧ по объему нагреваемого материала и предложена конструкция четырехщелевой управляемой системы возбуждения электромагнитного поля, позволяющая реализовать предложенный способ. Работы [9, 10] посвящены разработке СВЧ-устройств равномерного нагрева диэлектрических материалов. Рассматриваются устройства волноводного и резонаторного типов сложного сечения. В работах [10–14], посвященных разработке и исследованию СВЧ-устройств для термообработки диэлектрических материалов, предложены волноводные устройства круглого и меандрового типа, позволяющие выполнять равномерную обработку диэлектриков по сечению в режиме бегущей волны. В работах [15–17] рассмотрены проблемы применения технологии СВЧ-нагрева в химическом производстве. Работа [18–20] посвящены математическому моделированию микроволновой обработки диэлектриков, в том числе нефти.

Несмотря на наличие множества разработок в сфере обработки материалов с помощью СВЧ, создание универсального устройства, подходящего для тепловой обработки любых материалов, затруднительно из-за разнообразия их форм и размеров, а также существенного различия электрофизических свойств диэлектриков. Поэтому в каждом конкретном случае требуется создавать оптимальную конструкцию устройства и выбирать вариант возбуждения электромагнитного поля.

Постановка задачи и способ решения. Цель работы состоит в том, чтобы промоделировать процесс нагрева молока электромагнитным СВЧ полем в устройстве пастеризации и выбрать оптимальные параметры устройства.

В данной работе исследуется устройство для пастеризации жидкостей, конструкция которого предложена в [21–22]. Упрощенно конструкция устройства показана на рис. 1. Его основой является прямоугольный волновод с проходящими через него полыми диэлектрическими трубками. На вход нагревателя подаются СВЧ-колебания с частотой 915 МГц. Далее диэлектрические трубки, включенные последовательно наполняются жидкостью. В данной работе в качестве нагреваемой жидкости рассматривается молоко с теплоемкостью 3,96 кДж/кг и относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$. Протекая через волновод, жидкость в диэлектрических трубках поглощает СВЧ-энергию и нагревается до заданной температуры. Температура нагрева жидкости определяется скоростью ее прохождения по диэлектрическим трубкам и мощностью СВЧ-генератора.

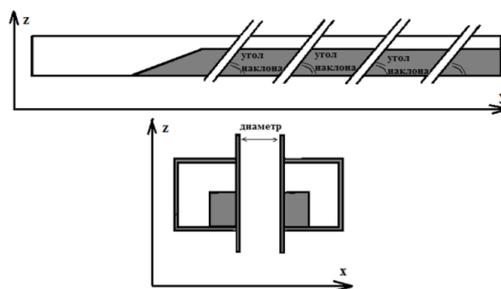


Рис. 1. Конструкция устройства

В качестве среды моделирования использовалась САПР FEKO, предназначенная для проведения электродинамических расчетов. На рис. 2 показана созданная в этой программе 3D модель устройства пастеризации и выделены сечения, в которых был выполнен расчет электромагнитного поля.

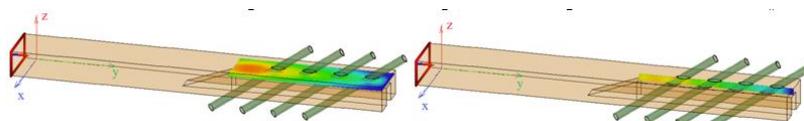


Рис. 2. Модель устройства пастеризации в программе FEKO

Необходимо промоделировать влияние таких параметров, как угол наклона трубок, их диаметр и материал на распределение электромагнитного поля в волноводе, чтобы выбрать оптимальный вариант. При расчете использовался метод конечных элементов, заложенный в программе FEKO. Были рассчитаны распределения электрического поля (E) и удельной мощности (SAR), поглощенной на кг диэлектрика в волноводе.

Обсуждение результатов. Проведено исследование влияния угла наклона кварцевых трубок на распределение электромагнитного поля в волноводе. Угол наклона трубок выбирается исходя из следующих ограничений. С одной стороны, при расположении трубок близком к вертикальному, жидкость будет протекать через них слишком быстро и не успеет прогреться до требуемой температуры. С другой стороны, при расположении трубок близком к горизонтальному, они начнут перекрывать друг друга по вертикали, то есть в одной точке вдоль волновода окажется несколько расположенных друг над другом трубок. С учетом этого, в данной работе угол наклона изменялся в диапазоне $35^\circ \dots 55^\circ$. Были рассчитаны распределения электрического поля (E) и удельной мощности (SAR), поглощенной на кг диэлектрика в волноводе.

На рис. 3 показана рассчитанная величина удельной мощности, поглощаемой в объеме диэлектрика, при разных углах наклона трубок. Рис. 3 соответствует сечению волновода в плоскости yOz . Видно, что большая часть мощности поглощается ближе к началу волновода, при чем при увеличении наклона трубок это явление имеет более выраженный характер. Так при угле в 55° поглощение в четвертой трубке практически отсутствует, а в третьей – значительно ослабевает.

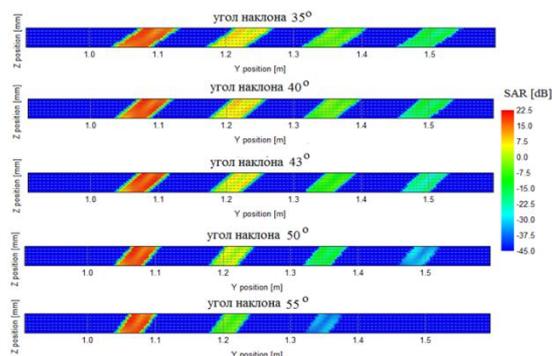


Рис. 3. Удельная поглощаемая мощность в плоскости yOz

Рис. 4 показывает распределение электрического поля (E) вдоль волновода и величину удельной поглощаемой мощности (SAR) в каждой трубке. Линии разного цвета соответствуют разным углам наклона. Видно, что уровень мощности, поглощаемой диэлектриком в первой трубке приблизительно одинаков при любом угле наклона, но при увеличении угла наклона распределение мощности по трубкам имеет более спадающий характер.

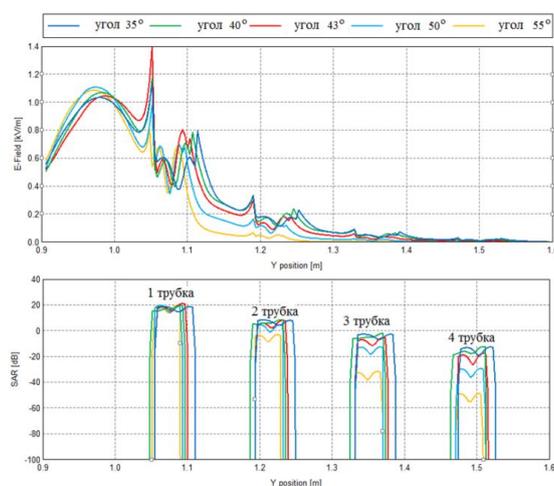


Рис. 4. Распределение электрического поля вдоль волновода и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке при разных углах наклона

На рис. 5 изображена величина удельной поглощаемой мощности в ваттах на килограмм. При этом, поскольку разница между мощностью поглощенной в первой и последней трубках очень велика, ось Оу разбита на два участка.

На основании проведенных расчетов является оптимальным выбрать угол наклона трубок равный 43° , поскольку он не слишком пологий, однако при этом в работе задействованы все четыре трубки (во всех происходит поглощение мощности, а соответственно, и нагрев жидкости). При этом во всех случаях получить равномерное распределение поглощаемой мощности по трубкам не удастся, и уровень мощности в первой и последней трубках отличается примерно в 20 раз. Однако согласно описанию предлагаемой конструкции, жидкость протекает через эти трубки последовательно, а не параллельно, поэтому полученная неравномерность является приемлемой.

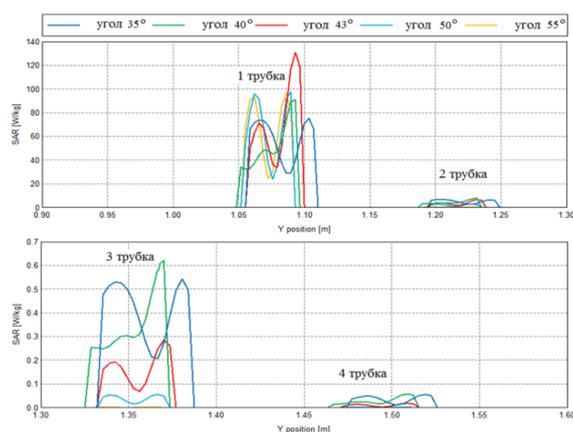


Рис. 5. Удельная поглощаемая мощность в каждой трубке

На рис. 6 показано распределение электрического поля вдоль волновода и удельной поглощаемой мощности в каждой трубке при разной величине диаметра трубок. Во всех случаях угол наклона равен 43° . Видно, что изменение диаметра на 10–15 % не оказывает существенного влияния на распределение электрического поля.

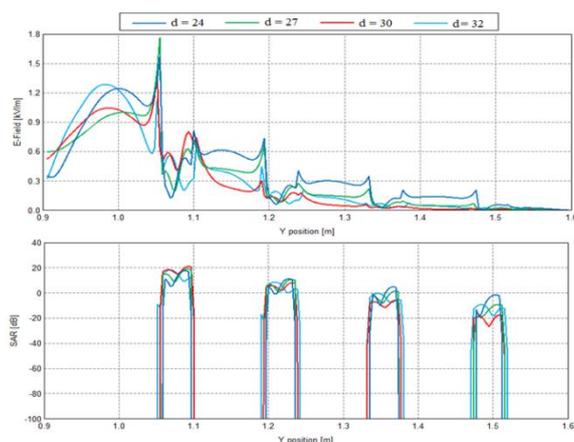


Рис. 6. Распределение электрического поля и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке при разной величине диаметра трубок

Наиболее общим требованием к материалу, из которого изготавливаются трубки, является то, что материал должен быть прозрачен для СВЧ-энергии и непрозрачен для жидкости. Выполнено моделирование для трех значений диэлектрической проницаемости материала – $\epsilon = 1$ соответствует диэлектрической проницаемости свободного пространства, $\epsilon = 4$ соответствует кварцевому стеклу и $\epsilon = 9$ соответствует квадратному корню из диэлектрической проницаемости молока.

На рис. 7 показано распределение электрического поля вдоль волновода и удельной поглощаемой мощности в каждой трубке при разных значениях диэлектрической проницаемости материала трубок. При $\epsilon = 1$, что фактически равнозначно отсутствию ограничивающего жидкость материала, поле убывает с расстоянием наиболее сильно. Также видно, что результаты для $\epsilon = 4$ и $\epsilon = 9$ практически одинаковы. Это позволяет использовать в устройстве стандартные кварцевые трубки.

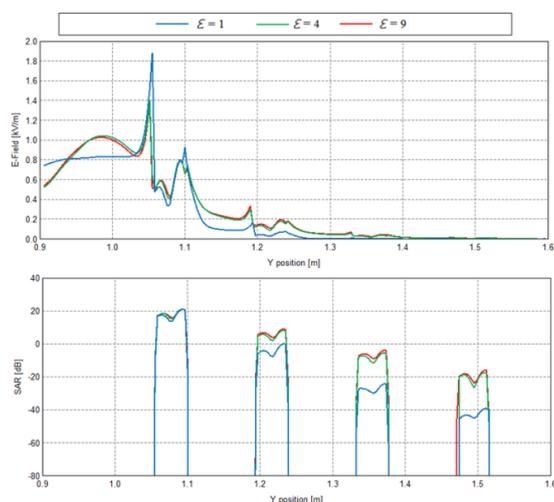


Рис. 7. Распределение электрического поля вдоль волновода и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке при разных значениях диэлектрической проницаемости материала трубок

Для проверки точности полученных результатов были выполнены вычисления одних и тех же параметров при разных значениях меширования (разбиения на элементарные ячейки для расчета) модели устройства пастеризации. На рис. 8 показано распределение удельной поглощаемой мощности в двух сечениях волновода при трех разных значениях меширования.

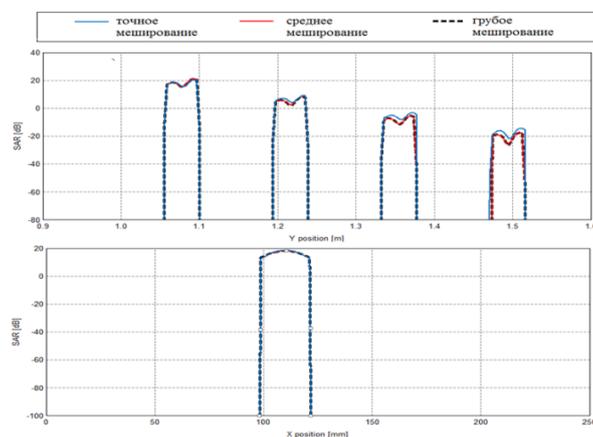


Рис. 8. Удельная поглощаемая мощность при разном мешировании

На рис. 9 изображено распределение напряженности электрического поля в тех же случаях.

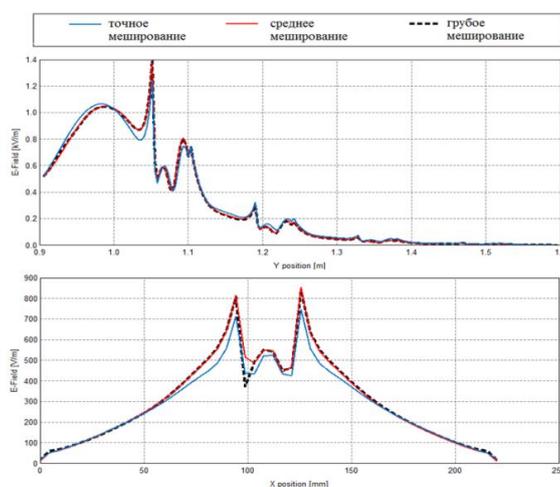


Рис. 9. Напряженность электрического поля при разном мешировании

Заключение. Данная работа посвящена проектированию устройства для пастеризации молока с помощью энергии электромагнитного поля СВЧ. С применением САПР ФЕКО построена 3D модель устройства и выполнено моделирование его работы. Проведено исследование влияние угла наклона кварцевых трубок на распределение электромагнитного поля в волноводе. Также рассмотрено влияние диаметра и материала трубок. Получены распределения электрического поля и удельной мощности, поглощенной на кг диэлектрика в волноводе. Выполнена оценка точности результатов.

Полученные результаты показывают, что большая часть мощности поглощается ближе к началу волновода, причем при увеличении угла наклона трубок это явление имеет более выраженный характер. Так при угле в 55° поглощение в четвертой трубке практически отсутствует, а в третьей – значительно ослабевает.

На основании проведенных расчетов является оптимальным угол наклона трубок равный 43° , поскольку он не слишком пологий, однако при этом в работе задействованы все четыре трубки. Тем не менее во всех случаях получить равномерное распределение поглощаемой мощности по трубкам не удастся, и уровень мощности в первой и последней трубках отличается примерно в 20 раз. Однако согласно описанию предлагаемой конструкции, жидкость протекает через эти трубки последовательно, а не параллельно, поэтому полученная неравномерность является приемлемой.

Возможными модификациями предлагаемой конструкции устройства пастеризации могут быть другие варианты расположения трубок с жидкостью, в частности, расположение их в шахматном порядке и расположение в виде двух параллельных рядов, что влечет за собой возможное изменение диаметра трубок. Также влияние на поглощаемую мощность может оказывать толщина стенок трубки. Кроме того, состав молока изменяет его электрофизические свойства, и соответственно также может повлиять на уровень поглощаемой мощности. Однако эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

Научные исследования выполнены в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства аппаратно-программных комплексов обработки сельхозсырья на основе СВЧ излучения» (Соглашение с Минобрнауки РФ № 075-11-2019-083 от 20.12.2019 г., Договор ЮФУ № 18 от 20.09.2019 г., номер работы в ЮФУ № ХД/19-25-РТ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Meredith R.* Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating, Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
2. *Kubo M.T.K., Curet S., Augusto P.E.D., Boillereaux L.* Multiphysics modeling of microwave processing for enzyme inactivation in fruit juices // *Journal of Food Engineering.* – 2019. – Vol. 263. – P. 366-379.
3. *Выков Y.V., Рыбаков K.I., Семенов V.E.* High-Temperature Microwave Processing of Materials // *Journal of Physics, D-Applied Physics.* – 2001. – Vol. 34 (13). – P. 55-75.
4. *Лапочкин M.C., Морозов O.G.* СВЧ устройства адаптивного типа для интенсификации процессов плавления снежно-ледяной массы // Сб. научных трудов II ВНТК молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «ВТСНТ-2013». – Томск, 2013. – Т. 2. – С. 234-238.
5. *Рыбков В.С., Коломейцев В.А., Евсейкин А.А.* Структура электрического поля в резонаторной камере СВЧ нагревательной установки при боковом четырехщелевом способе возбуждения // *Радиотехника и связь: Матер. Междунар. науч.-техн. конф.* – Саратов: СРГУ, 2008. – С. 147-153.
6. *Коломейцев В.А., Салахов Т.Р., Салимов И.И., Рыбков В.С.* Повышение равномерности нагрева полимерных материалов в прямоугольной резонаторной камере при термообработке в одномодовом режиме // *Электроника и вакуумная техника: Приборы и устройства. Технология. Материалы: Матер. науч.-техн. конф.* – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 2007. – С. 191-197.
7. *Журавлев А.Н., Карнов Д.И., Салахов Т.Р.* Тепловые процессы в конвейерной СВЧ-установке поперечного типа на основе ПВТР // *Функциональные системы и устройства низких и сверхвысоких частот: Межвуз. науч. сб.* – Саратов: СГТУ, 2003. – С. 58-62.
8. *Карнов Д.И., Коломейцев В.А.* Патент на изобретение № 2329617 РФ. СВЧ-печь; Бюл. № 20. ФГУ ФИПС, 2008 г.
9. *Дрогайцева О.В., Карнов Д.И., Карнов И.А.* Исследование процесса выравнивания температуры нагрева материала в установках резонаторного типа // Сб. науч. тр. «Радиотехника и связь». – Саратов: СГТУ, 2009. – С. 409-415.

10. Дрогайцева О.В., Коломейцев В.А., Семенов А.Э. Оптимизация многоцелевой системы возбуждения электромагнитного поля в СВЧ нагревательных установках резонаторного типа // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 3. – С. 106-112.
11. Mamontov A.V., Nazarov I.V., Potapova T.A. Temperature Field Distribution in Sheet Materials in Microwave Heating Waveguide Devices // 2006 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, 12 February 2007, Saratov, Russia. – DOI: 10.1109/APEDE.2006.307416.
12. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Chechetkin A.A. Heat treatment of sheet materials using slow-wave systems // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016, Saratov, Russia. – DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879044.
13. Mamontov A.V., Nefedov V.N. Microwave method of even temperature distribution in the volumetric materials // 2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", 8-14 Sept. 2013.
14. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Saygin I.A. Heat treatment of a rod dielectric materials using microwave radiation // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016. – DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879041.
15. Shatalov A.L. Performance in using electromagnetic field energy for heating insulating and semiconducting media // Chemical and Petroleum Engineering. – 2008. – Vol. 44, No. 11-12. – P. 704-708.
16. Шаталов А.Л. Физическая модель процесса нагрева жидких сред полем СВЧ // Сб. «Нетрадиционные и лазерные технологии»: Доклады Международной конференции ALT-92. – М., 1992. – С. 45-48.
17. Шаталов А.Л., Ардашев А.И., Чулков В.П. Основы расчета конвейерной СВЧ сушилки // Сб. «Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств». – М.: МИХМ, 1983. – С. 99-103.
18. Анфиногентов В.И. Численное моделирование сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева несжимаемой вязкой жидкости, движущейся в цилиндрической трубе // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11, № 2-3. – С. 3-9.
19. Анфиногентов В.И. Об оптимальном управлении СВЧ нагревом диэлектриков // Авиакосмические технологии и оборудование: Матер. Межд. науч.-практ. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 346-349.
20. Анфиногентов В.И., Галимов М.Р., Морозов Г.А., Морозов О.Г. Математическое моделирование микроволновой сепарации водонефтяной эмульсии // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ18: Сб. трудов XVIII Международ. науч. конф. В 10 т., Т. 3. – Казань: Изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 159-162.
21. Букреев В.Г., Еремин А.Д., Чекрыгина И.М. Патент на изобретение № 2101884 РФ от 10.01.1998. СВЧ-нагреватель жидкости.
22. Чекрыгина И.М., Еремин А.Д., Букреев В.Г., Ракитин А.Н. Патент на изобретение № 2171584 РФ от 10.08.2001. Способ пастеризации (стерилизации) жидких водосодержащих пищевых продуктов.

REFERENCES

1. Meredith R. Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating, Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
2. Kubo M.T.K., Curet S., Augusto P.E.D., Boillereaux L. Multiphysics modeling of microwave processing for enzyme inactivation in fruit juices, *Journal of Food Engineering*, 2019, Vol. 263, pp. 366-379.
3. Bykov Y.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. High-Temperature Microwave Processing of Materials, *Journal of Physics, D-Applied Physics*, 2001, Vol. 34 (13), pp. 55-75.
4. Lapochkin M.S., Morozov O.G. SVCh ustroystva adaptivnogo tipa dlya intensivatsii protsessov plavleniya snezhno-ledyanoy massy [Microwave devices of adaptive type for intensification of melting processes of snow-ice mass], *Sb. nauchnykh trudov II VNTK molodykh uchennykh, aspirantov i studentov s mezhdunarodnym uchastiem «VTSNT-2013»* [Collection of scientific papers of the II vntc of young scientists, postgraduates and students with international participation "VTSNT-2013"]. Tomsk, 2013, Vol. 2, pp. 234-238.

5. Rybkov B.C., Kolomeytsev V.A., Evseykin A.A. Struktura elektricheskogo polya v rezonatornoi kamere SVCh nagrevatel'noy ustanovki pri bokovom chetyrekhshchelevom sposobe vzbuzhdeniya [Structure of the electric field in the resonator chamber of a microwave heating system with a lateral four-slit method of excitation], *Radiotekhnika i svyaz': Mater. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Radio engineering and communications: Proceedings of the International scientific and technical conference]. Saratov: SRGU, 2008, pp. 147-153.
6. Kolomeytsev V.A., Salakhov T.R., Salimov I.I., Rybkov B.C. Povyshenie ravnomernosti nagreva polimernykh materialov v pryamougol'noy rezonatornoy kamere pri termoobrabotke v odnomodovom rezhime [Increasing the uniformity of heating of polymer materials in a rectangular resonator chamber during heat treatment in single-mode mode], *Elektronika i vakuumnaya tekhnika: Pribory i ustroystva. Tekhnologiya. Materialy: Mater. nauch.-tekhn. konf.* [Electronics and vacuum technology: Devices and devices. Technology. Materials: Materials of the scientific and technical conference]. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 2007, pp. 191-197.
7. Zhuravlev A.N., Karpov D.I., Salakhov T.R. Teplovye protsessy v konveyernoy SVCh-ustanovke poperechnogo tipa na osnove PVTR [Thermal processes in a conveyor microwave installation of a transverse type based on PVTR], *Funktsional'nye sistemy i ustroystva nizkikh i sverkhvysokikh chastot: Mezhvuz. nauch. sb.* [Functional systems and devices of low and ultra-high frequencies: interuniversity scientific collection]. Saratov: SGTU, 2003, pp. 58-62.
8. Karpov D.I., Kolomeytsev V.A. Patent na izobretenie № 2329617 RF. SVCh-pech' [Patent for invention No. 2329617 of the Russian Federation. Microwave oven]; Bul. No. 20. FSU FIPS, 2008.
9. Drogaytseva O.V., Karpov D.I., Karpov I.A. Issledovanie protsessa vyravnivaniya temperatury nagreva materiala v ustanovkakh rezonatornogo tipa [Investigation of the process of equalizing the heating temperature of the material in resonator-type installations], *Sb. nauch. tr. «Radiotekhnika i svyaz'»* [Collection of scientific papers "radio engineering and communications"]. Saratov: SGTU, 2009, pp. 409-415.
10. Drogaytseva O.V., Kolomeytsev V.A., Semenov A.E. Optimizatsiya mnogoshchevovoy sistemy vzbuzhdeniya elektromagnitnogo polya v SVCh nagrevatel'nykh ustanovkakh rezonatornogo tipa [Optimization of the multi-slot system of electromagnetic field excitation in microwave heating installations of resonator type], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov state technical University], 2010, No. 3, pp. 106-112.
11. Mamontov A.V., Nazarov I.V., Potapova T.A. Temperature Field Distribution in Sheet Materials in Microwave Heating Waveguide Devices, *2006 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, 12 February 2007, Saratov, Russia*. DOI: 10.1109/APEDE.2006.307416.
12. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Chechetkin A.A. Heat treatment of sheet materials using slow-wave systems, *2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016, Saratov, Russia*. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879044.
13. Mamontov A.V., Nefedov V.N. Microwave method of even temperature distribution in the volumetric materials, *2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", 8-14 Sept. 2013*.
14. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Saygin I.A. Heat treatment of a rod dielectric materials using microwave radiation, *2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016*. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879041.
15. Shatalov A.L. Performance in using electromagnetic field energy for heating insulating and semiconducting media, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2008, Vol. 44, No. 11-12, pp. 704-708.
16. Shatalov A.L. Fizicheskaya model' protsessa nagreva zhidkikh sred polem SVCh [The physical model of process of heating liquids microwave field], *Sb. "Netraditsionnye i lazernye tekhnologii": Doklady Mezhdunarodnoy konferentsii ALT-92* [Collection "Non-traditional and laser technology»: Reports of the ALT-92 International conference]. Moscow, 1992, pp. 45-48.
17. Shatalov A.L., Ardashev A.I. Chulkov V.P. Osnovy rascheta konveyernoy SVCh sushilki [Basics of calculating a conveyor microwave dryer], *Sb. "Raschet i konstruirovaniye mashin i apparatov khimicheskikh proizvodstv"* [Collection "Calculation and construction of machines and devices of chemical production"]. Moscow: MIKHM, 1983, pp. 99-103.

18. *Anfinogentov V.I.* Chislennoe modelirovanie sverkhvysokochastotnogo elektromagnitnogo nagreva neszhimaemoy vyazkoy zhidkosti, dvizhushcheysya v tsilindricheskoj trube [Numerical simulation of ultra-high-frequency electromagnetic heating of an incompressible viscous liquid moving in a cylindrical tube], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2006, Vol. 11, No. 2-3, pp. 3-9.
19. *Anfinogentov V.I.* Ob optimal'nom upravlenii SVCh nagrevom dielektrikov [On optimal control of microwave heating of dielectrics], *Aviakosmicheskie tekhnologii i oborudovanie: Mater. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Aviation and space technologies and equipment: Materials of the International scientific and practical conference]. Kazan': Izd-vo Kazan, gos. tekhn. un-ta, 2006, pp. 346-349.
20. *Anfinogentov V.I., Galimov M.R., Morozov G.A., Morozov O.G.* Matematicheskoe modelirovanie mikrovolnovoy separatsii vodoneftyanoy emul'sii [Mathematical modeling of microwave separation of oil-water emulsion], *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT18: Sb. trudov XVIII Mezhdunarod, nauch. konf.* [Mathematical methods in engineering and technology-MMTT18: proceedings of the XVIII International scientific conference]. In 10 vol., Vol. 3. Kazan': Izd-vo Kazanskogo gos. tekhnol. un-ta, 2005, pp. 159-162.
21. *Bukreev V.G., Eremin A.D., Chekrygina I.M.* Patent na izobrenenie № 2101884 RF ot 10.01.1998. SVCh-nagrevatel' zhidkosti [Patent for invention No. 2101884 of the Russian Federation dated 10.01.1998. microwave liquid heater].
22. *Chekrygina I.M., Eremin A.D., Bukreev V.G., Rakitin A.N.* Patent na izobrenenie № 2171584 RF ot 10.08.2001. Sposob pasterizatsii (sterilizatsii) zhidkikh vodosoderzhashchikh pishchevykh produktov [Patent for invention No. 2171584 of the Russian Federation dated 10.08.2001. Method of pasteurization (sterilization) of liquid water-containing food products.].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров.

Кисель Наталья Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Ваганова Анастасия Алексеевна – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; аспирантка; м.н.с.

Ваганов Иван Алексеевич – e-mail: vaganov@sfedu.ru; студент.

Kisel Natalia Nikolayevna – Southern Federal University; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vaganova Anastasia Alexeevna – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; postgraduate student; junior researcher.

Vaganov Ivan Alexeevich – e-mail: vaganov@sfedu.ru; student.

УДК 621.372.81

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-78-88

Н.Н. Кисель, А.А. Ваганова, А.Н. Савицкий

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЗЕРНА ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СВЧ ПОЛЯ

Высокая скорость и эффективность нагрева диэлектриков микроволновым излучением позволяют использовать электромагнитное поле для нагревания и высушивания практически любых содержащих влагу материалов. Одним из перспективных направлений использования СВЧ-энергии является интенсификация процесса сушки зерна. Для обеспечения быстрого прототипирования и снижения возможности потерь, обусловленных ошибками на различных стадиях разработки и внедрения оборудования, особую значимость приобретает разработка моделей. Цель данной работы состоит в выполнении имитационного моделирования волноводно-целевой решетки для сушки зерна. Основная задача, которая

стоит при моделировании, обеспечить равномерное распределение мощности каждой щелью. В качестве среды моделирования используется специализированный программный комплекс FEKO. Для описания модели используется точный метод расчета – метод моментов. Получено распределение электрического поля и удельной поглощаемой мощности в слое зерна, подвергающегося СВЧ облучению. Модели были верифицированы путем сравнения результатов, полученных при различном мешировании элементов поверхности. Моделирование распределения напряженности электрического поля показало, что отдаление волноводов от кюветы с зерном приводит к выравниванию неравномерностей поля, однако в этом случае некоторая часть излучаемой мощности рассеивается в пространство. При этом увеличение расстояния между волноводами и кюветой с зерном не влияет на КСВ антенн. Следует отметить, что в реальной обстановке волновой характер поля сглаживается за счет теплопереноса, и это явление не может быть учтено в процессе электромагнитного моделирования. Кроме того, следует исследовать весь спектр возможного изменения диэлектрических параметров зерна, чтобы проанализировать процесс распространения волны при высокой влажности зерна. Целесообразно также рассмотреть другие модификации волноводно-целевых антенн, которые смогут обеспечить более равномерный нагрев внутри кюветы с зерном.

Имитационное моделирование; нагрев диэлектриков; СВЧ нагрев; сушка зерна; волновод; волноводно-целевая антенна.

N.N. Kisel, A.A. Vaganova, A.N. Savitskiy

SIMULATION MODELING OF GRAIN HEATING BY THE ENERGY OF ELECTROMAGNETIC MICROWAVE FIELD

High speed and efficiency of microwave heating of dielectrics makes it possible to use the electromagnetic field to heat and dry almost any material containing moisture. One of the promising areas for the use of microwave energy is the intensification of the grain drying process. To ensure rapid prototyping and reduce the possibility of losses caused by errors at various stages of equipment development and implementation, model development is of particular importance. The purpose of this work is to perform simulation of a slotted waveguide grating for grain drying. The main task of the simulation is to ensure an even distribution of power to each slot. A specialized software package FEKO is used as a modeling environment. To describe the model, an exact calculation method is used - the method of moments. The distribution of the electric field and specific absorbed power in a layer of grain exposed to microwave radiation is obtained. The models were verified by comparing the results obtained with different mesh values of surface elements. Modeling the distribution of the electric field strength showed that moving the waveguides away from the cell with the grain leads to the leveling of the field irregularities, but in this case some of the radiated power is dissipated into space. In this case, an increase in the distance between the waveguides and the cell with grain does not affect the antenna SWR. It should be noted that in a real situation, the wave nature of the field is smoothed out due to heat transfer, and this phenomenon cannot be taken into account in the process of electromagnetic simulation. In addition, the entire variety of possible changes in the dielectric parameters of grain should be investigated in order to analyze the process of wave propagation in grain with high moisture. It is also advisable to consider other modifications of slotted waveguide antennas, which can provide more uniform heating in the container with grain.

Simulation modeling; dielectric heating; microwave heating; grain drying; waveguide; waveguide slot antenna.

Введение. Высокая скорость и эффективность нагрева диэлектриков микроволновым излучением позволяют использовать электромагнитное поле для нагрева и высушивания практически любых содержащих влагу материалов. Микроволновое излучение еще в 1960х гг. начали применять в промышленных масштабах для тепловой обработки и высушивания пищевых продуктов [1–15]. Сушка зерна (или других сыпучих материалов) заключается в удалении влаги путем испарения.

Микроволновый нагрев (диэлектрический, СВЧ нагрев) основан на проникновении электромагнитной энергии в материал и преобразовании ее в тепловую энергию. Проникновение электромагнитной энергии в материал происходит мгновенно, а поглощение зависит от диэлектрических свойств. Распределение тепловой энергии создает условия для ускорения диффузии пара из внутренних слоев материала к периферийным, что уменьшает энергетические затраты на процесс нагрева и сокращается его продолжительность. Интенсификация процесса сушки зерна является одним из перспективных направлений использования СВЧ-энергии.

Выбор частоты определяется характеристиками подлежащего нагреву материала. Для промышленных нагревательных устройств в России выделены следующие диапазоны частот: 433 МГц, 915 МГц, 2450 МГц. Диэлектрические показатели зерна не остаются постоянными и зависят от напряженности электрического поля, частоты воздействия, давления, температуры, плотности материала, влажности, от плотности зерновой смеси, сорта, наличия предварительной обработки, наличия примесей и других факторов, что необходимо учитывать при проектировании оборудования для их электромагнитной обработки.

Для обеспечения быстрого прототипирования и снижения возможности потерь, обусловленных ошибками на различных стадиях разработки и внедрения оборудования, особую значимость приобретает разработка моделей и имитационное моделирование этих моделей, включая анализ чувствительности геометрических параметров оборудования с целью определения требований к точности изготовления модулей оборудования. Кроме того, для правильного моделирования необходимы сведения об диэлектрических свойствах материалов и зависимость этих значений от плотности, влажности и т.д. Моделирование выполняется на основе электродинамического моделирования и может быть выполнена в таких программах продуктах как CST Studio, HFSS, FEKO [17–19].

Постановка задачи. Цель работы состоит в выполнении имитационного моделирования волноводно-щелевой решетки для сушки зерна. Основная задача, которая стоит при моделировании, обеспечить равномерное распределение мощности каждой щелью. В качестве среды моделирования используется специализированный программный комплекс FEKO. Моделирование выполняется на частоте 2450 МГц, в качестве источника используется магнетрон с минимальной мощностью 0,75 кВт и максимальной 1,5 кВт. Диэлектрическая проницаемость зерна лежит в пределах 2,6 – 3,4, потери составляют $\text{tg}\delta = 0,22 \dots 0,33$.

Для сушки зерна используются волноводно-щелевые антенны, представляющие собой систему полуволновых щелей, прорезанных в стенке волновода. Подвод энергии электромагнитного поля осуществляется сверху и снизу короба, в котором размещено зерно. Используются прямоугольные волноводы с волной H_{10} . Необходимо обеспечить однородное облучение протяжённого объекта, и мощность излучения всех щелей, расположенных на одном облучающем волноводе, должна быть одинаковой.

Способ решения. При расположении резонансной щели на продольной оси широкой стенки её нормированное сопротивление равно нулю, щель является неизлучающей. Таким образом, увеличивая по ходу подводимой мощности угол ориентации щели относительно продольной оси широкой стенки волновода, можно реализовать облучающую систему с однородным излучением СВЧ-мощности на значительной длине. Методика расчёта синфазных многощелевых антенн при короткозамкнутом конце линии подробно изложена в [16, 17].

Следует отметить, что синфазные волноводно-щелевые антенны являются резонансными как по размерам щелей, так и по расстоянию между ними, в случае рассогласования отражения от каждой щели в волноводе складываются в фазе и КСВ в питающем волноводе резко возрастает. Схема наклонной щели изображена на рис. 1.

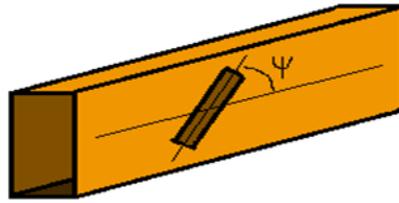


Рис. 1. Модель щели в широкой стенке волновода

Щель размещена симметрично относительно ее средней линии широкой стенки волновода. Поскольку щель возбуждается продольными токами (поперечные токи по обеим сторонам средней линии имеют противоположные знаки), поэтому i -щель эквивалентна последовательному сопротивлению

$$R = 0.131 \cdot \frac{\lambda}{\lambda_b} \frac{\lambda^2}{ab} \left[f_1(\psi) \sin(\psi) + \frac{\lambda_b}{2a} f_2(\psi) \cos(\psi) \right]^2,$$

$$f_1(\psi) = \frac{\cos \frac{\pi \xi}{2}}{1 - \xi^2} - \frac{\cos \frac{\pi \gamma}{2}}{1 - \gamma^2}, f_2(\psi) = \frac{\cos \frac{\pi \xi}{2}}{1 - \xi^2} + \frac{\cos \frac{\pi \gamma}{2}}{1 - \gamma^2},$$

$$\xi = \frac{\lambda}{\lambda_b} \cos \psi - \frac{\lambda}{2a} \sin \psi, \gamma = \frac{\lambda}{\lambda_b} \cos \psi + \frac{\lambda}{2a} \sin \psi,$$

где ψ – угол между осью щели и средней линией стенки волновода. Для выполнения условия согласования необходимо, чтобы выполнялось условие

$$Rn = l,$$

n – количество щелей в волноводно-щелевой решетке. На рис. 2 приведена зависимость нормированного сопротивления щели от угла наклона щели относительно поперечно ориентированной щели в узкой стенке волновода.

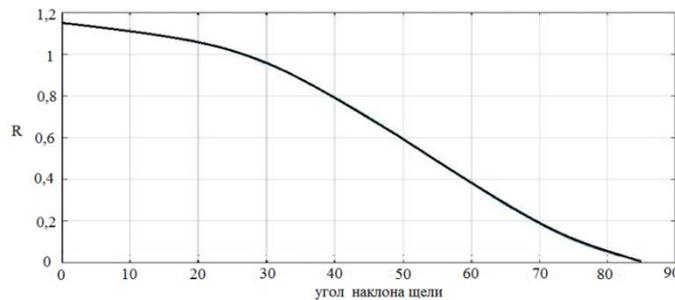


Рис. 2. Зависимость нормированного сопротивления щели от угла наклона щели относительно поперечной щели в широкой стенке волновода

На рис. 3 показана зависимость нормированного сопротивления щели от угла наклона щели относительно поперечной щели в широкой стенке волновода для неоднородного волновода, в котором высота волновода линейно уменьшается по мере удаления от источника (сужение волновода по вертикали).

Зависимости нормированного сопротивления позволяют выбрать угол наклона щелей как в однородном, так и в суживающем волноводе, обеспечивающий условие согласования.

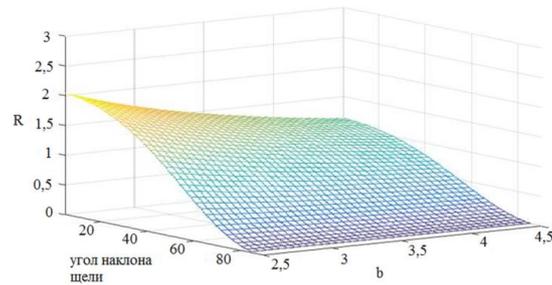


Рис. 3. Зависимость нормированного сопротивления щели R от угла наклона щели в широкой стенке волновода и высоты волновода b

Исследуемая модель волноводно-щелевой антенны с 28 щелями, выполненная в программе FEKO изображена на рис. 4. Для описания модели использовался точный метод расчета – метод моментов.

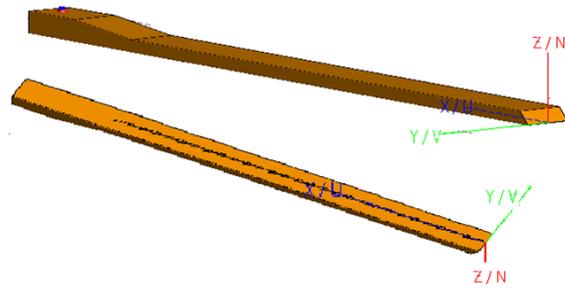


Рис. 4. Модель волноводно-щелевой антенны в пакете FEKO

Для изображенной выше модели волноводно-щелевой антенны были исследованы зависимости КСВ (коэффициента стоячей волны) антенны от ширины щелей и угла поворота щелей (рис. 5). Модели были верифицированы путем сравнения результатов, полученных при различном мезшировании элементов поверхности.

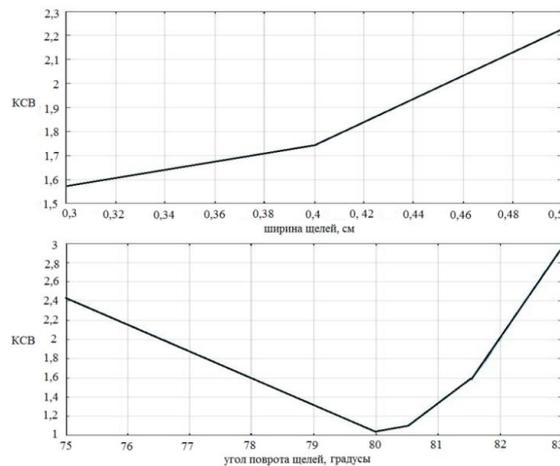


Рис. 5. Зависимость КСВ от ширины щелей и от угла наклона щелей (угол отсчитывается от поперечной ориентации щелей)

Как видно из приведенных зависимостей, увеличение ширины щелей ведет к почти линейному увеличению КСВ в волноводном тракте. Поэтому для дальнейших расчетов ширина щелей была принята равной 3 мм. Зависимость КСВ от угла поворота щелей имеет ярко выраженный минимум. При этом изменение угла наклона от 75° до 83° приводит к изменению КСВ в пределах от 1,1 до 3.

Обсуждение результатов. На рис. 6 приведено распределение напряженности электрического поля в продольной плоскости волновода. Наибольшая неравномерность наблюдается в центре волноводно-щелевой антенны, которая может быть устранена за счет изменения углов поворота щелей с номерами 12–17. Следует отметить, что такое решение приведет к росту КСВ антенны, однако для исследуемой модели КСВ не превышает 1,7.

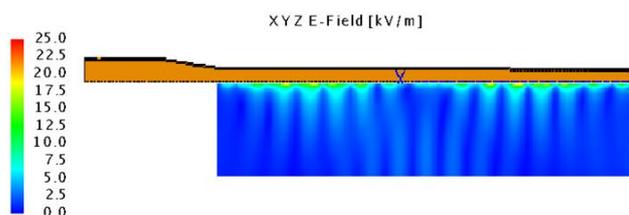


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля в продольной плоскости волновода

Таким образом, все 28 щелей антенны излучают электромагнитное поле, при этом обеспечивается КСВ в волноводном тракте не хуже 1,7.

Конструктивно оборудование обработки зерна представляет собой емкость с зерном, которая подвергается СВЧ-обработки с помощью двух волноводно-щелевых антенн, расположенных с противоположных сторон и сдвинутых относительно друг друга с целью создания более равномерного распределения в объеме. Исследуемая модель приведена на рис. 7. Расстояние между емкостью с зерном и волноводами $h_{\text{зазор}}$ составило $\lambda_g/8$, $\lambda_g/4$, где λ_g – длина волны в волноводе. Ширина щелей принята 0,3 см, угол наклона щелей $82,25^\circ$, КСВ не превышает 1,7 для обоих случаев расположения волноводов по отношению к кювету с зерном.

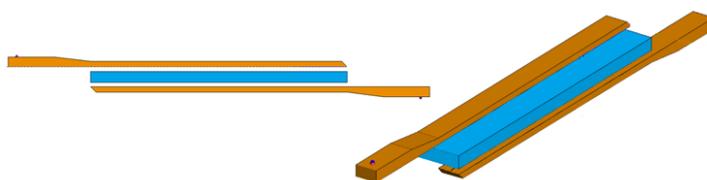


Рис. 7. Модель обработки зерна СВЧ-излучением, созданным двумя волноводно-щелевыми антеннами

Следует особо обратить внимание на выбор высоты кювета с зерном. Неравномерность распространения мощности по толщине обрабатываемого материала обусловлена потерями в слоях материала по мере удаления от источника. Основной характеристикой этой неравномерности может служить глубина проникновения поля, которая определяется по зависимости:

$$\tau = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\epsilon'} \operatorname{tg} \delta'}$$

где λ – длина волны, м; ϵ' – диэлектрическая постоянная материала, $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла потерь. Глубина проникновения поля показывает на какой толщине поле ослабевает в e -раз. На рис. 8 изображена зависимость толщины *skin*-слоя от потерь в материале и диэлектрической проницаемости материала. Величина *skin*-слоя является определяющим параметром при выборе размеров кювета с зерном.

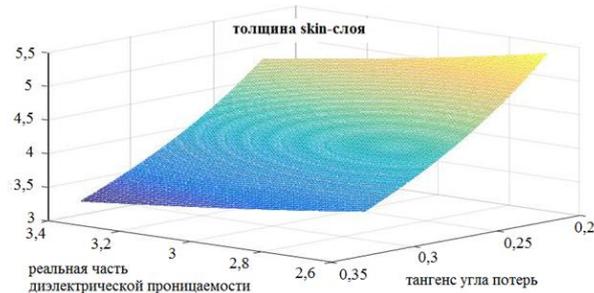


Рис. 8. Зависимость толщины *skin*-слоя от потерь в материале и диэлектрической проницаемости материала

Ниже приведены результаты электромагнитного моделирования напряженностей полей и удельной поглощаемой мощности (Вт/кг) внутри кювета с зерном в горизонтальных и вертикальных плоскостях. Расположение двух сдвинутых относительно друг друга волноводов позволяет выполнить более равномерный нагрев зерна внутри объема. В работе исследованы распределения электрического поля и удельной поглощаемой мощности в вертикальной и горизонтальной плоскостях, ориентированных по отношению к щелям волноводно-щелевой антенны, при различном расстоянии от кювета с зерном. Как показали расчеты, удаление волновода от поверхности кювета приводит к более равномерному распределению электрического поля при одновременном снижении его уровня. На рис. 9–12 приведены распределения напряженностей электрического полей и удельной поглощаемой мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях в середине кювета с зерном при расстоянии волновода от кювета с зерном, равном $\lambda_w/4$.

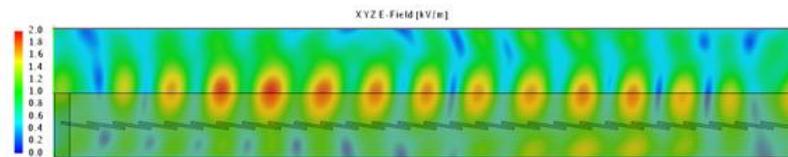


Рис. 9. Распределение электрического поля в середине слоя зерна в горизонтальной плоскости ($h_{\text{зазор}} = \lambda_w/4$)

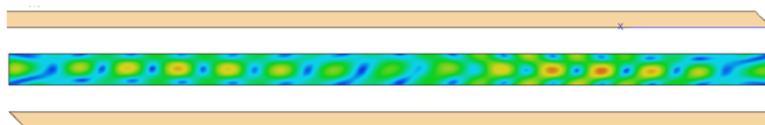


Рис. 10. Распределение электрического поля в середине слоя зерна в вертикальной плоскости ($h_{\text{зазор}} = \lambda_w/4$)

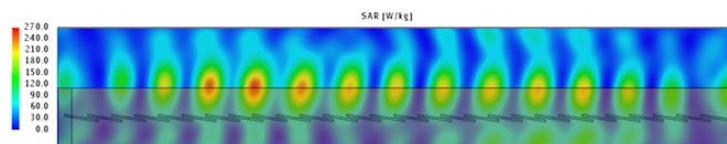


Рис. 11. Удельная поглощаемая мощность в середине слоя зерна в горизонтальной плоскости ($h_{\text{зазор}} = \lambda_d/4$)

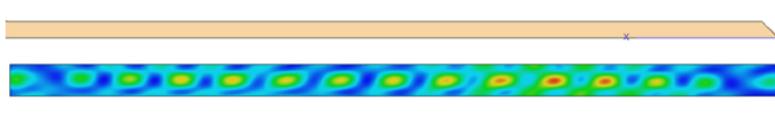


Рис. 12. Удельная поглощаемая мощность в середине слоя зерна в вертикальной плоскости ($h_{\text{зазор}} = \lambda_d/4$)

Таким образом, приведенная модель волноводно-щелевой антенны позволяет осуществить нагрев зерна. Для улучшения проникновения электромагнитной волны предлагается между волноводом и кюветом располагать согласующий слой диэлектрического материала с параметрами $\sqrt{\epsilon'}$ для улучшения согласования с объемом зерна. Приведенные примеры распределений полей показывают, что имеется неравномерность распределения поля по объему камеры. Некоторое удаление волноводов от камеры приводит к выравниванию неоднородности поля, но при этом часть излучаемой мощности теряется. Как показали результаты расчета увеличение расстояния от волновода до кювета с зерном не отразилось на КСВ волноводов.

Заключение. В данной работе было выполнено имитационное моделирование нагрева зерна с помощью облучения его электромагнитным СВЧ полем. Основная задача моделирования состояла в обеспечении равномерного нагрева зерна за счет равномерного распределения мощности, излучаемой всеми щелями в волноводе. Были получены зависимости КСВ антенны от ширины и угла наклона щелей, что позволило выбрать оптимальное расположение щелей. С помощью специализированного программного комплекса FEKO получено распределение электрического поля и удельной поглощаемой мощности в слое зерна, подвергающегося СВЧ облучению.

Моделирование распределения напряженности электрического поля показало, что отдаление волноводов от кюветы с зерном приводит к выравниванию неоднородностей поля, однако в этом случае некоторая часть излучаемой мощности рассеивается в пространство. При этом, как показали результаты вычислений, увеличение расстояния между волноводами и кюветой с зерном не влияет на КСВ антенн.

Следует отметить, что в реальной обстановке волновой характер поля сглаживается за счет теплопереноса, и это явление не может быть учтено в процессе электромагнитного моделирования. Кроме того, следует исследовать весь спектр возможного изменения диэлектрических параметров зерна, чтобы проанализировать процесс распространения волны при высокой влажности зерна. Целесообразно также рассмотреть другие модификации волноводно-щелевых антенн, которые смогут обеспечить более равномерный нагрев внутри кюветы с зерном.

Научные исследования выполнены в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства аппаратно-программных комплексов обработки сельхозсырья на основе СВЧ излучения» (Соглашение с Минобрнауки РФ № 075-11-2019-083 от 20.12.2019 г., Договор ЮФУ № 18 от 20.09.2019 г., номер работы в ЮФУ № ХД/19-25-РТ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будников Д.А. Исследование динамических свойств зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 4. – С. 92-96.
2. Будников Д.А. Планирование эксперимента по контролю изменения комплексного диэлектрического показателя зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии // Вестник ВНИИМ. – 2015. – № 4. – С. 39-42.
3. Будников Д.А. Поглощение электромагнитного поля СВЧ сельскохозяйственными материалами // Вестник ВИЭСХ. – 2013. – № 2. – С. 38-40.
4. Цымбал А.А., Будников Д.А. Диэлектрические свойства зерновых // Вестник ВНИИМЖ. – 2016. – № 4 (24).
5. Будников Д.А. Исследование распределения напряженности СВЧ поля в зерновом слое // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3.
6. Vaptista F., Silva L.L., C. de Visser. Energy Efficiency in Agriculture // 5th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management. Lisbon, Portugal 2013.
7. Васильев А.Н., Будников Д.А., Смирнов Б.Г. Эффективность применения поля СВЧ для интенсификации сушки зерна активным вентилированием // Переработка и хранение сельскохозяйственной продукции. – 2008. – № 7. – С. 29-30.
8. Vankatesh M.S. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials // Biosystems Engineering. – 2004. – Vol. 88 (1). – P. 1-18.
9. Будников Д.А. Моделирование влияния конструктивных параметров зоны обработки на распределение поля СВЧ в электро-технологическом модуле для сушки и обработки зерна // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 4 (9). – С. 88-91.
10. Uy S., Easteal A., Farid M., Keam R., Conner G. Seaweed processing using industrial single-mode cavity microwave heating: a preliminary investigation // Carbohydrate Research. – 2005. – P. 1357-1364.
11. Dev S.R., Garipey Y., Orsat V., Raghavan G. FDTD modeling and simulation of microwave heating of in-shell eggs // Progress in Electromagnetics Research. – 2010. – Vol. 13. – P. 229-243.
12. Lurie K.A., Yakovlev V.V. Method of control and optimization of microwave heating in waveguide systems // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol. 35, No. 3. – P. 1777-1780.
13. Domínguez-Tortajada E., Monzo-Cabrera J., Diaz-Morcillo A. Uniform electric field distribution in microwave heating applicator by means of genetic algorithms optimization of dielectric multilayer structures // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2007. – Vol. 55, No. 1. – P. 85-91.
14. Xie G.Q., Suzuki M., Louzguine-Luzgin D.V., Li S., Tanaka M., Sato M., Inoue A. Analysis of electromagnetic field distribution in a 915 MHz single mode microwave applicator // Progress in Electromagnetics Research. – 2009. – Vol. 89. – P. 135-148.
15. Risman P.O., Celuch-Marcysiak M. Electromagnetic modelling for microwave heating applications. In Microwaves, Radar and Wireless Communications // MIKON-2000. 13th International Conference on. – 2000. – P. 167-182.
16. Кременецкий С.Д., Лось В.Ф., Шаманов А.Н. Волноводно-щелевые антенные решетки // Антенны. – 2004. – № 8-9 (87-88). – С. 47-55.
17. Евстропов Г.А., Царанкин С.А. Исследование волноводно-щелевых антенн с идентичными резонансными излучателями // Радиотехника и электроника. – 1965. – № 9. – С. 1663-1670.
18. Кисель Н.Н. Моделирование задач электродинамики и антенн на супервычислительной системе в пакете FEKO: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 326 с.
19. Кисель Н.Н. Электродинамическое моделирование антенн и устройств СВЧ в пакете FEKO: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 263 с.
20. Кисель Н.Н. Основы компьютерного проектирования РЭС САПР СВЧ: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 196 с.

REFERENCES

1. Budnikov D.A. Issledovanie dinameskikh svoystv zernovogo sloya pri SVCh-konvektivnom vozdeystvii [Research of dynamic properties of the grain layer under microwave convective action], *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* [Innovations in agriculture], 2014, No. 4, pp. 92-96.

2. *Budnikov D.A.* Planirovanie eksperimenta po kontrolyu izmeneniya kompleksnogo dielektricheskogo pokazatelya zernovogo sloya pri SVCh-konvektivnom vozdeystvii [Planning an experiment to control changes in the complex dielectric index of the grain layer under microwave convective influence], *Vestnik VNIIM* [Vestnik VNIIM], 2015, No. 4, pp. 39-42.
3. *Budnikov D.A.* Pogloshchenie elektromagnitnogo polya SVCh sel'skokhozyaystvennymi materialami [Absorption of the microwave electromagnetic field by agricultural materials], *Vestnik VIESKh* [Bulletin of RESh], 2013, No. 2, pp. 38-40.
4. *TSymbal A.A., Budnikov D.A.* Dielektricheskie svoystva zernovykh [Dielectric properties of grains], *Vestnik VNIIMZh* [Bulletin of VNIIMI], 2016, No. 4 (24).
5. *Budnikov D.A.* Issledovanie raspredeleniya napryazhennosti SVCh polya v zernovom sloe [Investigation of the distribution of the microwave field strength in the grain layer], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the don], 2015, No. 3.
6. *Baptista F., Silva L.L., C. de Visser.* Energy Efficiency in Agriculture, *5th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management. Lisbon, Portugal 2013.*
7. *Vasil'ev A.N., Budnikov D.A., Smirnov B.G.* Effektivnost' primeneniya polya SVCh dlya intensivatsii sushki zerna aktivnym ventilirovaniem [Efficiency of application of the microwave field for intensification of grain drying by active ventilation], *Pererabotka i khraneniye sel'skokhozyaystvennoy produktsii* [Processing and storage of agricultural products], 2008, No. 7, pp. 29-30.
8. *Vankatesh M.S.* An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials, *Biosystems Engineering*, 2004, Vol. 88 (1), pp. 1-18.
9. *Budnikov D.A.* Modelirovanie vliyaniya konstruktivnykh parametrov zony obrabotki na raspredeleniye polya SVCh v elektro-tekhnologicheskoy module dlya sushki i obrabotki zerna [Modeling the influence of design parameters of the processing zone on the distribution of the microwave field in the electro-technological module for grain drying and processing], *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* [Innovations in agriculture], 2014, No. 4 (9), pp. 88-91.
10. *Uy S., Easteal A., Farid M., Keam R., Conner G.* Seaweed processing using industrial single-mode cavity microwave heating: a preliminary investigation, *Carbohydrate Research*, 2005, pp. 1357-1364.
11. *Dev S.R., Garipey Y., Orsat V., Raghavan G.* FDTD modeling and simulation of microwave heating of in-shell eggs, *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, Vol. 13, pp. 229-243.
12. *Lurie K.A., Yakovlev V.V.* Method of control and optimization of microwave heating in waveguide systems, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, Vol. 35, No. 3, pp. 1777-1780.
13. *Dominiguez-Tortajada E., Monzo-Cabrera J., Diaz-Morcillo A.* Uniform electric field distribution in microwave heating applicator by means of genetic algorithms optimization of dielectric multilayer structures, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, Vol. 55, No. 1, pp. 85-91.
14. *Xie G.Q., Suzuki M., Louzguine-Luzgin D.V., Li S., Tanaka M., Sato M., Inoue A.* Analysis of electromagnetic field distribution in a 915 MHz single mode microwave applicator, *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, Vol. 89, pp. 135-148.
15. *Risman P.O., Celuch-Marcysiak M.* Electromagnetic modelling for microwave heating applications. In *Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2000. 13th International Conference on*, 2000, pp. 167-182.
16. *Kremenetskiy S.D., Los' V.F., Shamanov A.N.* Volnovodno-shchelevye antennnye reshetki [Waveguide-slot antenna arrays], *Antenny* [Antennae], 2004, No. 8-9 (87-88), pp. 47-55.
17. *Evstropov G.A., TSarapkin S.A.* Issledovanie volnovodno-shchelevykh antenn s identichnymi rezonansnymi izluchatelyami [Investigation of waveguide-slit antennas with identical resonant emitters], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1965, No. 9, pp. 1663-1670.
18. *Kisel' N.N.* Modelirovanie zadach elektrodinamiki i antenn na supervychislitel'noy sisteme v pakete FEKO: ucheb. posobie [Modeling of electrodynamic and antenna problems on a supercomputing system in the FEKO package: tutorial]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 326 p.
19. *Kisel' N.N.* Elektrodinamicheskoye modelirovanie antenn i ustroystv SVCh v pakete FEKO: ucheb. posobie [Electrodynamic modeling of antennas and microwave devices in the FEKO package: tutorial]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, 263 p.
20. *Kisel' N.N.* Osnovy komp'yuternogo proektirovaniya RES SAPR SVCh: ucheb. posobie [Fundamentals of computer design RES CAD microwave: textbook]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 196 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров.

Кисель Наталья Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Ваганова Анастасия Алексеевна – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; аспирантка; м.н.с.

Савицкий Алексей Николаевич – e-mail: savicky@sfedu.ru; студент.

Kisel Natalia Nikolayevna – Southern Federal University; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vaganova Anastasia Alexeevna – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; postgraduate student; junior researcher.

Savitskiy Alexei Nikolaevich – e-mail: savicky@sfedu.ru; student.

Раздел II. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.056.5

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-89-98

Н.В. Болдырихин, Ф.А. Алтунин, Д.А. Короченцев

ОСОБЕННОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ЗАШИФРОВАННОГО СЕТЕВОГО ТРАФИКА

В настоящее время растет интерес к задачам эффективного управления пакетными сетями: качеству обслуживания, обеспечению информационной безопасности, оптимизации использования программно-аппаратных ресурсов сети. Все эти задачи во многом опираются на анализ и классификацию сетевого трафика. Данный трафик неоднороден, как правило, имеет пульсирующий характер, трудно поддается прогнозированию, описывается математическим аппаратом случайных процессов. В разное время условия прохождения пакетов по одному и тому же пути могут значительно отличаться. Вместе с тем появляется значительное количество приложений, требовательных к задержкам и джиттеру. Задача администрирования в данном контексте состоит в правильной настройке узлов коммутации и маршрутизации. Классификация трафика позволяет идентифицировать пакеты различных приложений и служб и обеспечить их приоритизацию при передаче по сети. Например, трафик видеоконференций необходимо передавать в первую очередь, поскольку он очень чувствителен к задержкам и джиттеру, трафик данных можно передавать в последнюю очередь. Классификация трафика на сегодняшний день задача актуальная как с точки зрения администрирования сети, так и с точки зрения обеспечения её безопасности. Ввиду того, что большое количество приложений сейчас шифрует передаваемую информацию и просмотреть ее содержимое очень сложно, особый интерес представляет классификация трафика, которая позволяет по косвенным признакам определить аномалии в работе сети, признаки вторжения. В данной работе рассмотрены особенности решения задачи классификации зашифрованного трафика. Целью работы является исследование особенностей классификации зашифрованного трафика с использованием корреляционного анализа и алгоритма, основанного на разности интегральных площадей. Задачи исследования: – разработать алгоритм классификации трафика на основе корреляции и известными образцами; – разработать алгоритм, основанный на разности интегральных площадей под кривыми интенсивности трафика; – провести практическое исследование точности решения задачи классификации. В работе рассмотрена классификация трафика по трем группам: аудио, видео, данные. В результате выявлена достаточная точность корреляционного алгоритма при определении аудио и трафика данных. Для выявления видеотрафика лучше использовать алгоритм, основанный на разности интегральных площадей под кривыми интенсивности.

Информационная безопасность; классификация трафика; зашифрованный трафик; статистический метод; приложение; сеть связи.

N.V. Boldyrikhin, F.A. Altunin, D.A. Korochentsev

CLASSIFICATION FEATURES OF ENCRYPTED NETWORK TRAFFIC

Currently, there is growing interest in the tasks of efficient packet network management: quality of service, ensuring information security, optimization of the network hardware and software resources. All these tasks rely heavily on the analysis and classification of network traffic. This traffic is heterogeneous, as a rule, has a pulsating nature, difficult to predict and described by the mathematical apparatus of random processes. At different times, the conditions for passing

packets along the same path can vary significantly. At the same time, a significant number of applications are appearing requiring latency and jitter. The administration task in this context is to correctly configure the switching and routing nodes. Traffic classification allows you to identify packages of various applications and services and ensure their prioritization during transmission over the network. For example, video conferencing traffic needs to be transmitted first of all, since it is very sensitive to delays and jitter, data traffic can be transmitted last. The classification of traffic today is an urgent task both in terms of network administration and in terms of ensuring its security. Due to the fact that a large number of applications now encrypt the transmitted information and it is very difficult to view its contents, the traffic classification is of particular interest, which allows indirect signs to determine anomalies in the network, signs of intrusion. In this paper, we consider the features of solving the classification problem of encrypted traffic. The aim of the work is to study the classification features of encrypted traffic using correlation analysis and an algorithm based on the difference in integral areas. Research Objectives: – develop a traffic classification algorithm based on correlation and known patterns; – develop an algorithm based on the difference of the integral areas under the traffic intensity curves; – conduct a practical study of the accuracy of solving the classification problem. The work considers the classification of traffic into three groups: audio, video, data. As a result, a sufficient accuracy of the correlation algorithm in determining audio and data traffic was revealed. To identify video traffic, it is better to use an algorithm based on the difference of the integral areas under the intensity curves.

Information security; traffic classification; encrypted traffic; statistical method; application; communication network.

Введение. В настоящее время сети связи стали неотъемлемой частью жизни общества. Очевидно, что в таких сетях задача управления и контроля информационных потоков приобретает высокую значимость [1–6]. Неотъемлемой частью такого управления и контроля является классификация трафика [7–15].

Изначально классификация трафика использовалась администраторами для анализа информационных потоков с целью повышения управляемости сети, эффективности использования каналов связи, однако в настоящее время задача актуальна и в области информационной безопасности [16–18].

В общем случае задача классификации сетевого трафика может быть сформулирована как вероятностное отнесение трафика к определенному типу (например, трафик данных, видео, аудио и т.д.), либо определение соответствия трафика какому-то конкретному программному объекту, или классу объектов (например, программы рассылки спама) [7–15].

Существует несколько подходов к решению задачи классификации трафика: классификация, основанная на портах, классификация, основанная на полезной нагрузке, статистические методы анализа. Каждый из подходов обладает своими достоинствами и недостатками [7–15].

Эффективность классических методов в последнее время невелика. Значительная часть существующего вредоносного программного обеспечения (сетевые черви, троянские программы, программы рассылки спама и т.д.) генерирует сетевой трафик, который зачастую бывает зашифрованным [13, 18–20]. Так же многие легальные приложения генерируют огромное количество зашифрованного трафика, содержимое которого невозможно проконтролировать при отсутствии ключей шифрования. Отчасти решить эту задачу можно с помощью различных статистических методов классификации трафика.

Классификация трафика на основе корреляции. Каждый тип трафика имеет свои индивидуальные особенности, поэтому может быть классифицирован с использованием корреляционного анализа. В данной работе рассматривается 3 типа трафика: видео (video), аудио (audio) и данные (data). На рис. 1–3 приведены примеры зависимости интенсивностей соответствующих видов трафика от времени.

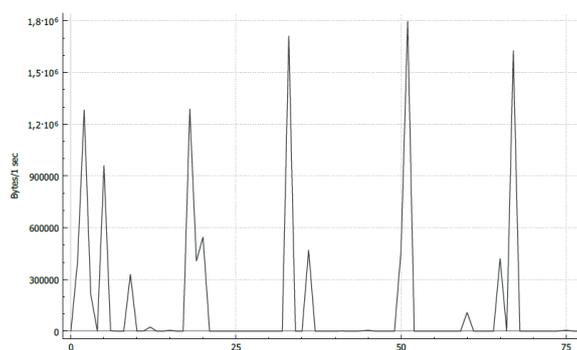


Рис. 1. Интенсивность трафика, создаваемого при просмотре видео на странице YouTube

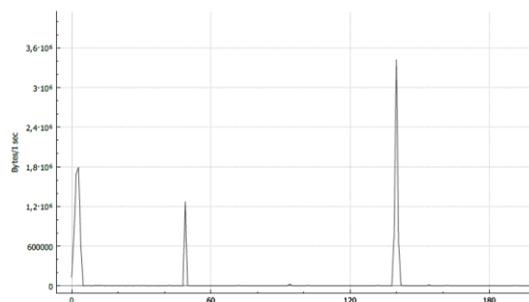


Рис. 2. Интенсивность трафика, создаваемого при прослушивании музыки на странице Яндекс Музыка

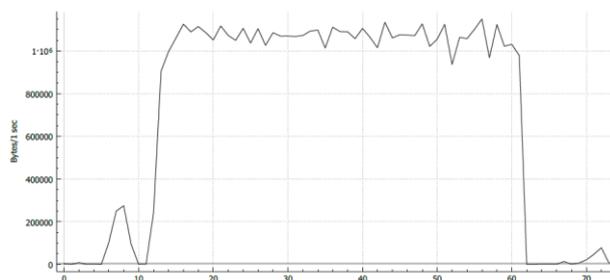


Рис. 3. Интенсивность трафика, создаваемого при скачивании файла

Суть алгоритма заключается в сборе некоторого количества образцов каждого из типов трафика. Эти образцы представляются в виде векторов интенсивности трафика и хранятся в соответствующей базе данных. Для классификации какого-либо неизвестного образца рассчитывается коэффициент корреляции относительно каждого известного образца из базы данных и вычисляется его среднее значение по каждой группе образцов.

Корреляция высчитывается по следующей формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x_i , y_i – координаты векторов неизвестного и известного образцов соответственно, а \bar{x} , \bar{y} – их математические ожидания.

Значительное превышение среднего коэффициента корреляции по одной из групп в сравнении с остальными считается основанием для отнесения неизвестного образца к соответствующему типу трафика. Под термином «значительное превышение» может пониматься любое разумное пороговое значение, например, 50 %.

На рис. 4 приведен алгоритм классификации, разработанный в рамках данной работы.

В рамках натурального эксперимента, проведенного авторами, использовалось по 20 образцов каждого типа трафика, с которыми сравнивались «неизвестные» образцы трафика.

Для иллюстрации работы алгоритма проверялись образцы каждого типа. Заведомо известно: к какому типу трафика относится в классифицируемый образец.

Ниже представлена табл. 1, в которой описаны результаты расчетов корреляции для классифицируемого образца трафика, заведомо известного как data.

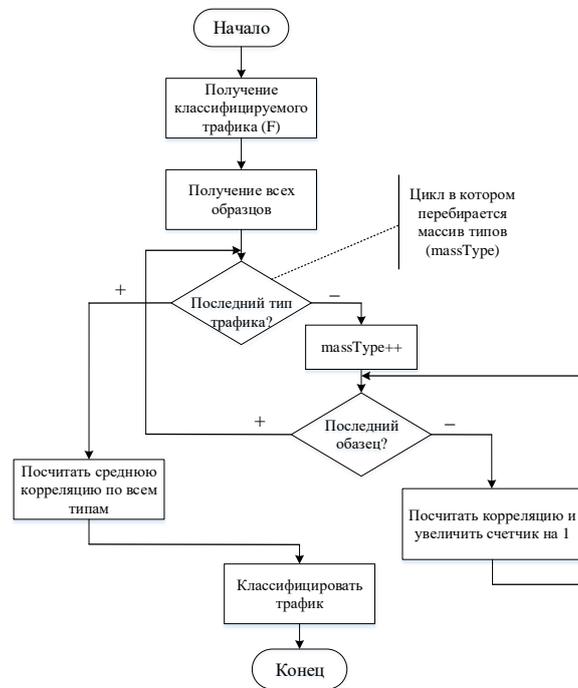


Рис. 4. Алгоритм классификации трафика на основе корреляции

Таблица 1

Средняя корреляция для классифицируемого образца типа data

video	audio	data
-0,126	-0,29	0,623

Из табл. 1 видно, что средний коэффициент корреляции классифицируемого образца типа data по группе образцов data превысил аналогичный показатель приблизительно в 4,94 и 2,14 раза соответственно для группы video и audio.

Далее в табл. 2 и 3 представлены аналогичные расчеты для классифицируемых образцов audio и video.

Таблица 2

Средняя корреляция для классифицируемого образца типа audio

video	audio	data
0,122	0,485	-0,337

Из табл. 2 видно, что средний коэффициент корреляции классифицируемого образца типа audio по группе образцов audio превысил аналогичный показатель приблизительно в 3,98 и 1,44 раза соответственно для группы video и data.

Таблица 3

Средняя корреляция для классифицируемого образца типа video

video	audio	data
0,053	0,082	-0,036

Из табл. 3 видно, что средний коэффициент корреляции классифицируемого образца типа video по группе образцов video превысил аналогичный показатель приблизительно в 1,55 раза для группы data, однако оказался ниже в 1,47 раза по сравнению с группой audio.

Классификация трафика на основе разности интегральных площадей под кривыми интенсивности. Вышеприведенный вычислительный эксперимент показал, что для решения проблемы классификации видеотрафика необходимо воспользоваться другим методом, например, приведенном в [21] (для решения другой задачи), который подразумевает сравнение площадей под кривыми интенсивности трафика на заданном временном интервале. Для проверки эффективности данного метода в качестве классифицируемых образцов использовалось три образца видеотрафика.

В табл. 4 представлены значения площадей под кривой для классифицируемых образцов, полученные путем интегрирования на заданном интервале времени

$$S_{Vi} = \int_{t_1}^{t_2} I_i(t) dt, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где $I_i(t)$ – интенсивность трафика i -го образца, $t_1 = 0$, $t_2 = 799$.

Таблица 4

Площади классифицируемых образцов

S_{V1} , Bit	S_{V2} , Bit	S_{V3} , Bit
$3,635 * 10^4$	$2,645 * 10^4$	$3,883 * 10^4$

Для проведения классификации использовались средние значения площадей под кривой (табл. 5) для каждой группы образцов из базы данных, определяемых выражениями

$$\bar{S}_V = \frac{\sum_{j=1}^{20} \int_{t_1}^{t_2} I_{Vj}(t) dt}{20}, \quad (3)$$

$$\bar{S}_A = \frac{\sum_{j=1}^{20} \int_{t_1}^{t_2} I_{Aj}(t) dt}{20}, \quad (4)$$

$$\bar{S}_D = \frac{\sum_{j=1}^{20} \int_{t_1}^{t_2} I_{Dj}(t) dt}{20}, \quad (5)$$

где $\bar{S}_V, \bar{S}_A, \bar{S}_D$ – средние площади для video, audio и data типов трафика соответственно; $I_{Vj}(t), I_{Aj}(t), I_{Dj}(t)$ – интенсивности трафика для каждого образца, хранимого в базе данных для групп video, audio и data соответственно. В табл. 5 приведены результаты расчетов средних площадей.

Таблица 5

Средние площади для каждого типа трафика

\bar{S}_V , Bit	\bar{S}_A , Bit	\bar{S}_D , Bit
$3,174 * 10^4$	$1,307 * 10^4$	$1,555 * 10^5$

Суть классификации трафика состоит в определении разности площади классифицируемого образца и средней площади каждого типа трафика. Для одной из групп образцов эта разность будет иметь наименьшее абсолютное значение. Именно к этой группе следует отнести классифицируемый образец.

В табл. 6 представлены разности между площадями образцов видеотрафика и средними площадями по группам.

Таблица 6

Разности площадей (абсолютные значения)

	\bar{S}_V , Bit	\bar{S}_A , Bit	\bar{S}_D , Bit
S_{V1} , Bit	$4,605 * 10^3$	$2,327 * 10^4$	$1,192 * 10^5$
S_{V2} , Bit	$5,292 * 10^3$	$1,338 * 10^4$	$1,129 * 10^5$
S_{V2} , Bit	$7,094 * 10^3$	$2,576 * 10^4$	$1,167 * 10^5$

Данные расчеты доказывают эффективность метода площадей для классификации видеотрафика, поскольку разности площадей по группе video в разы меньше разностей по группам audio и data.

Заключение. В результате проведенных исследований выяснилось, что алгоритм классификации трафика на основе корреляции позволяет с достаточным качеством отличить трафик данных от трафика видео и аудио. Для данного типа трафика коэффициент корреляции по своей группе значительно превысил аналогичный показатель для других групп: в 4,94 и 2,14 раза соответственно для группы видео и аудио. Учитывая тот факт, что эти коэффициенты корреляции являются усредненными по результатам двадцати опытов, можно заключить, что данный алгоритм может успешно применяться на практике.

Аналогичным образом дела обстоят и с трафиком аудио, который можно легко отличить от видеотрафика и трафика данных. По результатам эксперимента средний коэффициент корреляции по своей группе превысил аналогичный показатель приблизительно в 3,98 и 1,44 раза соответственно для групп видео и данные.

Вместе с тем, следует отметить, что классифицировать видеотрафик при помощи данного алгоритма не получилось. Значение среднего коэффициента корреляции видеотрафика по своей группе образцов превысило аналогичный показатель приблизительно в 1,55 раза для трафика данных, однако оказалось ниже в 1,47 раза по сравнению со средней корреляцией для группы образцов аудиотрафика.

Для выявления видеотрафика следует использовать другой подход, например, использующий разности интегральных площадей под кривыми интенсивности, приведенный в данной статье. Данный метод показал высокую эффективность в рамках исследования, проводимого для трех различных образцов видеотрафика, которые сравнивали с существующей базой образцов. Данные эксперимента показали превышение разности интегральных площадей под кривыми интенсивности в среднем в 21,22 раза для трафика данных и в 3,73 раза для аудиотрафика по сравнению со своей группой образцов. Это свидетельствует о хорошей результативности данного подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мироненко А.Д., Сидоренко В.В., Ни Ю.А.* Аналитический обзор методов мониторинга сети // Актуальные вопросы науки и техники: Сб. статей. – Пенза: 2020. – С. 58-61.
2. *Болдырихин Н.В., Короченцев Д.А., Манакова А.Н., Качнов С.А.* Особенности использования динамических моделей при описании сетевого оборудования в задачах мониторинга // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 305-311.
3. *Болдырихин Н.В., Рыбалко И.П., Сосновский И.А., Гирич И.С.* Применение динамических моделей при описании сетевого оборудования в задачах мониторинга // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону, 2017. – С. 70-73.
4. *Кносаль В.М., Алтунин Ф.А., Давыдов Р.В., Болдырихин Н.В.* Анализ математических моделей сетей связи, используемых в задачах мониторинга // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону, 2017. – С. 245-248.
5. *Буковинин В.А., Болдырихин Н.В.* Сравнительное исследование технологий анализа интенсивности сетевого трафика // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 104-107.
6. *Татарникова Т.М.* Статистические методы исследования сетевого трафика // Информационно-управляющие системы. – 2018. – № 5 (96). – С. 35-43.
7. *Алтунин Ф.А., Кносаль В.М., Давыдов Р.В., Болдырихин Н.В.* Анализ методов классификации трафика // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону, 2017. – С. 23-27.
8. *Callado A., Kamienski C., Szabo G., Gero B., Kelner J., Fernandes S., Sadok D.* A Survey on Internet Traffic Identification // Communications Surveys & Tutorials, IEEE. – 3rd Quarter 2009. – Vol. 11, Issue 3. – P. 37-52.
9. *Risso F., Baldi M., Morandi O., Baldini A., Monclus P.* Lightweight, payload-based traffic classification: An experimental evaluation // in Proc. IEEE ICC. – 2008. – P. 5869-5875.
10. *Усовик С.В., Воронин А.В.* Алгоритм классификации трафика телекоммуникационной сети // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1 (63). – С. 107-110.
11. *Кузьмин В.В.* Классификация и идентификация трафика в мультисервисной сети оператора связи // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 231.
12. *Маркович Н.М.* Анализ видео трафика: классификация и оценивание потерь передачи // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO '09): Тр. VIII международной конференции. – М., 2009. – С. 1035-1058.
13. *Болдырихин Н.В., Алтунин Ф.А.* Анализ методов классификации трафика при решении задач обеспечения информационной безопасности сетей связи // Актуальные проблемы науки и техники: Матер. национальной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 356-357.
14. *Василишин Н.С., Ушаков И.А., Котенко И.В.* Исследование алгоритмов анализа сетевого трафика с использованием технологий больших данных для обнаружения компьютерных атак // Аллея науки. – 2018. – Т. 3, № 6 (22). – С. 1012-1021.
15. *Платонова А.В., Белоусов А.А.* Исследование методов статистического анализа для поиска аномалий в сетевом трафике // XIV Королёвские чтения: Сб. трудов международной молодежной научной конференции. – Самара, 2017. – С. 85-86.

16. Буковшин В.А., Болдырихин Н.В. Современные проблемы информационной безопасности // Современные материалы, техника и технология: Сб. статей. – Курск, 2018. – С. 47-52.
17. Буковшин В.А., Болдырихин Н.В. Кибербезопасность как неотъемлемая часть информационного мира // Современные материалы, техника и технология: Сб. статей. – Курск, 2018. – С. 52-55.
18. Татаринцов А.А., Болдырихин Н.В. Анализ методов обнаружения вредоносного программного обеспечения на основе поведенческих признаков // Национальная безопасность России: актуальные аспекты: Сб. статей. – СПб., 2020. – С. 18-22.
19. Тюрин К.А., Болдырихин Н.В. Алгоритм вероятностной идентификации пользователей сети // Молодой исследователь Дона. – 2016. – № 2 (2). – С. 81-86.
20. Харитонова Н.В., Негрышева Я.В., Болдырихин Н.В. Использование технологии VPN в корпоративных сетях // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону, 2013. – С. 250-252.
21. Асриянц С.В., Селёва А.В., Болдырихин Н.В. Идентификация объекта наблюдения на основе истории его местоположений // Advances in Science and Technology: Сб. статей IX международной научно-практической конференции. – М., 2017. – С. 64-67.

REFERENCES

1. Mironenko A.D., Sidorenko V.V., Ni Yu.A. Analiticheskiy obzor metodov monitoringa seti [Analytical review of network monitoring methods], *Aktual'nye voprosy nauki i tekhniki: Sb. statey* [Current issues of science and technology: Collection of articles]. Penza: 2020, pp. 58-61.
2. Boldyrikhin N.V., Korochentsev D.A., Manakova A.N., Kachnov C.A. Osobennosti ispol'zovaniya dinamicheskikh modeley pri opisani setevogo oborudovaniya v zadachakh monitoringa [Features of using dynamic models when describing network equipment in monitoring tasks], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow technical University of communications and Informatics]. Rostov-on-Don, 2019, pp. 305-311.
3. Boldyrikhin N.V., Rybalko I.P., Sosnovskiy I.A., Girin I.S. Primenenie dinamicheskikh modeley pri opisani setevogo oborudovaniya v zadachakh monitoringa [Application of dynamic models in the description of network equipment in monitoring tasks], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow technical University of communications and Informatics]. Rostov-on-Don, 2017, pp. 70-73.
4. Knosal' V.M., Altunin F.A., Davydov R.V., Boldyrikhin N.V. Analiz matematicheskikh modeley setey svyazi, ispol'zuemykh v zadachakh monitoringa [Analysis of mathematical models of communication networks used in monitoring tasks], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow technical University of communications and Informatics]. Rostov-on-Don, 2017, pp. 245-248.
5. Bukovshin V.A., Boldyrikhin N.V. Sravnitel'noe issledovanie tekhnologiy analiza intensivnosti setevogo trafika [Comparative research of technologies for analyzing the intensity of network traffic], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow technical University of communications and Informatics]. Rostov-on-Don, 2019, pp. 104-107.
6. Tatarnikova T.M. Statisticheskie metody issledovaniya setevogo trafika [Statistical methods of network traffic research], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2018, No. 5 (96), pp. 35-43.
7. Altunin F.A., Knosal' V.M., Davydov R.V., Boldyrikhin N.V. Analiz metodov klassifikatsii trafika [Analysis methods for traffic classification], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow technical University of communications and Informatics]. Rostov-on-Donu, 2017, pp. 23-27.
8. Callado A., Kamienski C., Szabo G., Gero B., Kelner J., Fernandes S., Sadok D. A Survey on Internet Traffic Identification, *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 3rd Quarter 2009, Vol. 11, Issue 3, pp. 37-52.
9. Risso F., Baldi M., Morandi O., Baldini A., Monclus P. Lightweight, payload-based traffic classification: An experimental evaluation, in *Proc. IEEE ICC*, 2008, pp. 5869-5875.

10. *Usovik S.V., Voronin A.V.* Algoritm klassifikatsii trafika telekommunikatsionnoy seti [The algorithm for classifying the traffic of a telecommunication network], *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies], 2011, No. 1 (63), pp. 107-110.
11. *Kuz'min V.V.* Klassifikatsiya i identifikatsiya trafika v mul'tiservisnoy seti operatora svyazi [Classification and identification of traffic in the operator's multiservice network], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, No. 5, pp. 231.
12. *Markovich N.M.* Analiz video trafika: klassifikatsiya i otsenivanie poter' peredachi [Video traffic analysis: classification and estimation of transmission losses], *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya (SICPRO '09): Tr. VIII mezhdunarodnoy konferentsii* [Identification of systems and management tasks (SICPRO '09): Proceedings of the VIII international conference]. Moscow, 2009, pp. 1035-1058.
13. *Boldyrikin N.V., Altunin F.A.* Analiz metodov klassifikatsii trafika pri reshenii zadach obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti setey svyazi [Analysis of traffic classification methods for solving problems of information security of communication networks], *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki: Mater. natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of science and technology: Materials of the national scientific and practical conference]. Rostov-on-Don, 2019, pp. 356-357.
14. *Vasilishin N.S., Ushakov I.A., Kotenko I.V.* Issledovanie algoritmov analiza setevogo trafika s ispol'zovaniem tekhnologii bol'shikh dannykh dlya obnaruzheniya komp'yuternykh atak [Research of algorithms for analyzing network traffic using big data technologies for detecting computer attacks], *Alleya nauki* [Alley of science], 2018, Vol. 3, No. 6 (22), pp. 1012-1021.
15. *Platonova A.V., Belousov A.A.* Issledovanie metodov statisticheskogo analiza dlya poiska anomalii v setevom trafike [Research of statistical analysis methods for searching for anomalies in network traffic], *XIV Korolevskie chteniya: Sb. trudov mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [XIV Royal readings: proceedings of the international youth scientific conference]. Samara, 2017, pp. 85-86.
16. *Bukovshin V.A., Boldyrikin N.V.* Sovremennye problemy informatsionnoy bezopasnosti [Modern problems of information security], *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: Sb. statey* [Modern materials, technique and technology: Collection of articles]. Kursk, 2018, pp. 47-52.
17. *Bukovshin V.A., Boldyrikin N.V.* Kiberbezopasnost' kak neot'emlemaya chast' informatsionnogo mira [Cybersecurity as an integral part of the information world], *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: Sb. statey* [Modern materials, technique and technology: Collection of articles]. Kursk, 2018, pp. 52-55.
18. *Tatarinov A.A., Boldyrikin N.V.* Analiz metodov obnaruzheniya vredonosnogo programmnoy obespecheniya na osnove povedencheskikh priznakov [Analysis of methods for detecting malicious software based on behavioral characteristics], *Natsional'naya bezopasnost' Rossii: aktual'nye aspekty: Sb. statey* [National security of Russia: current aspects: Collection of articles]. Saint Petersburg, 2020, pp. 18-22.
19. *Tyurin K.A., Boldyrikin N.V.* Algoritm veroyatnostnoy identifikatsii pol'zovateley seti [Algorithm for probabilistic identification of network users], *Molodoy issledovatel' Dona* [Young don Explorer], 2016, No. 2 (2), pp. 81-86.
20. *Kharitonova N.V., Negrysheva Ya.V., Boldyrikin N.V.* Ispol'zovanie tekhnologii VPN v korporativnykh setyakh [Using VPN technology in corporate networks], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow technical University of communications and Informatics]. Rostov-on-Don, 2013, pp. 250-252.
21. *Asriyants S.V., Seleva A.V., Boldyrikin N.V.* Identifikatsiya ob'ekta nablyudeniya na osnove istorii ego mestopolozheniy [Identification of an object of observation based on the history of its locations], *Advances in Science and Technology: Sb. statey IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Advances in Science and Technology: Collection of articles of the IX international scientific and practical conference]. Moscow, 2017, pp. 64-67.

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

Болдырихин Николай Вячеславович – Донской государственный технический университет; e-mail: boldyrikhin@mail.ru; 344065, г. Ростов-на-Дону, пер. Днепропровский, 116К, кв. 111; тел.: +79043442295; кафедра кибербезопасности информационных систем; к.т.н.; доцент.

Короченцев Денис Александрович – e-mail: mytelefon@mail.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, пр. Михаила Нагибина, 29, кв. 24; тел.: +79034895173; кафедра кибербезопасности информационных систем; зав. кафедрой; к.т.н.

Алтунин Федор Александрович – ООО «Яндекс.Маркет Лаб»; email: altuninf@gmail.com; Москва, Ленинский пр-т 129, корп. 3, кв. 119; тел.: +79889496866; инженер по тестированию.

Boldyrikhin Nikolay Vyacheslavovich – Don State Technical University; e-mail: boldyrikhin@mail.ru; 116K, per. Dneprovsky, apt. 111, Rostov-on-Don, 344065, Russia; phone: +79043442295; the department of cybersecurity of information systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Korochentsev Denis Aleksandrovich – e-mail: mytelefon@mail.ru; 29, Mikhail Nagibin Ave., apt. 24, Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +79034895173; the department of cybersecurity of information systems; head of the department; cand. of eng. sc.

Altunin Fedor Aleksandrovich – Yandex.Market Lab LLC; e-mail: altuninf@gmail.com; 129, Leninsky Prospect building. 3, apt. 119, Moscow, Russia; phone: +79889496866; testing engineer.

УДК 004.432.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-98-111

И.И. Левин, А.И. Дордопуло, И.В. Писаренко, Д.В. Михайлов**ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГРАФОВ С АССОЦИАТИВНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ
НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ SET@L**

Как правило, информационный граф с ассоциативными операциями реализуется в виде последовательной («голова/хвост») или параллельной («разбиение пополам») топологии, причем обе структуры содержат одинаковое число операционных вершин. Редукционные преобразования графов с представленными топологиями при недостатке вычислительного ресурса не обеспечивают создание эффективной ресурснезависимой программы: вариант «разбиение пополам» характеризуется нерегулярной межитерационной коммутацией, а структура «голова/хвост» – увеличенной скважностью данных при редукции. В данной статье предлагается преобразовать топологию графа с ассоциативными операциями в один из комбинированных вариантов с последовательными и параллельными фрагментами вычислений, синтезированный в соответствии с заданным вычислительным ресурсом. Это позволяет повысить удельную производительность вычислений при редукции. Модифицированная топология включает изоморфные подграфы с топологией «разбиение пополам», содержащие максимальное число аппаратно реализуемых операционных вершин, а обработка промежуточных данных осуществляется по принципу «голова/хвост». Вычислительная структура для рассмотренной топологии имеет минимальную латентность и состоит из одного базового подграфа и одной вершины, в которую редуцируется блок обработки промежуточных данных с топологией «голова/хвост». Разработан алгоритм, позволяющий в зависимости от доступного аппаратного ресурса перейти от базового последовательного варианта реализации к различным комбинированным топологиям вплоть до предельного случая топологии «разбиение пополам». Поскольку традиционные методы параллельного программирования могут описать множество топологий только в виде набора отдельных подпрограмм, для создания ресурснезависимого описания графов с ассоциативными операциями предлагается использовать язык архитектурно-независимого программирования Set@L. Принципы построения топологий «голова/хвост» и «разбиение пополам» описаны в виде признаков

метода обработки множеств на языке Set@l, а ресурсонезависимая программа оперирует этими типами и типами параллелизма для модификации топологии графа и последующей редукции производительности в соответствующих аспектах программы.

Информационные графы с ассоциативными операциями; ресурсонезависимое программирование; редукция производительности; язык программирования Set@l; признаки «голова/хвост» и «разбиение пополам».

I.I. Levin, A.I. Dordopulo, I.V. Pisarenko, D.V. Mihaylov

DESCRIPTION OF GRAPHS WITH ASSOCIATIVE OPERATIONS IN SET@L PROGRAMMING LANGUAGE

Usually, an information graph with associative operations has a sequential (“head/tail”) or parallel (“half-splitting”) topology with invariable quantity of operational vertices. If computational resource is insufficient for the implementation of all vertices, the reduction transformations of graphs with basic topologies do not allow for the creation of an efficient resource-independent program. In fact, the “half-splitting” variant is characterized by irregular connections between iterations, and the “head/tail” structure has an increased data duty cycle in the reduced form. In this paper, we propose to transform the topology of a graph with associative operations into a combined variant with sequential and parallel fragments of calculations. The resultant combined topology depends on computational resource of a parallel computer system, and such transformation provides the improvement of specific performance for the reduced computing structure. The considered topology contains isomorphic subgraphs with the “half-splitting” topology, which include the maximal number of hardware implemented operational vertices, but the processing of intermediate data is performed using the “head/tail” principle. The computing structure for the combined topology has minimal latency and includes one basic subgraph and one vertex with feedback. This vertex is obtained as a result of the “head/tail” block reduction. We develop an algorithm for the conversion of the initial sequential graph to various combined topologies or to the limiting case of the “half-splitting” topology with regard to available hardware resource. Within traditional methods of parallel programming, it is possible to describe the variety of topologies only as a set of separated subprograms. To create an efficient resource-independent program, we propose the application of the Set@l programming language. We describe the “head/tail” and “half-splitting” principles as the attributes of set processing methods in Set@l. Resource-independent program uses these types and parallelism attributes for the modification of topology and further reduction of performance in the corresponding aspects.

Information graphs with associative operations; resource-independent programming; performance reduction; Set@l programming language; “head/tail” and “half-splitting” attributes.

Введение. Ассоциативность представляет собой фундаментальное свойство бинарных операций, которое определяет независимость результата расчетов от порядка вычислений [1, 2]. Типовыми графами на основе ассоциативных операций являются графы сложения и умножения (при выполнении определенных условий), конъюнкции и дизъюнкции элементов массива, поиска максимума и минимума. Известны два базовых варианта топологии таких графов с одинаковым числом вершин: последовательный (линейная структура) и параллельный (пирамидальная или каскадная структура) [3–5]. В действительности, помимо двух указанных случаев существует множество комбинированных вариантов топологий, составленных из чередующихся параллельных и последовательных фрагментов вычислений [6].

Для масштабирования параллельных вычислений при решении прикладных задач на вычислительных системах (ВС) с реконфигурируемой архитектурой [7–10] используются методы редукции производительности [11]. Редукционные преобразования информационных графов на основе ассоциативных операций с последовательной и параллельной топологиями не обеспечивают создание эффективной ресурсонезависимой программы: граф с пирамидальной структурой характеризуется нерегулярной межитерационной коммутацией, а последовательный

вариант реализации имеет самую большую латентность, которая приводит к существенному увеличению скважности данных при редукции. Поскольку все операции в рассматриваемых графах ассоциативны, можно модифицировать топологию графа для удобства редукционных преобразований. Преобразование графа в кадр [12] возможно только при его изоморфной структуре, поэтому необходимо использовать один из комбинированных вариантов топологии, который содержит изоморфные подграфы. Для заданного вычислительного ресурса возможно синтезировать информационно эквивалентный граф, содержащий аппаратно реализуемые изоморфные подграфы с максимальной степенью параллелизма ассоциативных операций. Традиционные методы программирования для реконфигурируемых и гибридных ВС [13] не позволяют изменять информационный граф решаемой прикладной задачи в зависимости от доступного вычислительного ресурса, поэтому каждая топология может быть описана только в виде отдельной подпрограммы.

В работах [14–16] предложен язык архитектурно-независимого параллельного программирования Set@1 (Set Aspect-Oriented Language), основанный на парадигме аспектно-ориентированного программирования (АОП) и теоретико-множественном представлении исходного кода программы. Описав базовые принципы построения графов с ассоциативными операциями в виде специальных признаков метода обработки на языке Set@1, возможно синтезировать множество вариантов топологий и переходить между ними путем изменения типов и разбиений совокупностей. Приведение графа к редуцируемому виду при заданном объеме вычислительного ресурса реконфигурируемой ВС может осуществляться без изменения исходного кода программы.

Преобразование графов с ассоциативными операциями для эффективной редукции производительности. Информационные графы, которые состоят из двуместных ассоциативных операций f с одним выходом (например, операций сложения, умножения, конъюнкции или дизъюнкции, поиска максимума или минимума), могут быть построены по одному из двух базовых принципов [3–5]. Примеры стандартных топологий таких графов для операционных вершин с двумя входами изображены на рис. 1. Принцип «голова/хвост» (рис. 1,а) предполагает последовательное выполнение ассоциативной операции f над элементами a_i множества входных данных A . На каждой итерации вычислений операция f выполняется над одним из элементов входных данных a_i («головой») [17] и промежуточным элементом s_j , который представляет собой результат обработки оставшейся части данных («хвоста») [17]. Исключением является итерация, на которой обрабатываются сразу два элемента входных данных a_1 и a_2 . На выходе каждой из операций формируется промежуточный (s_j) или окончательный (Res) результат вычислений.

Другой принцип – «разбиение (деление) пополам» (рис. 1,б) – предполагает параллельное выполнение ассоциативных операций f и основан на известном подходе «разделяй и властвуй», получившем широкое распространение в программировании [18]. Если двигаться от выходной вершины графа к его входным вершинам, то на каждой итерации множество входных данных $A = \{a_1, a_2, \dots, a_8\}$ (на первой итерации) или все его подмножества (на остальных итерациях) делятся на два подмножества A_1 и A_2 , каждое из которых содержит одинаковое число обрабатываемых элементов. Промежуточные результаты s_i и s_{i+1} обработки подмножеств-половин A_1 и A_2 являются входными данными для операции f на текущей итерации. Разбиение и движение по графу продолжается до тех пор, пока не будет получено по два элемента в каждом подмножестве исходного множества A .

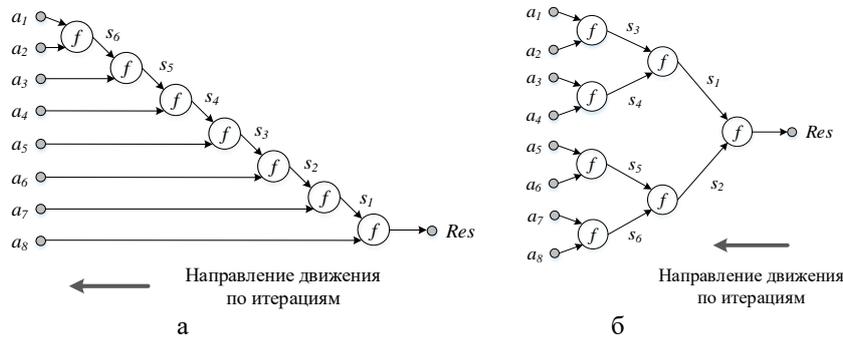


Рис. 1. Топологии графов на основе двуместных ассоциативных операций f , построенные по принципам «голова/хвост» (а) и «деление (разбиение) пополам» (б)

Представленные на рис. 1 топологии графов содержат одинаковое количество операционных вершин, но имеют разную латентность вычислительных структур: $\tau = n - 1$ для топологии «голова/хвост» (рис. 1,а) и $\tau = \log_2 n$ для топологии «разбиение пополам» (рис. 1,б), где n – мощность множества входных данных A .

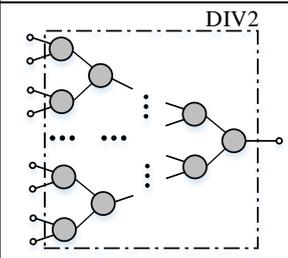
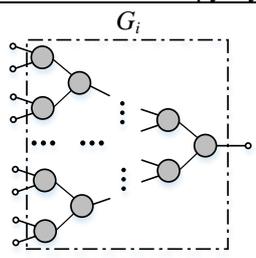
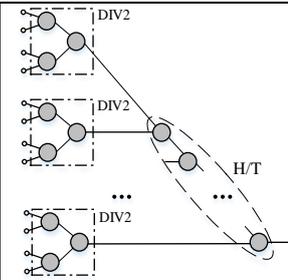
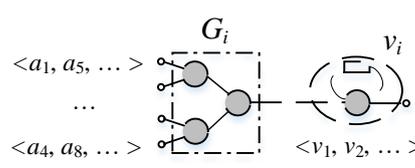
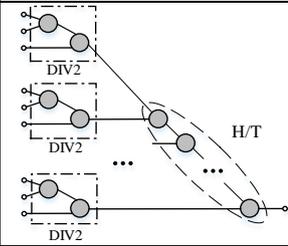
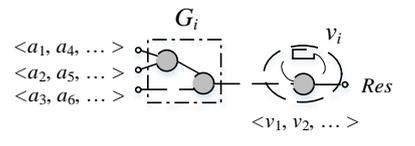
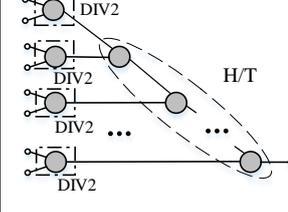
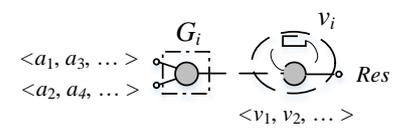
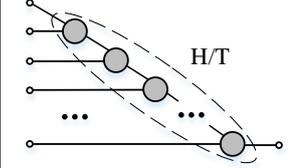
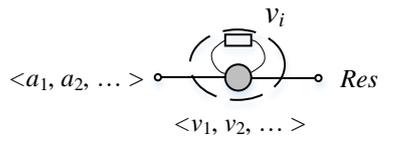
Если доступного вычислительного ресурса реконфигурируемой ВС достаточно для аппаратной реализации всех операционных вершин информационного графа с ассоциативными операциями, то используется топология с наименьшей латентностью – «разбиение пополам» (случай $R/R_0 = n - 1$ в табл. 1, где R – объем доступного вычислительного ресурса, R_0 – ресурс, занимаемый одной операционной вершиной). При нехватке вычислительного ресурса необходимо масштабировать вычисления с помощью методов редукции производительности [11]. Однако описание редукционных преобразований для топологии «разбиение пополам» достаточно трудоемко и громоздко из-за нерегулярной межитерационной коммутации и зависимости от размерности решаемой задачи. Свойство ассоциативности базовых операций позволяет модифицировать информационный граф задачи и перейти к топологии «голова/хвост», которая имеет удобную для редукции регулярную коммутационную структуру. С другой стороны, если невозможно разместить все операционные вершины графа, структурно-процедурная реализация топологии «голова/хвост» редуцируется до одной вершины с обратной связью ($R/R_0 = 1$ в табл. 1) [12], что обеспечивает высокую удельную производительность только в случае минимального объема доступного вычислительного ресурса R_0 . При конфигурациях вычислительного ресурса $R/R_0 = 2 \div (n - 2)$ необходимо перейти к одному из комбинированных вариантов топологии, содержащему последовательные и параллельные фрагменты вычислений [6], что позволит повысить удельную производительность. Прежде комбинированные топологии не рассматривались, так как в большинстве своем они не обладают регулярной и изоморфной структурой, что затрудняет автоматическое масштабирование вычислений и редукцию производительности. Поэтому ресурсонезависимое описание графа с ассоциативными операциями должно учитывать не только два предельных случая «разбиение пополам» и «голова/хвост», но и множество комбинированных вариантов топологий и правила перехода между ними для редукции производительности при разных конфигурациях ВС.

Топология информационного графа с ассоциативными операциями, модифицированная для редукции производительности при заданном объеме вычислительного ресурса реконфигурируемой ВС, включает две составляющие. Поскольку преобразование графа в кадр возможно только при его изоморфной структуре [12], первой составляющей являются изоморфные подграфы DIV2 (табл. 1), которые построены по принципу «разбиение пополам» и содержат максимальное число аппа-

ратно реализуемых операционных вершин. Вторая составляющая представляет собой блок Н/Т, построенный по принципу «голова/хвост» (табл. 1) и необходимый для обработки промежуточных данных и вычисления конечного результата.

Таблица 1

Топологии информационных графов с ассоциативными операциями и соответствующие им вычислительные структуры при разных объемах доступного вычислительного ресурса R реконфигурируемой ВС

Конфигурация	Топология	Вычислительная структура
$R/R_0=n-1$		
$R/R_0=4$		
$R/R_0=3$		
$R/R_0=2$		
$R/R_0=1$		

Если скважность данных при обратной связи составляет один такт, то блок Н/Т редуцируется до одной операционной вершины [6]. Поэтому аппаратно реализуемая вычислительная структура (см. табл. 1) включает один базовый подграф G_i и одну вершину v_i , которая соответствует редуцированному блоку Н/Т. Если вычислительного ресурса хватает для реализации только одной операционной вершины ($R/R_0=1$ в табл. 1), то комбинированная топология преобразуется в классическую топологию «голова/хвост»: подграфы DIV2 не реализуются, а единственная в вычислительной структуре операционная вершина соответствует блоку Н/Т размерностью $(n-1)$. В другом предельном случае, когда вычислительного ресурса ВС достаточно для размещения всех вершин информационного графа ($R/R_0=(n-1)$ в табл. 1), комбинированная топология переходит в стандартную топологию «разбиение пополам»: единственный подграф DIV2 включает все операционные вершины.

Исходный информационный граф с топологией «голова/хвост» возможно преобразовать в граф с одной из комбинированных топологий (см. табл. 1) или топологией «разбиение пополам» в зависимости от доступного вычислительного ресурса ВС R следующим образом:

1. Подготовительный этап: разделим все операционные вершины исходного графа на r групп по k вершин в каждой, где r – коэффициент редукции, $k=\text{floor}(R/R_0)-1$. Между соседними группами оставим по одной вершине для обработки промежуточных данных, как показано на рис. 2. Если в последнюю группу войдет меньше, чем k вершин, то дополним ее операционными вершинами до требуемой размерности.

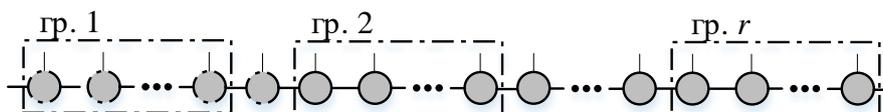
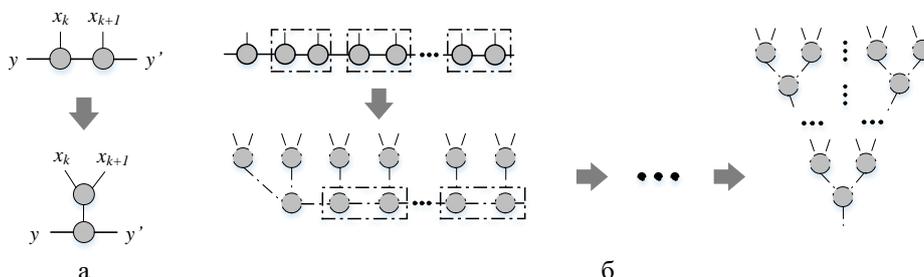


Рис. 2. Выделение групп операционных вершин в исходном графе, построенном по принципу «голова/хвост»

2. Формирование изоморфных подграфов с топологией «разбиение пополам»: выделяя пары соседних вершин и изменяя порядок выполнения операций в каждой паре в соответствии с рис. 3,а, преобразуем топологию каждой группы операционных вершин к топологии «разбиение пополам». Последовательность преобразований для одной из групп показана на рис. 3,б. В результате получим информационный граф, показанный на рис. 3,в.

3. Объединение подграфов с топологией «разбиение пополам» по принципу «голова/хвост»: Изменим порядок выполнения операций для всех пар «отдельная вершина – группа» по принципу, изображенному на рис. 4,а. После преобразования получим конечную топологию информационного графа, показанную на рис. 4,б.



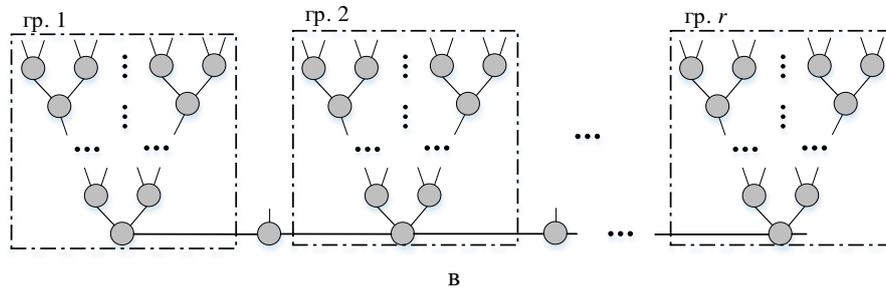


Рис. 3. Преобразование пары операционных вершин (а), последовательность преобразований в одной группе (б) и топология информационного графа (в), получаемая после преобразования всех групп операционных вершин исходного графа по принципу «разбиение пополам»

При структурно-процедурной реализации информационно-независимые изоморфные подграфы G_1, G_2, \dots, G_r (см. рис. 4,б), выделенные в результате модификации топологии графа с ассоциативными операциями, преобразуются в подкадр G_i [19] (рис. 4,в), на входы которого в кадре подаются кортежи данных. Из блока G_{r+1} , содержащего информационно-зависимые операционные вершины v_1, v_2, \dots, v_{r-1} , формируется одна дополнительная вершина с обратной связью v_i .

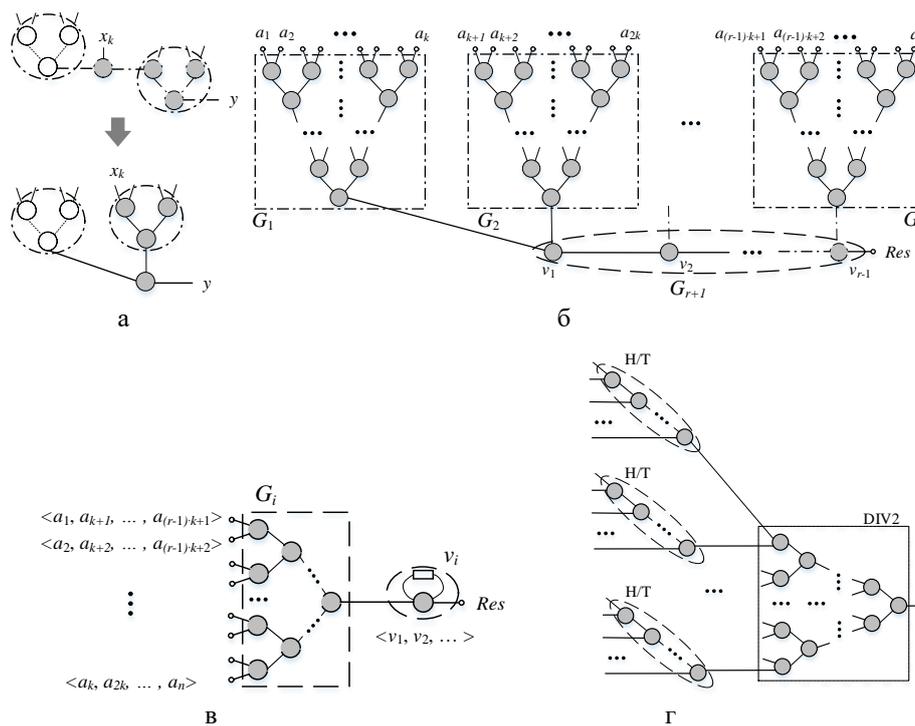


Рис. 4. Преобразование пары «отдельная вершина – группа» (а), конечная комбинированная топология графа (б) и соответствующая ей вычислительная структура (в), комбинированная топология с изоморфными подграфами, построенными по принципу «голова/хвост» (г)

Следует отметить, что для эффективной реализации структурно-процедурной организации вычислений представляет интерес и другой вариант комбинированной топологии графа с ассоциативными операциями, показанный на рис. 4, г. Если латентность операционной вершины превышает один такт, то блоки последовательной обработки Н/Т преобразуются в независимые устройства с накоплением, которые объединяются по схеме «конвейер в конвейере» [19]. Данный подход будет рассмотрен более подробно в последующих работах.

Описание признаков «голова/хвост» и «разбиение пополам» на языке программирования Set@I. Традиционные методы параллельного программирования, как правило, оперируют информационным графом с фиксированной структурой, поэтому их использование для описания преобразований топологии графа в соответствии с предложенным алгоритмом (см. рис. 2–4) достаточно трудоемко и малоэффективно. Код ресурсонезависимой программы, которая реализует рассмотренные преобразования, будет состоять из множества подпрограмм, связанных условными операторами и задающих отдельные варианты топологий. В отличие от классических языков параллельного программирования, возможности языка архитектурно-независимого программирования Set@I позволяют описать принципы построения графов с ассоциативными операциями в виде специальных признаков метода обработки, присваиваемых обрабатываемому множеству A . В таком случае исходный код программы описывает не отдельные реализации, а множество возможных топологий графа для заданной размерности задачи. Аспекты выбирают определенный вариант топологии, исходя из конкретных значений параметров конфигурации. Для изменения структуры информационного графа достаточно изменить тип и разбиение множества A , тогда как исходный код программы остается неизменным.

Рассмотрим описание принципов «голова/хвост» и «разбиение пополам» на языке программирования Set@I для стандартных топологий информационных графов с ассоциативными операциями, изображенных на рис. 1. С помощью синтаксической конструкции `attribute` [20] введем дополнительные признаки, код которых приведен на рис. 5.

<pre>attribute [f(a,b,c) type(f)=Op]: operand(element(a,b,c), attribute(Op)); c=f(a,b); end(Op2);</pre>	<pre>attribute Head(A): operand(set(A), element(Head(A))); Head(A)=A(1); end(Head);</pre>
<pre>attribute Tail(A): operand(set(A), set(Tail(A))); Tail(A)=dif(A,A(1)); end(Head);</pre>	<pre>attribute d2(A,A1,A2): operand(set(A,A1,A2)); n=card(A); A1=(A(k) k<=n/2); A2=dif(A,A1); end(d2);</pre>

Рис. 5. Описания признаков бинарной операции (f), выделения «головы» ($Head$) и «хвоста» ($Tail$) множеств и разбиения совокупности на два равномоощных подмножества ($d2$) на языке программирования Set@I

Признак базовой операции f (см. рис. 5) описан в обобщенном виде: конкретный тип операции Op уточняется в другом модуле программы и может принимать разные значения (например, '+' или '*'). Директива `operand` указывает типы объектов, которым может быть присвоен тот или иной признак.

Описание принципа построения топологии «голова/хвост» (Н/Т, граф на рис. 1,а) на языке программирования Set@I представлено на рис. 6. Признак линейки операций `Lf` строится рекурсивно (`Rec`) с использованием введенного ранее

признака базовой бинарной операции f (см. код на рис. 5) и задает отношение между обрабатываемым множеством данных A и результирующим элементом Res . Граф строится в направлении от выходной вершины к входным. На каждой итерации линейку операций Lf над элементами множества A можно представить как объединение линейки операций Lf над «хвостом» множества A и отдельной вершины f , на входы которой подаются «голова» множества A и промежуточный результат s последовательного выполнения ассоциативных операций f над $Tail(A)$, а выход Res является конечным или промежуточным результатом вычислений (см. строку 5 на рис. 6). Синтаксическая конструкция `break[<условие>:<операция>]` (строка 4 на рис. 6) выделяет условие завершения рекурсии и описывает операцию, завершающую формирование структуры информационного графа. При выполнении условия последняя линейка операций Lf преобразуется в особую вершину, на входы которой подаются два оставшихся элемента множества A .

```
(1) attribute [Lf(A, Res) | Lf=Rec(f), type(A)='H/T'] :
(2)   operand(set(A), element(Res));
(3)   element(s);
(4)   Lf(A, Res)=break[card(Tail(A))=1:
(5)     f(Head(Tail(A)), Head(A), Res)],
(6)     union[Lf(Tail(A), s), f(s, Head(A), Res)]];
end(Lf);
```

Рис. 6. Код признака Lf на языке программирования Set@1, реализующего принцип «голова/хвост» (H/T) для построения информационного графа с ассоциативными операциями f

Применяя аналогичные рассуждения и рекурсивный подход к описанию, можно описать параллельный принцип построения графов «разбиение пополам» (DIV2, граф на рис. 1,б) на языке программирования Set@1. В коде, приведенном на рис. 7, граф описан в направлении от выходной вершины к входным. На каждой итерации исходное множество A разбивается признаком `d2` на два подмножества $A1$ и $A2$ с равным количеством элементов (строка 3 на рис. 7). В таком случае пирамиду операций Pf над элементами A можно представить как объединение пирамиды операций Pf над элементами подмножества $A1$, пирамиды операций Pf над элементами подмножества $A2$ и отдельной вершины f (строка 6 на рис. 7). На входы этой вершины f подаются промежуточные результаты $s1, s2$ выполнения пирамиды операций над Pf подмножествами совокупности A , а выход Res представляет собой конечный или промежуточный результат вычислений. Рекурсия завершается при выполнении условия, показанного в строке 5 на рис. 7. Распараллеливание вычислений достигается путем удвоения числа веток рекурсии на каждом шаге преобразований.

Таким образом, язык архитектурно-независимого программирования Set@1 позволяет описать базовые принципы построения графов на основе ассоциативных операций с одним выходом в виде специальных признаков метода обработки H/T и DIV2, которые присваиваются множеству входных данных A . В отличие от предложенных ранее типов множеств по параллелизму `par`, `seq`, `pipe`, `conc` и `imp` [15, 16], данные признаки определяют не конкретные методы распараллеливания вычислений, а общую структуру информационного графа решаемой прикладной задачи, которая может быть модифицирована в соответствии с конкретной архитектурой или конфигурацией параллельной ВС. Однократно описав

принципы «голова/хвост» и «разбиение пополам», возможно получить множество разных вариантов реализации вычислений без изменения исходного кода программы. Некоторые примеры фрагментов кода, использующих типы обработки Н/Т и DIV2 для синтеза различных информационных графов, приведены на рис. 8.

```
(1) attribute [Pf(A, Res) | Pf=Rec(f), type(A)='DIV2'] :
(2)   operand(set(A), element(Res));
(3)   d2(A, A1, A2);
(4)   element(s1, s2);
(5)   Pf(A, Res)=break[card(A1)=1 and card(A2)=1: f(Head(A1), Head(A2), Res)],
(6)     union[Pf(A1, s1), Pf(A2, s2), f(s1, s2, Res)];
(7) end(Pf);
```

Рис. 7. Код признака Pf на языке программирования Set@I, который реализует принцип «разбиение пополам» (DIV2) для описания информационного графа на основе ассоциативной операции f

Структура информационного графа G (см. код на рис. 8) определяется отношением Gf между обрабатываемым множеством A и результатом вычислений Res. Пользователю достаточно изменить только тип совокупности A для получения информационного графа с совершенно иной коммутационной структурой, тогда как обобщенные описания признаков «голова/хвост» и «разбиение пополам» остаются неизменными. Тип базовой ассоциативной операции f определяет функциональность операционных вершин синтезируемого информационного графа.

<p><u>Линейка сумматоров</u> $G = \mathbf{Gf}(A, \text{Res});$ $\mathbf{Gf} = (\mathbf{Rec}(f), \mathbf{type}(A) = \mathbf{H/T});$ $\mathbf{type}(f) = \mathbf{+};$</p>	<p><u>Пирамида сумматоров</u> $G = \mathbf{Gf}(A, \text{Res});$ $\mathbf{Gf} = (\mathbf{Rec}(f), \mathbf{type}(A) = \mathbf{DIV2});$ $\mathbf{type}(f) = \mathbf{+};$</p>
<p><u>Линейка умножителей</u> $G = \mathbf{Gf}(A, \text{Res});$ $\mathbf{Gf} = (\mathbf{Rec}(f), \mathbf{type}(A) = \mathbf{H/T});$ $\mathbf{type}(f) = \mathbf{*};$</p>	<p><u>Пирамидальный поиск максимума</u> $G = \mathbf{Gf}(A, \text{Res});$ $\mathbf{Gf} = (\mathbf{Rec}(f), \mathbf{type}(A) = \mathbf{DIV2});$ $\mathbf{type}(f) = \mathbf{max};$</p>

Рис. 8. Фрагменты кода, использующие типы совокупностей «голова/хвост» (H/T) и «разбиение пополам» (DIV2) для описания разных информационных графов на основе ассоциативных операций с одним выходом

Разработка ресурснезависимой программы на языке Set@I. Используя признаки метода обработки H/T и DIV2 (см. программный код на рис. 6 и 7), возможно описать преобразование топологии информационного графа с ассоциативными операциями в соответствии с объемом доступного вычислительного ресурса (табл. 1) как изменение типизации и разбиения множества обрабатываемых данных A. В общем случае совокупность A должна иметь следующую форму, которая обеспечит выделение изоморфных подграфов, минимальную латентность вычислительной структуры и удобство дальнейших редукционных преобразований:

$$A = \mathbf{H/T} [subA_1, subA_2, \dots, subA_r]; \quad (1)$$

$$subA_p = \mathbf{DIV2}\{a_b, a_{b+1}, \dots, a_c\}, \quad (2)$$

где $subA_p$ – p-е подмножество (тип DIV2) множества A (тип H/T); r – коэффициент редукции производительности; b, c – границы диапазона индексов элементов множества A, попадающих в подмножество $subA_p$. При r = 1 формулы (1), (2) опи-

связают топологию «разбиение пополам»: единственное подмножество $subA_i$ содержит все элементы $a_1...a_n$. Если $r = n-1$, то множество A состоит из n подмножеств с одним элементом, что соответствует топологии «голова/хвост».

Признак `graph_modification`, преобразующий исходную совокупность обрабатываемых данных `Array` в результирующее множество A с параметризованной структурой, определяемой формулами (1) и (2), описывается по тому же принципу, что и при редукционных преобразованиях графов сортирующих сетей в работе [14]. Фрагмент программного кода на рис. 9 выбирает ту или иную топологию информационного графа с ассоциативными операциями в зависимости от доступного вычислительного ресурса R реконфигурируемой ВС, размерности обрабатываемого массива n и ресурс $R0$, занимаемого одной операционной вершиной. Предложенный подход позволяет синтезировать топологию, которая наиболее удобна для дальнейших редукционных преобразований при заданном объеме вычислительного ресурса. В предельных случаях комбинированная топология переходит в базовые топологии «голова/хвост» или «разбиение пополам». В то же время обеспечивается минимальная латентность вычислительной структуры как при структурной, так и при структурно-процедурной реализации вычислений.

```
Q=floor(R/R0); // определение числа вершин, реализуемых на доступном
                // вычислительном ресурсе R;
r=ceil(n/Q); // расчет коэффициента редукции;
graph_modification(Array,A,r); // разбиение и типизация множества A;
```

Рис. 9. Программный код на языке Set@1, осуществляющий преобразование топологии информационного графа с ассоциативными операциями в соответствии с объемом доступного вычислительного ресурса

В результате работы транслятора языка программирования Set@1 из совокупности A (см. формулы (1) и (2)) синтезируется множество G , которое описывают топологию информационного графа с ассоциативными операциями в следующей теоретико-множественной форме:

$$G = \vec{\{ \{ subG_1, subG_2, \dots, subG_r \}, v_1, v_2, \dots, v_{r-1} \}}, \quad (3)$$

где $\vec{\{ \}}$ – обозначение параллельно-зависимого типа обработки (тип по параллелизму `cons` в языке программирования Set@1 [9, 10]); $\{ \}$ – обозначение параллельно-независимого типа обработки (тип по параллелизму `par` [9, 10]); $subG_i$ – i -й подграф, построенный по принципу «разбиение пополам» (DIV2 в табл. 1); v_i – i -я операционная вершина, входящая в блок обработки промежуточных результатов, который построен по принципу «голова/хвост» (Н/Т в табл. 1). Дальнейшая редукция производительности осуществляется с помощью специального аспекта `reduction`, который преобразует совокупность (3) к следующему виду:

$$Gr = \langle subG_1, \{ subG_2, v_1 \}, \{ subG_3, v_2 \}, \dots, \{ subG_r, v_{r-1} \} \rangle. \quad (4)$$

Элементы исходного множества G перегруппируются таким образом, чтобы аппаратно реализуемая вычислительная структура содержала один подграф с топологией «разбиение пополам» и одну дополнительную вершину, которая соответствует последовательному блоку обработки промежуточных результатов Н/Т в табл. 1. Получаемая структура занимает весь доступный вычислительный ресурс R и имеет минимальную латентность.

Заключение. Таким образом, стандартные топологии информационных графов с ассоциативными операциями эффективны только в предельных случаях минимального и максимального объема доступного вычислительного ресурса рекон-

фигурируемой ВС. В остальных случаях целесообразно модифицировать топологию графа в соответствии с предложенным в статье алгоритмом и преобразовать ее к виду, удобному для проведения редукции производительности. Однако традиционные методы параллельного программирования оперируют информационным графом с фиксированной структурой, поэтому их использование для описания преобразований топологии графа в соответствии с параметрами конфигурации ВС достаточно трудоемко и малоэффективно. Для решения данной проблемы предложено использовать язык архитектурно-независимого программирования Set@1, в котором все возможные топологии графов с ассоциативными операциями могут быть представлены в виде двух признаков метода обработки, присваиваемых множеству исходных данных, и их комбинаций. Разработана ресурсонезависимая программа на языке Set@1, которая включает аспект преобразования топологии графа и аспект редукции производительности.

Поддержка. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00545.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Т. 4, А. Комбинаторные алгоритмы. Ч. 1: пер. с англ. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2013. – 960 с.
2. Новиков Ф. Дискретная математика. – 3-е изд. – СПб.: Питер, 2019. – 496 с.
3. Кареева Е.Д. Основы многопоточного и параллельного программирования. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – 356 с.
4. Задача суммирования элементов массива // Лаборатории Параллельных информационных технологий НИВЦ МГУ. – URL: <https://parallel.ru/fpga/Summ2> (дата обращения: 27.04.2020).
5. Старченко А.В., Берцун В.Н. Методы параллельных вычислений. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. – 223 с.
6. Ефимов С.С. Обзор методов распараллеливания алгоритмов решения некоторых задач вычислительной дискретной математики // Математические структуры и моделирование. – 2007. – Вып. 17. – С. 72-93.
7. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Развитие отечественных многокристалльных реконфигурируемых вычислительных систем: от воздушного к жидкостному охлаждению // Тр. СПИИРАН. – 2017. – Вып. 1. – С. 5-31.
8. Mittal S., Vetter J. A survey of CPU-GPU heterogeneous computing techniques // ACM Computing Surveys. – 2015. – Vol. 47. – Art. 69.
9. Waidyasooriya H.M., Hariyama M., Uchiyama K. Design of FPGA-Based Computing Systems with OpenCL. – Cham: Springer, 2018. – 126 p.
10. Tessier R., Pocek K., DeHon A. Reconfigurable Computing Architectures // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, No. 3. – P. 332-354.
11. Левин И.И., Дордопуло А.И. К вопросу об автоматическом создании параллельных прикладных программ для реконфигурируемых вычислительных систем // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 66-81.
12. Каляев А.В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. – М.: Янус-К, 2003. – 380 с.
13. Левин И.И., Дордопуло А.И., Гудков В.А. и др. Средства программирования реконфигурируемых и гибридных вычислительных систем на основе ПЛИС // XIII Междунар. конф. «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ-2019), короткие статьи и описания плакатов. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2019. – С. 299-312.
14. Писаренко И.В., Алексеев К.Н., Мельников А.К. Ресурсонезависимое представление сортирующих сетей на языке программирования Set@1 // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 11. – С. 53-60.
15. Levin I.I., Dordopulo A.I., Pisarenko I.V., Melnikov A.K. Aspect-Oriented Set@1 Language for Architecture-Independent Programming of High-Performance Computer Systems // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – Vol. 1129. – P. 517-528.

16. Левин И.И., Дордопуло А.И., Писаренко И.В., Мельников А.К. Язык архитектурно-независимого программирования вычислительных систем Set@1 // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 3. – С. 48-56.
17. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Т. 1. Основные алгоритмы. – 3-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2017. – 720 с.
18. Дасгутта С., Пападимитриу Х., Вазирани У. Алгоритмы: пер. с англ. / под ред. А. Шеня. – М.: МЦНМО, 2014. – 320 с.
19. Коваленко А.Г., Левин И.И., Мельников А.К. Автоматизация построения параллельно-конвейерных программ для реконфигурируемых вычислительных систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 5. – С. 50-56.
20. Levin I.I., Dordopulo A.I., Pisarenko I.V., Melnikov A.K. Objects of Alternative Set Theory in Set@1 Programming Language // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11657. – P. 18-31.

REFERENCES

1. Knut D.E. *Iskusstvo programmirovaniya* [The Art of Computer Programming]. Vol. 4, A. *Kombinatornye algoritmy* [Combinatorial Algorithms]. Part 1: transl. from engl. Moscow: ООО «I. D. Vil'yams», 2013, 960 p.
2. Novikov F. *Diskretnaya matematika* [Discrete Mathematics]. 3rd ed. Saint Petersburg: Piter, 2019, 496 p.
3. Karepova E.D. *Osnovy mnogopotochnogo i parallel'nogo programmirovaniya* [Fundamentals of Multithreaded and Parallel Programming]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2016, 356 p.
4. Zadacha summirovaniya elementov massiva [Problem of Array Elements' Summation], *Laboratorii Parallel'nykh informatsionnykh tekhnologiy NIVTS MGU* [The Laboratory of Parallel Information Technologies of the Research Computing Center of the Moscow State University]. Available at: <https://parallel.ru/fpga/Summ2> (accessed 27 April 2020).
5. Starchenko A.V., Bertsun V.N. *Metody parallel'nykh vychisleniy* [Methods of Parallel Computing]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2013, 223 p.
6. Efimov S.S. *Obzor metodov rasparallelivaniya algoritmov resheniya nekotorykh zadach vychislitel'noy diskretnoy matematiki* [Review of Parallelizing Methods for Algorithms Aimed at Solution of Certain Problems of Computational Discrete Mathematics], *Matematicheskie struktury i modelirovanie* [Mathematical Structures and Modeling], 2007, Issue 17, pp. 72-93.
7. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoylov V.I. *Razvitie otechestvennykh mnogokristall'nykh rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistem: ot vozdušnogo k zhidkostnomu okhlazhdeniyu* [Evolution Domestic of Multichip Reconfigurable Computer Systems: from Air to Liquid Cooling: From Air to Liquid Cooling], *Tr. SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2017, Issue 1, pp. 5-31.
8. Mittal S., Vetter J. A survey of CPU-GPU heterogeneous computing techniques, *ACM Computing Surveys*, 2015, Vol. 47, Art. 69.
9. Waidyasooriya H.M., Hariyama M., Uchiyama K. *Design of FPGA-Based Computing Systems with OpenCL*. Cham: Springer, 2018, 126 p.
10. Tessier R., Pocek K., DeHon A. *Reconfigurable Computing Architectures*, *Proceedings of the IEEE*, 2015, Vol. 103, No. 3, pp. 332-354.
11. Levin I.I., Dordopulo A.I. *K voprosu ob avtomaticheskoy sozdaniy parallel'nykh prikladnykh programm dlya rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistem* [On the problem of automatic development of parallel applications for reconfigurable computer systems], *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2020, Vol. 25, No. 1, pp. 66-81.
12. Kalyaev A.V., Levin I.I. *Modul'no-narashchivaemye mnogoprotsessornye sistemy so strukturno-protsedurnoy organizatsiey vychisleniy* [Modular-Expandable Multiprocessor Systems with Structural and Procedural Organization of Calculations]. Moscow: YAnus-K, 2003, 380 p.
13. Levin I.I., Dordopulo A.I., Gudkov V.A. *i dr. Sredstva programmirovaniya rekonfiguriruemyykh i gibridnykh vychislitel'nykh sistem na osnove PLIS* [Tools for Programming of Reconfigurable and Hybrid Computer Systems Based on FPGAs], *XIII Mezhdunar. konf. «Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii» (PaVT-2019), korotkie stat'i i opisaniya plakatov* [XIII International Conference «Parallel computational technologies» (PCT'2019), short papers and poster descriptions]. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2019, pp. 299-312.

14. *Pisarenko I.V., Alekseev K.N., Mel'nikov A.K.* Resursonezavisimoe predstavlenie sortiruyushchikh setey na yazyke programmirovaniya Set@1 [Resource-Independent Representation of Sorting Networks in Set@1 Programming Language], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies], 2019, No. 11, pp. 53-60.
15. *Levin I.I., Dordopulo A.I., Pisarenko I.V., Melnikov A.K.* Aspect-Oriented Set@1 Language for Architecture-Independent Programming of High-Performance Computer Systems, *Communications in Computer and Information Science*, 2019, Vol. 1129, pp. 517-528.
16. *Levin I.I., Dordopulo A.I., Pisarenko I.V., Mel'nikov A.K.* Yazyk arkhitekturno-nezavisimogo programmirovaniya vychislitel'nykh sistem Set@1 [Architecture-Independent Set@1 Programming Language for Computer Systems], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies], 2019, No. 3, pp. 48-56.
17. *Knut D.E.* Iskusstvo programmirovaniya. T. 1. Osnovnye algoritmy [The Art of Computer Programming. Vol. 1. Fundamental Algorithms]. 3rd ed. Moscow: OOO «I.D. Vil'yams», 2017, 720 p.
18. *Dasgupta S., Papadimitriou Kh., Vazirani U.* Algoritmy [Algorithms]: transl. from engl., ed. by A. Shenyu. Moscow: MTSNMO, 2014, 320 p.
19. *Kovalenko A.G., Levin I.I., Mel'nikov A.K.* Avtomatizatsiya postroeniya parallel'no-konveyernykh programm dlya rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistem [Automatization of parallel-pipeline program development for reconfigurable computer systems], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies], 2013, No. 5, pp. 50-56.
20. *Levin I.I., Dordopulo A.I., Pisarenko I.V., Melnikov A.K.* Objects of Alternative Set Theory in Set@1 Programming Language, *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, Vol. 11657, pp. 18-31.

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

Левин Илья Израилевич – Южный федеральный университет; e-mail: iilevin@sfnu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Петровская, 15, кв. 143; тел.: 88634612111; и.о. зав. кафедрой интеллектуальных и многопроцессорных систем; д.т.н., профессор.

Писаренко Иван Вадимович – e-mail: ivan123tgn@yandex.ru; 347942, г. Таганрог, ул. Нижняя линия, 8; тел.: 89185978535; аспирант.

Михайлов Денис Васильевич – e-mail: mixailow.den@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Фрунзе, 61, кв. 11; тел.: 89287502869; аспирант.

Дордопуло Алексей Игоревич – Общество с ограниченной ответственностью «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров». e-mail: dordopulo@superevm.ru; 347902, г. Таганрог, 9-й переулок, 44; тел.: 88634477407; начальник отдела математико-алгоритмического обеспечения; к.т.н.

Levin Ilya Izrailevich – Southern Federal University. e-mail: iilevin@sfnu.ru; 15, Petrovskaya street, ap. 143, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634612111; head of the department of intellectual and multiprocessor systems; dr. of eng. sc.; professor.

Pisarenko Ivan Vadimovich – e-mail: ivan123tgn@yandex.ru; 8, Nizhnjaja Linija street, Taganrog, 347942, Russia; phone: +79185978535; postgraduate student.

Mikhailov Denis Vasilevich – e-mail: mixailow.den@gmail.com; 61, Frunze stryue, ap. 11, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79287502869; postgraduate student.

Dordopulo Alexey Igorevich – “Supercomputers and Neurocomputers Research Center” Co. Ltd.; e-mail: dordopulo@superevm.ru; 44, 9th lane, Taganrog, 347902, Russia; phone: +78634477407; head of the division of mathematic and algorithmic support; cand. of eng. sc.

Я.К. Салал, С.М. Абдуллаев

**МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ
ИНДИВИДУАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ: ДЕМОНСТРАЦИЯ ПОДХОДОВ
И АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Как показывает анализ данных международных тестирований знаний учащихся, среднее и высшее образование многих странах переживает кризис, который в том числе вызван не адекватностью системы мониторинга качества традиционного и дистанционного образования. В свою очередь, развитие такой системы мониторинга требует разработки методов классификации и квантификации, необходимых для прогноза индивидуальных и коллективных успехов учащихся. В этой статье теоретически и экспериментально показано, что наиболее перспективным подходом, решающим одновременно обе задачи прогноза, является создание гетерогенных ансамблей, состоящих из нечетного числа различных базовых классификаторов, таких как деревья решений, простейшие нейронные сети, наивный байесовский классификатор и другие. Проведя обучение и тестирование 11 различных бинарных классификаторов на шести различных выборках образовательных данных, нами показано, что индивидуальный детерминированный прогноз таких ансамблей превосходит по точности прогнозы как отдельных базовых классификаторов, так и однородных ансамблей созданных по технологиям бэггинга и бустинга. Преимущество гетерогенных ансамблей созданных из трех, пяти и семи классификаторов становится определяющим, если учесть, что при естественном дисбалансе выборки образовательных данных, полезным прогнозом классификатора может считаться только такой прогноз, точность которого превосходит относительную частоту класса объектов имеющих наибольшую повторяемость в выборке данных. Главным преимуществом гетерогенного ансамбля является возможность трансформации детерминированного прогноза в вероятностный прогноз, когда вместо отнесения объекта к тому или иному классу, даются вероятности его принадлежности к отдельным классам. На основе этого нами предложен новый метод бинарной квантификации, когда индивидуальные вероятности принадлежности к каждому из классов объектов суммируются по отдельности, а полученные в итоге суммарные вероятности интерпретируются как относительные частоты объектов в выборке. В результате экспериментов показано, что такая бинарная ансамблевая квантификация по точности заметно превосходит традиционный метод «классифицируй и считай».

Прогноз индивидуальных и коллективных успехов учащихся; анализ образовательных данных; классификация и квантификация; несбалансированные выборки; гетерогенные ансамбли; детерминированный и вероятностный прогноз.

Ya.K. Salal, S.M. Abdullaev

**MONITORING OF THE EDUCATION QUALITY AND IMPLEMENTING
OF INDIVIDUAL LEARNING: DEMONSTRATION OF APPROACHES
AND EDUCATIONAL DATA MINING ALGORITHMS**

The quality monitoring system for traditional and distance education requires the development of machine learning classification and quantification techniques necessary to predict individual and collective student performance. This article theoretically and experimentally shows that the most promising approach that simultaneously solves both forecast tasks is to create heterogeneous ensembles consisting of an odd number of different base classifiers, such as decision trees, simple neural networks, naive Bayesian classifier and others. By training and testing 11 different binary classifiers on six different samples of educational data, we show that the individual determined forecast of such ensembles exceeds the accuracy of forecasts of both individual base classifiers and homogeneous ensembles created by bagging and busting technologies. The advantage of heterogeneous ensembles is decisive when we deal with the imbalance of sample characteristic of

educational data. In these cases, only the forecasts with accuracies exceeding the relative frequency of the class of objects dominating in the sample of data can be considered as useful forecasts. The main advantage of the heterogeneous ensemble is the ability to transform the deterministic forecast into a probabilistic forecast, when instead of referring the object to a particular class, the probability of its belonging to individual classes is given. On this basis, we have proposed a new method of binary quantification, where individual probabilities of belonging to each of the classes of objects are summed up separately, and the resulting total probabilities are interpreted as relative frequencies of objects in the sample. As a result of experiments, it is shown that such ensemble binary quantification is significantly superior to the traditional "classify and count" method.

Individual and collective student performance forecasts; educational data mining; classification and quantification; imbalanced datasets; heterogeneous ensembles; deterministic and probabilistic forecast.

Introduction. The main problem of the higher and secondary education system in the fast-changing world needs is an inability to rapid self-improvement of the centuries-old structures of the nature of the teacher-pupil relationship, including the knowledge transfer, individual and collective student performance evaluation. It is clear that the school management type must be reformed also.

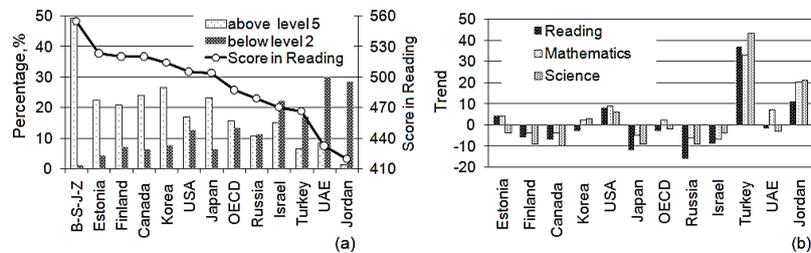


Fig. 1. Indicators of education systems in selected countries. (a) Assessment of reading quality (line) and percentage of 15 years old strains with low and high reading scores; (b) Trends in mathematics, science and reading (2015-2018). Beijing, Shanghai, Jiangsu and Zhejiang cities of China) were abbreviated by B-S-J-Z

Success in this race for the future of nations depends on many socio-economic, ethnic, religious, historic, ecologic and any more factors. There are no simple dependencies here. This illustrates Figure 1a, which is based on recent worldwide testing of PISA [1]. The figure provides the score in reading of 15 years-old schoolchildren (line) in some selected countries and the corresponding percentage of students which demonstrate the ability to understand the text above level 5 (below) of complexity and student's light (dark) shaded bars. It is obvious that in the countries with the best grades (major cities of continental China, Estonia, Finland, Canada, and Korea) the number of students with a high (low) level of knowledge is above 20 % (below 10%). The largest economies of the U.S. and Japan have similar or slightly weaker results, but overall, they are better than the average value of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Russia, which has slightly weaker rates than the OECD average, has an almost equal percentage of such students of about 11 %. We have shown in [2] that this situation with secondary education leads to the fact that even into the most prestigious faculties of Russian higher schools come a very small number of applicants, demonstrating the real ability to the mathematics of bachelor level. For comparison, in the Middle East and Turkey, where overall educational achievements are lower than in Russia, there is a tendency to sharply increase the portion of weaker learners up to 20–30 %. Moreover, if in Israel schools it is adjacent to 15 % of strong learners, in Turkey, United Arab Emirates (UAE) and Jordan it is contradicted by a very small part of students with significant

knowledge. It should be said that the other Arab countries listed in [1] have much worse indicators than Jordan. Iraq was not part of the PISA testing, but alternatively, we test that in the relatively favorable environment of education of Al-Diwaniyah city the proportion of students with low knowledge of mathematics and computer science may be as high as 60 % [3]. We hypothesized that low knowledge is the result of the lack of a quality monitoring system.

Note that the economic indicators of countries are not decisive for the success of the education system: gross per capita income of top-five Estonia (\$33,000) only slightly more than Turkey and Russia (\$28,000), and less than Israel (\$38,000) or UAE (\$70,000). Moreover, the quality of national education (Fig. 1a) itself does not speak of its trends (Fig. 1b). As the figure from all selected countries, only Turkey, Jordan and the USA significantly improved their performance in reading, mathematics, and sciences during 2015-2018, and the rest of countries reduce their scores. The largest drop of ~10% of quality indicators is observed in Russia. We demonstrate that in such a situation, the degradation of traditional education can be partially slowed by a combination of individual and project-based learning [2], with the leading role of individual study. We have also made the case for more widespread application of computer systems for individual learning (CSIL) which can be seen as adaptive multi-agent systems with a detailed design of educator and student agents to develop an adequate pattern of their learning interactions, i.e. pedagogy. No one doubts the need for individual education and CSIL in our country [4, 5]. However, the procedure for introducing these forms of education raises many questions. Firstly, individual education approaches in higher schools are contradicted by observed trends to increase in the number of students in groups and to the increasing number of such groups leading by the same educator. These processes lead to the homogenization of pedagogical efforts. Sometimes this homogeneity is elevated to the rank of law and takes the form of electronic slavery when the professor fills in countless forms, surveys, and tables that have nothing to do with real work. In contrast, the CSIL requires a certain freedom of the teacher, and, in essence, changes the existing system of relationships at the university. On the other hand, the CSIL can take on a significant part of the load, freeing up the teacher's time for more complex pedagogical procedures. Secondly, it is obvious that the existing e-learning systems are not yet set up for a detailed analysis of the individual characteristics of the student and his relationship with a professional mentor. In many such systems, attention is paid only to the formal ability of the student to receive the course material. In such electronic training, even if it is well structured and meets the requirements of the standards [5], the human factor is excluded.

In this paper, we cover two related issues, while simultaneously predict the quality of education and implement of individual learning. To do this, we will first look at the system of monitoring the quality of education (section 1), determining that these tasks are solved in the subsystem of the prediction of individual and collective success of students. Then in sections 2 and 3 we will show that the most appropriate methods for solving these problems are heterogeneous ensembles of supervised classifiers and quantifiers.

1. Education quality monitoring. The Education Quality Monitoring (MQE) general chart is shown in fig. 2. Based on this diagram, we discussed [3] the reasons for the low-quality of secondary education in the Republic of Iraq and we came to the conclusion that a three level of MQE system are needed. Work [3] discussed the background of the MQE of the Republic of Iraq at the national, local and regional levels. The main cause of weak human development indicators has been shown to be low-quality education due to the lack of national MQE in Iraq. We concluded that the national level of monitoring, the issue of forecasting is associated with a big data problem where the collection of initial information is a costly and time-consuming procedure, in addition to

that decision-making with feedback is a long-term process that may take years to complete. A regional monitoring system may be in a better situation. The need of this MQE at province level was demonstrated by the analysis of socio-demographic data and student performance at three preparatory schools in Al-Diwanyah city, Iraq. Despite the appropriate educational environment in capital of province, at least 45 of the number of students lost more than one year of study and 2/3 of them showed a low level of knowledge of two subjects of 160 students. Significant differences in the level of knowledge brought by different schools have also been found [3].

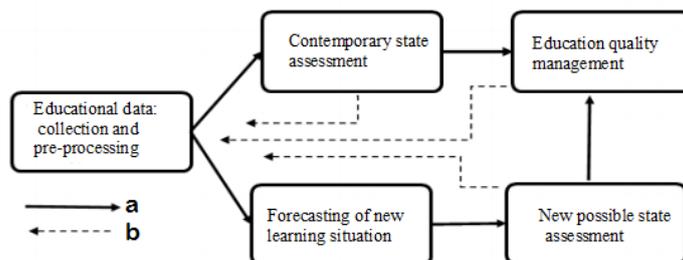


Fig. 2. Diagram of the educational quality monitoring and management with (a) direct and (b) feedback information flows

These observations have led us to conclude that the ongoing national-wide reform which introducing school-based management cannot be successful without the local MQE and their interaction with regional MQE. Particularly, we have demonstrated that decentralized national education systems with school-based management do not automatically lead to a rise of education quality. We conclude that at the local and regional level MQE, a key part of system is the prediction of a new situation with the quality of learning, determined by the individual and collective achievements of students, which in turn are educational data mining problems resolving by the classification and quantification methods [6–7]. Obviously, the mass-line courses implement [8] and recent ubiquitous implementation of distance learning as consequence of COVID-19 pandemic, also requires the application of these methods.

2. Supervised classification and sample imbalance. From the position of machine learning algorithms, the forecast of individual student performance can be produced by classification algorithms which trained on dataset containing previously collected data and then applied to new dataset. The task of the algorithm with the specified accuracy is to determine the class of the object. In our case, these are the student's future grades on the certain discipline. Without loss of generality, we will consider the problem of supervised classification into two classes: c_+ is the class of student's which knowledge ratings are above certain threshold and c_- is the class of students which educational performances are below this threshold.

Let's give 1) a training sample $D_1 = \{(x_1, y_1), \dots, (x_{n_1}, y_{n_1})\}$, where the vector $x_i \in X_1$ consists of m attributes of the feature space of the student $X_1 \subset X$, (where X more general feature space) and y_i denotes the corresponding class of this object, $y_i \in Y = \{c_+, c_-\}$ and 2) a classification algorithm that explores the training set and constructs a binary classifier model h , linking features and two classes of student performance (formula 1).

$$h: X_1 \rightarrow \{c_+, c_-\}. \quad (1)$$

It is assumed that this binary classifier applied to another independent and identically distributed sample of vectors $x_k \in X_2 \subset X$, will correctly indicate its individual classes $\hat{y}_k = c_+$ or $\hat{y}_k = c_-$. As a result of this, we obtain a forecast sample

$\hat{D}_2 = \{(\mathbf{x}_1, \hat{y}_1), \dots (\mathbf{x}_N, \hat{y}_N)\}$. A simple evaluation of the effectiveness of the classifier is obtained by comparing the class \hat{y}_k predicted by the classifier for the object \mathbf{x}_k with a known value y_k from test sample $D_2 = \{(\mathbf{x}_1, y_1), \dots (\mathbf{x}_N, y_N)\}$ and calculating the relative sum of correct forecasts CF. This rating is called the overall accuracy A of the classifier. (formula 2)

$$A = \frac{\text{Correct forecasts}}{\text{Total forecasts}} = \frac{\sum_{k=1}^{k=N} CF(k)}{N}, \text{ where } CF(k) = 1, \text{ if } \hat{y}_k = y_k \text{ or } CF(k) = 0, \text{ if } \hat{y}_k \neq y_k. \quad (2)$$

The A is a fairly used as indicator of student performance forecasts, generally based on various algorithms of decision trees, Naive Bayes (NB), Multi-Layer Perceptron (MLP), k-Nearest Neighbors (kNN) and others algorithms [9]. Typically, the accuracies A about of 0.7-0.8 or more were reviewed in [9] for these classifiers. If one compares these forecast accuracies with value of $A_r \approx 0.5$ of the forecasts produced by the "random" classifier, which virtually tossing a coin to select the class of an individual student, then the accuracy in the range of 0.7-0.8 will seem to us quite acceptable. In addition, any forecast with an accuracy of more than accuracy of random forecast of 0.5 is considered useful. This would be a true conclusion when training and test samples contain approximately equal two numbers N_+ and N_- , where N_+ is number of students belonged to class c_+ and N_- is number of students belonged to class c_- . It is usually said that these datasets are balanced. However, detailed study of the student performance forecasts [7] showed that reviewed above high values of A were most often caused by imbalance of educational data samples. Indeed, our entire education systems are set up in such a way that the number of students N_+ is much higher than N_- . Then, if the binary classifier mistakenly categorizes all new unknown students as a class of c_+ , the number of correct predictions in (2) will be equal to the N_+ , and the accuracy of this weak classifier A_w will be equal to relative frequency p_+ of dominant class c_+ :

$$A_w = \frac{\text{Correct forecasts}}{\text{Total forecasts}} \Big|_{\text{weak}} = \frac{N_+}{N_+ + N_-} \equiv p_+ = 1 - p_- \quad (3)$$

where recurrence of minority class c_- in sample is denoted by p_- . Thus, if an imaginary "optimistic" forecaster says that all unknown students will belong to the dominant class, the justification for his predictions will be more than random $A_r=0.5$! On the other hand, the p_+ vs. p_- imbalance results that binary classifier will be trained on a larger amount N_+ of data corresponding to features of dominant class, and, as consequence, on the strongly unbalanced samples $p_+ \gg p_-$, the minority class of academic performance is virtually ignored by forecasting procedure. These effects can be seen from Table 1 where are demonstrated the results of forecast of 10 different types of classifiers trained by using Weka 3.8 [10] on the samples of 100 students derived from 6 experimental unbalanced dataset which, as we are sure [7, 11–15], have reasonable pre-processing quality.

Table 1

Accuracies (in %) of forecast of base and ensemble classifiers* trained and tested in the same conditions

#row	# Column Source of data	1 P+	2 NB	3 MLP	4 SVM	5 KNN	6 J48	7 AB1	8 RF	9 H ₃	10 H ₅	11 H ₇
1	Diwanayah, Iraq [7]	62	83	88	81	81	97	93	92	94	90	99
2	Assam, India [11]	66	64	91	74	70	100	98	100	98	88	100
3	Kashmir, India [12]	66	90	100	92	89	86	88	87	96	93	94
4	Nasiriah, Iraq [13]	72	75	73	80	77	74	67	74	76	76	78
5	Porto, Portugal [14]	77	86	79	82	75	87	86	85	86	87	87
6	Wasit, Iraq [15]	90	95	88	89	85	88	93	91	97	89	91
Average		72,2	81,7	86,5	83,0	79,5	88,2	87,5	87,7	91,2	87,2	91,5

Comparing the frequency of the dominant $p+$ class in the test sample (column 1) with the accuracy of the NB, MLP, Support-Vector Machine (SVM), decision tree J48 (columns 2-6), you can see for each unbalanced sample of data, there is a classifier showing accuracy (crossed out) below $A_w=p+$ base line limit. Significantly, that in the last sample (row#6) with strong imbalance ratio of 9:1, all accuracies of classifiers were above 85%, but only one NB give useful forecast.

Two main types of solutions have been proposed to resolve the problem of training set imbalance: i) by artificially balancing using the re-sampling procedures [16] or ii) by so-called boosting procedure: sequential training of ensemble of classifier., where each new supplemental classifier, usually decision tree, is trained on the residual sample contained only the instances (students) which incorrectly classified by the prior ensemble member [17]. The classic type of such ensemble presented in the [13] is AdaBoostM1 (AB1, column #7). As you can see, with more accuracy in forecasts, this method also does not always satisfy the condition of the $A > A_w$. Another type of ensemble applicable to overcome imbalance problem is random forest RF which create a number of decision tree classifiers on various sub-samples of the dataset and uses averaging to improve the accuracy (column #8). Remarkably, that both the usual J48 and ensembles AB1 and RF, simultaneously showed poor results on the same dataset (row#4).

3. Classification and quantification by heterogeneous ensembles. The ensemble approaches of AdaBoost and Random Forest mentioned above are inherently homogeneous ensembles when new ensemble members are created by using the same technology. As it is illustrated by the above example of the homogeneous ensembles are not totally winning versions of the forecasting technology. Here we show a few basic advantages of the forecast with the help of heterogeneous ensembles.

3.1. Deterministic forecasts. First, the use of different basic algorithms brings us closer to the real-world situation, when the examination boards invite experts with experience in various fields. And as in real-world case, the technology for obtaining ensemble forecast results is quite simple and robust. Following the work [7], we will replace the labels “c+” and “c-” of binary classification by integers +1 and -1, and will consider the forecast of the binary classifier of model h_t for vector \mathbf{x}_i . It is clear that which will take two values $h_t(\mathbf{x}_i)=y_t \in \{-1,1\}$. Let's try to create an ensemble $H_T(\mathbf{x})$ contained the odd number T of such binary classifiers $h_t(\mathbf{x}_i)$. Let's assume, also, for simplicity that each of ensemble member gives equally important forecast for each of students in dataset. In this case, as is demonstrated by expression 3, the result of forecast $S(\mathbf{x})$ will be equal to the sign of the algebraic sum of forecasts of ensemble members $h_t(\mathbf{x}_i)$:

$$S(\mathbf{x}_i) = \text{sign} [H_T(\mathbf{x}_i)] = \text{sign} (\sum_{t=1}^T h_t(\mathbf{x}_i)), \quad \text{where } T = 2n + 1 \text{ and } [H_T(\mathbf{x}_i)] \in \{\pm 1, \dots, \pm T\}. \quad (4)$$

As can be seen this simple voting ensemble gives an erroneous forecast only is case when $n+1$ independent ensemble member gives non-correct forecast. Obviously, this deterministic forecast is no different in form from the predictions of the data of basic algorithms and homogeneous ensembles in Table 1. Therefore, it is easy for us to illustrate the advantage of a heterogeneous ensemble H_3 which contain as members J48, MLP, and NB classifiers. This ensemble as seen from column #9 gave predictions with accuracy above A_w on all samples. If we unify by (4) the individual results of all five basic classifiers J48, MLP, NB, SVM, and kNN to the ensemble H_5 , we will see that the quality of forecasts of H_5 will deteriorate slightly due to the weak forecasts of individual members on the sample #6. Obviously, if you add the results of two homogeneous ensembles AB1 and RF to the previous set, the resulting meta-ensemble H_7 will once again have a high performance. However, for the sample #6, the accuracy of 91 % was obtained when H_7 determined 99 students to the class of 1, and only one to the class -1. Note that exactly this situation was occurred earlier with RF forecasts.

Thus, the obvious advantage of the presented technology of heterogeneous ensemble in that it gives higher and more stable results of the forecast, allows easily to incorporate new ensemble member: any classifiers or other ensembles. It is obvious that you can consciously select sets of ensemble members, for example, conducting a preliminary ranking of the classifiers on the stability of forecasts [7].

3.2. Probabilistic forecasts. It is obvious that the student's future grades on a particular subject or overall results depend on a set of factors. Two main ones can be identified: the student's cognitive abilities and social motivation. Obviously, there are different combinations of these factors (see Table. 2), and if on the basis of some specially questionnaires to allocate their strength (e.g. low, medium, and high) the task of binary classification would come down to the forecast of the future state of relatively small group of students marked by "?". Cognitive abilities should be considered as combination of cognitive functions which are not homogeneous in relation to the subject being studied; the presence of most cognitive functions is highly dependent on the age of the individual [18]. Thus, the peak of the basic cognitive functions contributing to programming falls on 17-18 years with a possible range of 15 to 21 years [19].

Table 2

Possible student performance due to combinations of student cognitive abilities with contemporary motivation strength

Abilities/Motivation	low	medium	high
low	2	2?	3
medium	2?	3	4
high	3	4	5

The above reasoning explains to some extent the following assumptions about the probabilistic forecast. We hypothesized that the basic student dataset could contain implicit information about the Abilities/Motivation combinations presented in table 2. The simplest example of this combination is that: a 19-year-old student begins to study professional programming, despite all the other positive props and strong motivation, his age signals that the cognitive functions required to the programmer are most likely to be in the stage of deactivating. Obviously, most of experts, and especially mathematical algorithms, will not notice the last fact and predict the cloudless future of this student. But it is possible that someone from the ensemble of experts (classifiers) will notice this and other alarming facts indicating below average abilities (see table 2) and will classify the student as a group requiring special attention. Unfortunately, in the process of voting by a simple majority (formula 4), this correct prediction of one of the ensemble members will be ignored. Obviously, the association between a mathematical classifier and an expert may seem tendentious. However, classification algorithms extract useful information from the feature space in different ways, and then there is a chance that one of the ensemble members will pay attention to suspicious combinations of features. When adopting such a hypothesis, for a more detailed forecast it would be necessary to take into account the opinion of all members of the ensemble and move on to the probabilistic forecast.

Here's how to do it: suppose that each of the \mathbf{x}_i students has individual natural probabilities to be categorized as class +1 and -1, respectively, $P_{+1}(\mathbf{x}_i)$ and $P_{-1}(\mathbf{x}_i)$. From formula 3, you can see that the deterministic forecast of the ensemble member $h_i(\mathbf{x}_i) = \pm 1$ can be converted into a probability forecast where each of the T individual classifiers gives its share of the deposit $1/T$ to one or the opposite probability. So, ensemble can generate two values of probability $P_{+1}(\mathbf{x}_i)$ and $P_{-1}(\mathbf{x}_i)$, for every student. Let's express them as a percentage, and note that the difference of these probabilities is equal to the algebraic sum of deterministic predictions divided by the T number of members of the ensemble (formula 5):

$$P_{+1}(\mathbf{x}_i) - P_{-1}(\mathbf{x}_i) = \frac{H_T(\mathbf{x}_i)}{T} \times 100\% \equiv \Delta P(\mathbf{x}_i) \quad (5)$$

where designation $\Delta P(\mathbf{x}_i)$ is introduced. Given that the sum of individual probabilities is 100%, probabilities are easy to calculate by formula 6:

$$P_{\pm 1} = 50\% \pm \frac{\Delta P(\mathbf{x}_i)}{2}. \quad (6)$$

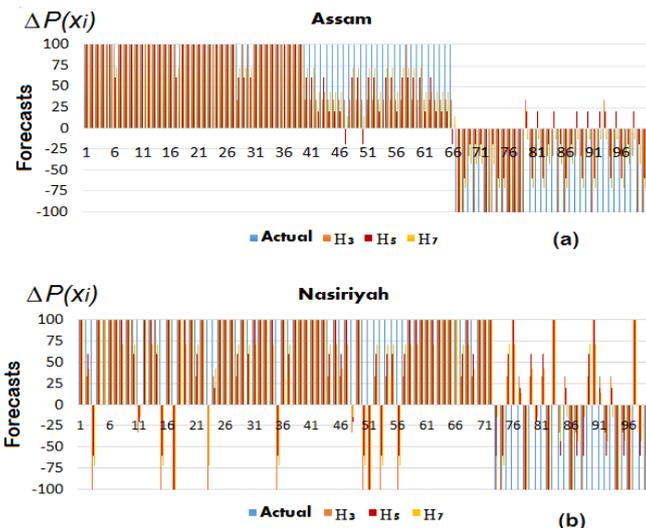


Fig. 3. Probabilistic forecasts $\Delta P(x)$ produced by ensembles of three H_3 , five H_5 and seven classifiers H_7 using data of a) sample#2; and of b) sample#4

The two examples of predicted probability differences $\Delta P(\mathbf{x}_i)$ for the two classes of students and their real successes are presented on fig. 3. The positive and negative values of the forecasting difference $\Delta P(\mathbf{x}_i)$ and real difference $\pm 100\%$ mean that the student is classified as a member of group with satisfactory and non-satisfactory achievements. As we can see from the visualizations of probability forecasts, there are two different situations. In (fig. 3,a) is demonstrated the ensemble forecasts for sample #2 when the differences $\Delta P(\mathbf{x}_i)$ of erroneous forecasts of class +1 are rare and relatively small whereas $\Delta P(\mathbf{x}_i)$ of failed forecast of class -1 is more frequent and their values are relatively large. Although in this sample, H_3 , H_5 and H_7 made fewer errors (see table 1) than in other cases, however, these two patterns with low (high) frequency of errors of class +1 (-1) and small (large) values of differences $\Delta P(\mathbf{x}_i)$ are typical for forecasts on other samples #1, #3 and #5. The case of sample #4 (fig.3, b) where values of $\Delta P(\mathbf{x}_i)$ of erroneous ensemble forecasts are significant in both classes is atypical and from (fig. 3,b) and Table 1, it is clear that student evolution in this case is the less predictable.

3.3. Ensemble quantification. The supervised quantification is a relatively newer section of machine learning [20]. The goal of the trained quantifier is to predict the frequency of objects belonged some classes in an unseen test sample X_2 , which is ideal for predicting the collective success of students. In the case of two classes, the binary quantifier q gives a prediction of class probabilities \widehat{p}_+ , \widehat{p}_-

$$q: X_2 \rightarrow \{\widehat{p}_+, \widehat{p}_-\}. \quad (7)$$

The task of binary quantification (7) was first formulated by Forman [21], who proposed to solve it using base classification algorithms: Classify and Count (C&C). Some of the features of ensemble quantification we have outlined in the works [6, 7].

Indeed, in the case of a deterministic of base or ensemble forecast, if one counting the sum N_+ of forecasts of class +1 then it can obtain the estimation of class probability $\hat{p}_+^{C\&C}$ and $\hat{p}_-^{C\&C}$ (formula 8):

$$\hat{p}_+^{C\&C} = \frac{N_+}{N}; \quad \hat{p}_-^{C\&C} = 1 - \hat{p}_+^{C\&C}. \quad (8)$$

Taking into account the previous discussion, formula 7 suggests that a more accurate C&C classifier will give both best accuracy and the best prediction of +1 class frequency $\hat{p}_+^{C\&C}$. All things being equal, this means that ensemble quantification is more accurate (Table 1) than basic C&C quantification. However, the opposite sense is wrong: the best quantifier does not necessarily become the best classifier. Among other things, we've shown that ensemble quantifiers based on probability forecast (formulas 5 and 6) give more accurate distribution assessment than a deterministic forecast. The following assumption may be put in the foundation of binary quantifiers which use probabilistic output of heterogeneous ensemble. If each of the objects in the group has the probability of P_{+1} (formula 5) being in the state of +1, then a group of such objects will have a mean cumulative probability \hat{p}_+^Q to be in this state (formula 9):

$$\hat{p}_+^Q = \frac{1}{N} \sum_1^N P_{+1}(x_i). \quad (9)$$

Forecast values \hat{p}_+^Q of ensemble quantifiers of Q3, Q5, Q7 calculated according to (formula 9) compared to the C&C forecasts of ensemble classifiers H3, H5, H7 for two cases of highly unbalanced samples are shown in fig. 4. As seen in 5 cases, the quantifiers gave better predictions of true repeatability than C&C classifiers, and only in one case the accuracy was equal.

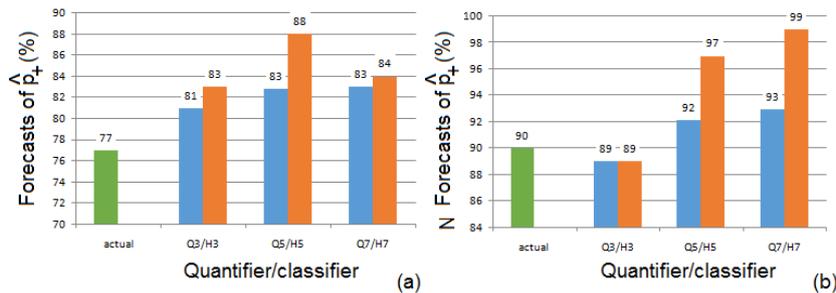


Fig. 4. Quantification: class frequency forecasts of quantifiers Q3-Q7 and ensemble classifiers H3-H7 comparing with actual frequency in test sample#5 (a) and test sample#6

(Fig. 4,a) also illustrates the assertion that "the best C&C quantifier does not necessarily have the best classification accuracy". So, the H3 classifier gave better predictions \hat{p}_+ , than H5 and H7 on the sample#5, but these classifiers had better accuracy of individual predictions (see table 1). On the contrary, in the case of (fig. 4,b) (sample#6), the best H3 classifier was the best C&C quantifier achieving quantification accuracy of Q3.

Conclusions. In introduction of this work, we have made an attempt to show that the decline in the quality of education in a number of countries is due to the lack of a really working hierarchical system monitoring the quality of education (MQE). The subsystem of the forecast of individual and collective performance of students is one of background elements of MQE. The major of goal of the presented study is the development of the methods of these forecasts using basic and ensemble classification algorithms. Based on the synthesis of previous works and analysis of experimental data from six samples, we show the following.

Individual forecast is advisable to carry out with the help of heterogeneous ensemble of supervised classifiers. It should be taken into account that these classifiers are trained and tested on unbalanced samples of educational data. In case of imbalanced dataset, only forecasts with accuracies above the base-line $A_w = p_+$ the repetitiveness of the objects of the most represented class can be considered as useful predictions. Given this observation, the quality of the projections of heterogeneous ensembles is unsurpassed.

But, the main unsurpassed property of heterogeneous ensembles is the ability to obtain probabilistic individual forecasts, and using them as a basis, to create a new type of ensemble quantifier, which adequately solves the problem of prediction of collective performance of students.

More new research needs to be done to show the benefits of using heterogeneous ensembles in educational data mining.

REFERENCES

1. OECD (2019), PISA 2018 Results (Vol. I): What Students Know and Can Do, PISA, OECD Publishing, Paris. Available at: <https://doi.org/10.1787/5f07c754-en>.
2. Abdullaev S.M., Lenskaya O.Yu., Salal Ya.K. Computer Systems of Individual Instruction: Background and Perspectives, Bulletin of SUSU. Series "Education. Pedagogical science», 2018, Vol. 10, No. 4, pp. 64-71. DOI: 10.14529/ped180408. (in Russ.).
3. Abdullaev S.M, Salal Y.K. State and Prospects of Secondary Education System in the Iraqi Republic: to The Question of Monitoring the Quality of Education, Continuing education: Materials of the International forum: V International scientific and practical conference, ed. by I.A. Voloshinoy, I.O. Kotlyarovoy, 2019, Vol. 1, pp.14-26.
4. Noskov M.V., D'yachuk P.P., Dobronets B.S., Vaynshteyn Yu.V., Kytmanov A.A., i dr. The evolution of education in the context of informatization. Krasnoyarsk, 2019, Sibirskiy federal'nyy universitet, 212 p. (in Russ.).
5. Silkina N.S., Sokolinskiy L.B. Structural-Hierarchical Didactic Model of E-learning, *Bulletin of SUSU. Series: Computational mathematics and computer science*, 2019, Vol. 8 (4), pp. 56-83. DOI:10.14529/cmse190405. (in Russ.)
6. Abdullaev S.M., Salal Y.K. Ensemble Classification and Quantification: to Individual and Collective Student Performance Forecast, *Continuing education: international forum November 22, 2019: Materials of the fifth international scientific and practical conference " University of the XXI century in the system of continuing education»*, ed.by I.A. Voloshinoy, I.O. Kotlyarovoy, 2019, Vol.1, pp. 3-13. (in Russ.).
7. Abdullaev S.M, Salal Y.K. Economic deterministic ensemble classifiers with probabilistic output using for robust quantification: study of unbalanced educational datasets, *1st International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019), Advances in Economics, Business and Management Research*, 2019, Vol. 105, pp. 658-665. DOI:10.2991/iscde-19.2019.128.
8. Nesterov S.A., Smolina E.M. The Assessment of the Results of a Massive Open Online Course Using Data Mining Methods, *Information and Telecommunication Technology in Education*, 2020, Vol. 13, No, 1, pp. 65-78. DOI: 10.18721/JCSTCS.13106.
9. Mukesh Kumar, Salal Y.K. Systematic Review of Predicting Student's Performance in Academics, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2019, Vol. 8, No. 3, pp. 54-61.
10. WEKA The workbench for machine learning (available at <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>).
11. Sadiq Hussain, Zahraa Fadhil Mushin, Yass Khudheir Salal, Paraskevi Theodorou, Fikriye Kutoglu, Hazarika G.C. Prediction Model on Student Performance based on Internal Assessment using Deep Learning, 2019, Vol. 14(8), pp. 4-22. DOI: 10.3991/ijet.v14i08.10001.
12. Mudasir Ashraf Bhat, Salal Y.K., Abdullaev S.M. Educational data mining using base (individual) and ensemble learning approaches to predict the performance of students. MIND 2019: 1st International Conference on Machine Learning, Image Processing, Network Security and Data Sciences. Submitted for publication.

13. Salal Y.K., Abdullaev S.M. Optimization of Classifiers Ensemble Construction: Case Study of Educational Data Mining, *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, Vol. 19, No. 4, pp. 139-143. DOI: 10.14529/ctcr190414
14. Salal Y.K., Abdullaev S.M., Mukesh Kumar. Educational Data Mining: Student Performance Prediction in Academic, *Inter. Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, April 2019, Vol. 8 (4) ,pp. 54-59.
15. Salal Y.K., Abdullaev S.M. Educational data mining using base and ensemble Learning approaches to predict student's performance. *Informatizaciya-i-Svyaz*, 2019, No. 5, pp.140-143.
16. Chawla N.V. Data mining for imbalanced datasets: An overview, *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, Springer. Boston, MA, 2010, pp. 875-886. DOI: 10.1007/978-0-387-09823-4_455.
17. Galar, M., Fernandez, A., Barrenechea, E., Bustince, H. and Herrera, F. X A review on ensembles for the class imbalance problem: bagging-, boosting-, and hybrid-based approaches, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2011, Vol. 42 (4), pp. 463-484. DOI: 10.1109/TSMCC.2011.2161285.
18. Hartshorne J.K. and Germine L.T. When does cognitive functioning peak? The asynchronous rise and fall of different cognitive abilities across the life span, *Psychological science*, 2015, Vol. 26 (4), pp. 433-443. DOI:10.1177/0956797614567339.
19. Abdullaev S.M., Lenskaya O.Yu., Salal Ya.K. Computer Systems of Individual Instruction: Features of Student Model, *Proceedings of the IV international scientific and practical conference, October 11-12, 2018, Chelyabinsk*, pp. 7-14. (in Russ.).
20. González P., Castaño A., Chawla N.V., Coz J.J.D. A review on quantification learning, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2017, Vol. 50, No. 5, pp. 1-40. DOI: 10.1145/311780.
21. Forman G. Quantifying counts and costs via classification, *Data Mining and Knowledge Discov*, 2008, Vol. 17, No. 2, pp. 164-206. DOI: 10.1007/s10618-008-0097-y.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н. О.Ю. Ленская.

Салал Ясс Кхудейр – Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет); e-mail: Yasskhudheirsalal@gmail.com; г. Челябинск, просп. Ленина, 76; кафедра системного программирования; аспирант.

Абдуллаев Санжар Муталович – e-mail: abdullaevsm@susu.ru; кафедра системного программирования; д. геогр. н.; профессор.

Salal Yass Khudheir – South Ural State University; e-mail: Yasskhudheirsalal@gmail.com; 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia; the department of system programming; post-graduate student.

Abdullaev Sanjar Mutalovich – e-mail: abdullaevsm@susu.ru; the department of system programming; dr. of geogr. sc.; professor.

УДК 004.056.5

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-122-132

П.А. Чуб, Д.Н. Цветкова, Н.В. Болдырихин, Д.А. Короченцев

ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ ОТ УТЕЧЕК РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМОВ

Рассматриваются особенности применения методик аттестации защищенных помещений. Такие методики разрабатываются и регламентируются Федеральной службой по техническому и экспортному контролю. Необходимость аттестации связана с наличием технических каналов утечки информации, по которым злоумышленником могут быть получены сведения, составляющие коммерческую, государственную или иную тайну. Наличие технических каналов утечки информации обусловлено физическими процессами, связанными с особенностями распространения акустических, электромагнитных и оптических

волн. Через такие каналы возможна утечка акустической, видовой информации, информации, обрабатываемой техническими средствами и системами. В рамках данной работы рассматриваются особенности аттестации защищенных помещений от утечек акустической информации. Аттестация включает в себя проведение инструментальных измерений, которые позволяют обнаружить информативный сигнал в линиях связи, в эфире, в системах отопления, водопровода, вентиляции и т.д. Помимо измерений аттестация предполагает проведение расчетов, на основании которых делается вывод о соответствии или несоответствии уровня защищенности. Расчетная часть является довольно громоздкой и сложной, поэтому целью работы является разработка алгоритма, который позволяет определить степень защищенности выделенного помещения от утечки речевой информации. Задачами работы являются: разработка вспомогательных алгоритмов для расчета параметров защищенности помещения по каждому типу каналов утечки речевой информации; реализация программного средства, позволяющего определить степень защищенности помещения; проведение исследования зависимости защищенности помещения от уровня шумов с использованием разработанного программного средства. В качестве результатов работы следует отметить синтезированный алгоритм и разработанное программное средство, позволяющее существенно сократить время на процедуру оценки защищенности помещения и избежать ошибок. Так же результатом работы является исследование зависимости словесной разборчивости речи от уровня шумов в различных октавах. Исследования показали, что словесная разборчивость, которая определяет защищенность помещения по акустическим параметрам, нелинейно падает с увеличением уровня шумов при фиксированном уровне сигнала.

Информационная безопасность; утечка речевой информации; выделенное помещение; канал утечки информации; оценка защищенности помещения.

P.A. Chub, D.N. Tsvetkova, N.V. Boldyrikhin, D.A. Korochentsev

ESTIMATION OF SECURITY OF THE PREMISES FROM LEAKAGE OF SPEECH INFORMATION IN CONDITIONS OF EXPOSURE TO NOISE

The article discusses the features of the application of certification methods for protected premises. Such techniques are developed and regulated by the Federal Service for Technical and Export Control. The need for certification is associated with the presence of technical channels for information leakage, through which an attacker can obtain information constituting a commercial, state or other secret. The presence of technical channels for information leakage is due to physical processes associated with the propagation of acoustic, electromagnetic, and optical waves. Through such channels, leakage of acoustic, specific information, information processed by technical means and systems is possible. In the framework of this work, the features of certification of protected premises against leakage of acoustic information are considered. Certification includes instrumental measurements that allow you to detect an informative signal in communication lines, on the air, in heating, water supply, ventilation, etc. In addition to measurements, certification involves calculations based on which a conclusion is made about the conformity or non-compliance of the level of protection. The calculation part is rather cumbersome and complex, therefore the purpose of the work is to develop an algorithm that allows you to determine the degree of security of the selected premises from the leakage of speech information. The objectives of the work are: the development of auxiliary algorithms for calculating the security parameters of the room for each type of voice information leakage channel; implementation of software that allows you to determine the degree of security of the room; conducting a study of the dependence of room security on the noise level using the developed software. As the results of the work, the synthesized algorithm and the developed software tool should be noted, which can significantly reduce the time for the procedure for assessing the security of the room and avoid errors. The result of the work is the study of the dependence of verbal intelligibility of speech on the noise level in various octaves. Studies have shown that verbal intelligibility, which determines the security of a room by acoustic parameters, decreases non-linearly with an increase in the noise level at a fixed signal level.

Information security; speech information leakage; dedicated room; information leakage channel; premises security assessment.

Введение. На сегодняшний день вопросам защиты информации в организациях уделяется большое значение, потому что от этого существенно зависит конкурентоспособность коммерческих предприятий [1–7]. Для государственных учреждений это тем более актуально, т.к. их деятельность связана с обработкой большого количества персональных данных, а так же сведений, составляющих государственную тайну. Помещения, в которых производится обработка таких данных, нуждаются в специальном обследовании на предмет выявления возможных утечек информации по техническим каналам [8–20]. К техническим каналам утечки информации относятся каналы утечки речевой информации [8–10].

Оценить актуальность угрозы утечки речевой информации можно по методикам, приведенным в [8–10]. В рамках оценки защищенности помещения предполагается два этапа: инструментальные измерения и расчетная часть, которая довольно объемна и требует значительных временных затрат.

Представляется актуальной разработка алгоритма и программного средства, реализующего оценку соответствия уровня защищенности помещения от утечек речевой информации требованиям нормативных документов по безопасности информации, поскольку это позволит существенно сократить временные затраты, а так же избежать ошибок в расчетах.

Алгоритм оценки защищенности помещения от утечек по техническим каналам. Перехватить речевую информацию можно по нескольким каналам, которые делятся на: акустические и вибрационные; каналы низкой частоты (НЧ); каналы высокой частоты (ВЧ); каналы утечки за счет побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН). Поэтому алгоритм оценки защищенности включает расчеты показателей по всем этим каналам (рис. 1). Более подробно рассмотрим работу алгоритма на примере оценки защищенности по акустическому и вибрационному каналам (рис. 2).

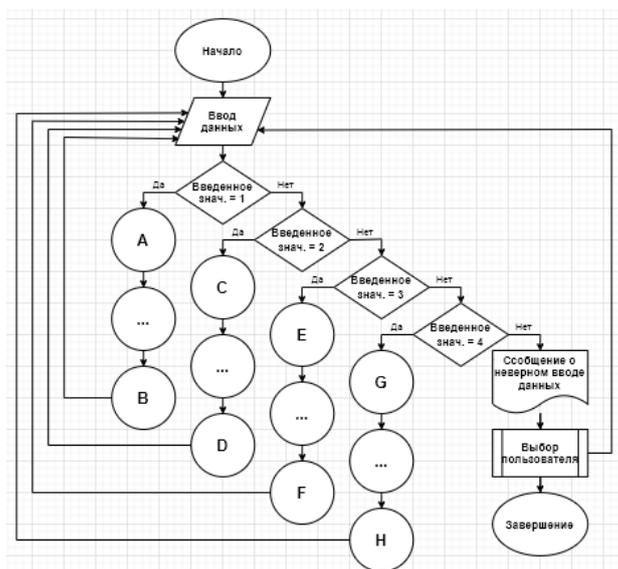


Рис. 1. Блок-схема основной программы

В данных каналах проводником утечки информации являются различные проемы и вентиляционные отверстия, ограждающие конструкции, трубы инженерных коммуникаций и т.д.

Показателем качества оценки защищенности помещения по данным каналам является словесная разборчивость речи W , под которой понимается процентное соотношение правильно понятых слов, зарегистрированных с использованием разведывательных средств.

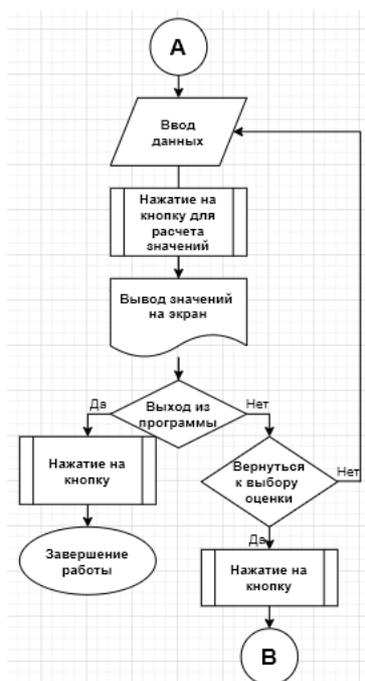


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оценки защищенности по акустическому и вибрационному каналам

Для расчета этого показателя может использоваться следующая методика [8, 9].

1) Расчет уровня звукового давления сигнала

$$L_{Ci} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{C+Шi}}{10}} - 10^{\frac{L_{Шi}}{10}} \right), \quad (1)$$

где $L_{C+Шi}$ – уровень звукового давления аддитивной смеси сигнала и шума в i -й октавной полосе, дБ; $L_{Шi}$ – уровень звукового давления шума в i -й октавной полосе, дБ.

2) Расчет коэффициента превышения создаваемого звукового давления в каждой октаве над нормированным уровнем по следующей формуле:

$$\Delta_i = L_{Ci} - L_{Hi}, \quad (2)$$

L_{Hi} – нормированный уровень в i -й октавной полосе, дБ.

3) Расчет уровня сигнала, приведенного к нормированному уровню звукового давления в i -й октавной полосе

$$L_{C.прив.i} = L_{Ci} - \Delta_i. \quad (3)$$

4) Расчет соотношения сигнал-шум:

$$E_i = L_{C.прив.i} - L_{Шi}. \quad (4)$$

5) Расчет словесной разборчивости речи:

$$W_c = \begin{cases} 1.54 * R^{0.25} * (1 - e^{(-11 * R)}), & \text{если } R < 0.15; \\ 1 - e^{\left(\frac{-11 * R}{1 + 0.7 * R}\right)}, & \text{если } R \geq 0.15, \end{cases} \quad (5)$$

где R – интегральный индекс артикуляции речи,

$$R = \sum_{i=1}^N (p_i * k_i), \quad (6)$$

k_i – весовой коэффициент каждой октавы.

Параметр p_i в выражении (6) вычисляется по следующей формуле:

$$p_i = \begin{cases} \frac{0.78 + 5.46 * e^{\left(-4.3 * 10^{-3} * (27.3 - |Q_i|)^2\right)}}{1 + 10^{0.1 * |Q_i|}}, & \text{если } Q_i \leq 0; \\ 1 - \frac{0.78 + 5.46 * e^{\left(-4.3 * 10^{-3} * (27.3 - |Q_i|)^2\right)}}{1 + 10^{0.1 * |Q_i|}}, & \text{если } Q_i > 0, \end{cases} \quad (7)$$

где Q_i определяется выражением

$$Q_i = E_i - \Delta A_i, \quad (8)$$

ΔA_i – значение форматного параметра речи в каждой октаве.

Описание программного средства. В рамках работы разработано программное средство, позволяющее определить степень защищенности выделенного помещения от утечки речевой информации. Далее проиллюстрирована часть программы, реализующая алгоритм оценки защищенности по акустическому и вибрационному каналам (рис. 3, 4).

Входные данные					
	250	500	1000	2000	4000
ТСi	88.15	100.69	89.13	87.98	88.24
С+Шi	48.86	45.23	41.45	52.26	58.22
Шi	25.78	25.12	22.05	22	25.49

Рис. 3. Входные данные, полученные в результате измерений

Источником входных данных (рис. 3) служат в результаты измерения. Для этого необходим шумомер, который измеряет уровень шумов за ограждающей конструкцией. К данному прибору подключается микрофон, для акустических измерений, и акселерометр – для вибрационных. Также важным элементом для измерения является акустический калибратор или эталон звукового давления. Для определения того, присутствует ли утечка информации, необходимо при помощи тестового сигнала измерить уровень звукового давления за пределами ограждающей конструкции. В качестве источника тест-сигнала используется генератор низкой частоты, подключенный к акустической колонке. Сигнал, прошедший через ограждающую конструкцию, значительно ослабляется относительно шумов. Результатом измерения является сумма сигнала и шума. При отключении акустической системы, проводятся измерения шумов за ограждающей конструкцией. На рис. 3 обозначению ТСi соответствует уровень тестового

вого сигнала в дБ, задаваемый для пяти октавных полос. Обозначению С+Ш_i соответствует урону смеси сигнала и шума за ограждающей конструкцией ($L_{C+Шi}$).

Ш_i – уровень шума за ограждающей конструкцией $L_{Шi}$.

На рис. 4 продемонстрирован результат вычислений.



Рис. 4. Выходные данные

Обозначениям С_i, N_i, и С прив. i на рис. 4 соответствуют параметры L_{C_i} , L_{N_i} и $L_{C.прив.i}$.

Значение словесной разборчивости составило 0,81, что превысило нормированные значения $W_{пр.н} = 0.3$ и $W_{непр.пр.н} = 0.5$ для преднамеренного и непреднамеренного прослушивания соответственно (рис. 4).

Исследование показателей защищенности выделенного помещения от утечки речевой информации. Для оценки защищенности от утечки речевой информации рассматривались каналы: акустические и вибрационные, НЧ, ВЧ и ПЭМИН [8–20].

В рамках эксперимента для улучшения наглядности результатов значение уровня шумов выбиралось одинаковым для каждой октавы. На рис. 5 приведена зависимость разборчивости речи от уровня шумов при оценке защищенности от возникновения акустических и вибрационных каналов.

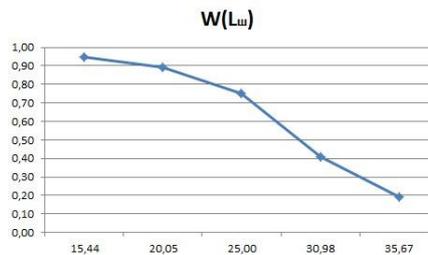


Рис. 5. График зависимости словесной разборчивости речи от уровня шумов за ограждающей конструкцией

Можно сделать вывод о том, что при увеличении уровня шумов за границей контролируемой зоны разборчивость речевой информации падает. Если она все же оказывается выше 0.3, то необходимо устанавливать определенные средства защиты информации или расширять границы контролируемой зоны.

Далее проводилось исследование защищенности выделенного помещения по НЧ-каналу. В ходе эксперимента изменялось значение напряжения шумов в линиях электропитания для того, чтобы определить зависимость относительно словесной разборчивости речи. Результаты эксперимента приведены на рис. 6. Исходя из рисунка 6, можно сделать вывод о том, что при увеличении зашумленности в ли-

ниях электропитания конфиденциальная информация, которой пытается завладеть злоумышленник, будет получена с явными искажениями при уровнях шумов свыше 43 дБ. В иных случаях необходимо также провести специальные организационные и технические меры по устранению возникшего канала.

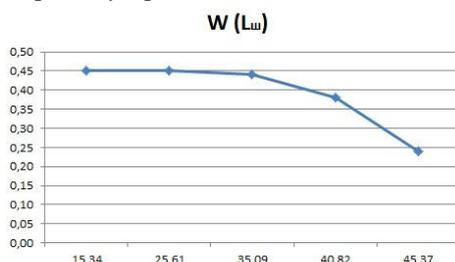


Рис. 6. График зависимости словесной разборчивости речи от уровня шумов в линиях электропитания

Аналогичные исследования были проведены для ВЧ-канала утечки информации. В рамках эксперимента исследовалась зависимость словесной разборчивости от уровня шумов в линиях электропитания. В отличие от НЧ канала утечки информации, в ВЧ навязывании злоумышленник подключается к линиям электропитания и может использовать следующие типы технических средств (ТС): стационарные, носимые и возимые. Следовательно, необходимо проводить исследования для всех ТС, чтобы дать корректную оценку защищенности выделенного помещения. Результаты исследований приведены на рис. 7–9. Видно, что наиболее опасными являются стационарные средства. Заданный уровень защищенности обеспечивается при уровне шумов более 38 дБ.

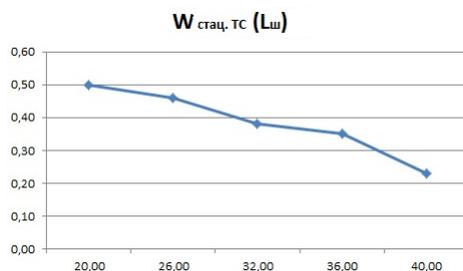


Рис. 7. График зависимости защищенности выделенного помещения от уровня шумов по ВЧ каналу с использованием стационарных ТС

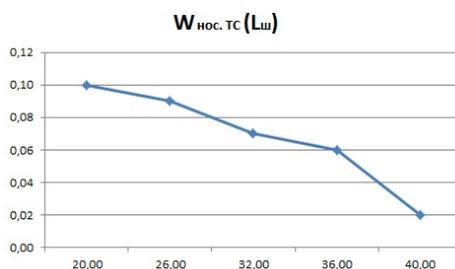


Рис. 8. График зависимости защищенности выделенного помещения от уровня шумов по ВЧ каналу с использованием носимых ТС

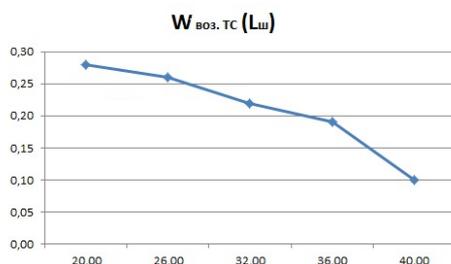


Рис. 9. График зависимости защищенности выделенного помещения от уровня шумов по ВЧ каналу с использованием возимых ТС

Далее рассмотрим результаты исследований канала утечки информации за счет ПЭМИН. Утечка информации через ПЭМИН возможна под воздействием информативных побочных излучений основных технических средств и систем за счет наводок, возникающих во вспомогательных технических средствах и системах. В качестве показателя для рассматриваемого канала утечки информации используется значение величины максимальной длины пробега цепи электропитания. На рис. 10 приведена зависимость данного параметра в метрах от уровня шумов.

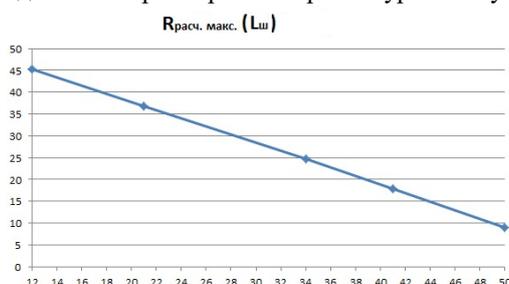


Рис. 9. График зависимости величины максимальной длины пробега исследуемой цепи электропитания от уровня шумов

Данный график позволят соотнести расчетную величину длины пробега исследуемой цепи с границами контролируемой зоны при заданном уровне шумов. Если эта длина превышает указанные границы, то в этом случае необходимо провести организационные и технические меры по устранению возможного канала утечки информации.

Заключение. В результате разработан и реализован в рамках программного средства алгоритм расчета степени защищенности выделенного помещения от утечки речевой информации. Приведен расчет защищенности от утечек по акустическим и вибрационным каналам. Проиллюстрирована работа программного средства, реализующего данный алгоритм.

Применение разработанного алгоритмического и программного обеспечения дает возможность существенно сократить время на процедуру оценки защищенности и избежать ошибок.

Так же проведено исследование показателей защищенности помещения с использованием разработанного программного средства, которое позволяет оценить зависимость защищенности помещения от уровня шумов.

В рамках эксперимента выявлено, что словесная разборчивость речи за ограждающей конструкцией опускается ниже критических значений при уровне шумов не менее 33,5 дБ.

При исследовании зависимости словесной разборчивости речи от уровня шумов в линиях электропитания для НЧ и ВЧ каналов получены минимальные значения уровней шумов (43 дБ и 38 дБ соответственно), при которых обеспечивается требуемая защищенность.

Исследование канала утечки информации через ПЭМИН показало, что чем меньше размеры контролируемой зоны, тем выше должен быть уровень шума. Так, например, при длине пробега исследуемой цепи электропитания меньше или равной 15 метрам уровень шума должен превышать 44 дБ, а при возможной длине пробега 30 метров уровень шума должен быть выше 29 дБ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранова Е.К., Бабан А.В. Информационная безопасность и защита информации: учеб. пособие. – 3-е изд. – М.: Изд-во Горячая линия-Телеком, 2016.
2. Буковшин В.А., Болдырихин Н.В. Современные проблемы информационной безопасности // Современные материалы, техника и технология: Сб. статей. – Курск, 2018. – С. 47-52.
3. Буковшин В.А., Болдырихин Н.В. Кибербезопасность как неотъемлемая часть информационного мира // Современные материалы, техника и технология: Сб. статей. – Курск, 2018. – С. 52-55.
4. Прохорова О.В. Информационная безопасность и защита информации. – Самара: СГАСУ, 2014.
5. Меньшаков Ю.К. Виды и средства иностранных технических разведок. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
6. Меньшаков Ю.К. Основы защиты от технических разведок. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
7. Хорев А.А. Организация контроля эффективности противодействия техническим средствам разведки и защиты информации. – М.: МО РФ, 2006.
8. Бузов Г.А., Калинин С.В., Кондратьев А.В. Защита от утечки информации по техническим каналам. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005.
9. Дураковский А.П., Куницын И.В., Лаврухин Ю.Н. Контроль защищенности речевой информации в помещениях. Аттестационные испытания вспомогательных технических средств и систем по требованиям безопасности информации. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 152 с.
10. Железняк В.К., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации // Специальная техника. – 2000. – № 4. – С. 39-45.
11. Гончаров Р.А., Короченцев Д.А., Зеленский А.А. Разработка подсистемы поддержки принятия решения идентификации технических каналов утечки информации // Национальная Ассоциация Ученых. – 2018. – № 14 (41). – С. 8-11.
12. Голуб Б.В., Максимов Р.В. Технические средства и методы защиты информации от утечки по техническим каналам // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – М.: Институт управления образованием Российской академии образования, 2014.
13. Давыдов А.Е., Максимов Р.В., Савицкий О.К. Технические средства и методы защиты информации от утечки по техническим каналам на объектах информатизации. – СПб.: НИИ "Масштаб", 2012.
14. Евстифеев А.А., Ерошев В.И., Казаков А.А. Разработка предложений по оценке защищенности информации технических систем от утечки по техническим каналам // Математика и математическое моделирование: Сб. статей. – Саров, 2018. – С. 15-16.
15. Зеленский А.А., Короченцев Д.А., Ревякина Е.А. Разработка адаптивного fuzzy-алгоритма идентификации технических каналов утечки информации // Colloquium-journal. – 2020. – № 11-1 (63). – С. 40-44.
16. Короченцев Д.А., Зеленский А.А. Система идентификации технических каналов утечки информации // Актуальные проблемы науки и техники: Сб. тезисов докладов. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 357-358.
17. Лукьянов А.С., Перминов Г.В. Разновидности и особенности технических каналов утечки информации // Охрана, безопасность, связь: Сб. статей. – Воронеж: 2013. – С. 41-44.

18. Садовская Т.Г., Хорев А.А. Средства и методы обеспечения безопасности бизнеса. Технические каналы утечки информации. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
19. Тегенцев И.М., Щербаков В.А., Пономаренко С.А. Формализация процессов комплексного технического контроля защищенности информации от утечки по техническим каналам // Охрана, безопасность, связь: Сб. статей. – Воронеж, 2016. – № 1-2. – С. 150-154.
20. Торокин А.А. Инженерно-техническая защита информации. – М.: МО РФ, 2004.

REFERENCES

1. Baranova E.K., Baban A.V. Informatsionnaya bezopasnost' i zashchita informatsii: ucheb. Posobie [Information security and information protection: studies. Stipend]. 3rd ed. Moscow: Izd-vo Goryachaya liniya-Telekom, 2016.
2. Bukovshin V.A., Boldyrikhin N.V. Sovremennye problemy informatsionnoy bezopasnosti [Modern problems of information security], *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: Sb. statey* [Modern materials, technique and technology: Collection of articles]. Kursk, 2018, pp. 47-52.
3. Bukovshin V.A., Boldyrikhin N.V. Kiberbezopasnost' kak neot'emlemaya chast' informatsionnogo mira [Cybersecurity as an integral part of the information world], *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: Sb. statey* [Modern materials, technique and technology: Collection of articles]. Kursk, 2018, pp. 52-55.
4. Prokhorova O.V. Informatsionnaya bezopasnost' i zashchita informatsii [Information security and information protection]. Samara: SGASU, 2014.
5. Men'shakov Yu.K. Vidy i sredstva inostrannykh tekhnicheskikh razvedok [Types and means of foreign technical intelligence]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2009.
6. Men'shakov Yu.K. Osnovy zashchity ot tekhnicheskikh razvedok [Fundamentals of protection from technical intelligence]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2011.
7. Khorev A.A. Organizatsiya kontrolya effektivnosti protivodeystviya tekhnicheskimi sredstvami razvedki i zashchity informatsii [Organization of control over the effectiveness of counteraction to technical means of intelligence and information protection]. Moscow: MO RF, 2006.
8. Buzov G.A., Kalinin S.V., Kondrat'ev A.V. Zashchita ot utechki informatsii po tekhnicheskimi kanalami [Protection against information leakage through technical channels]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2005.
9. Durakovskiy A.P., Kunitsyn I.V., Lavrukhin Yu.N. Kontrol' zashchishchennosti rechevoy informatsii v pomeshcheniyakh. Attestatsionnye ispytaniya vspomogatel'nykh tekhnicheskikh sredstv i sistem po trebovaniyam bezopasnosti informatsii [Monitoring the security of speech information in the premises. Attestation tests of auxiliary technical means and systems for information security requirements]. Moscow: NIYAU MIFI, 2015, 152 p.
10. Zheleznyak V.K., Makarov Yu.K., Khorev A.A. Nekotorye metodicheskie podkhody k otsenke effektivnosti zashchity rechevoy informatsii [Some methodological approaches to evaluating the effectiveness of speech information protection], *Spetsial'naya tekhnika* [Special technique], 2000, No. 4, pp. 39-45.
11. Goncharov R.A., Korochentsev D.A., Zelenskiy A.A. Razrabotka podsistemy podderzhki prinyatiya resheniya identifikatsii tekhnicheskikh kanalov utechki informatsii [Development of a decision support subsystem for identifying technical channels of information leakage], *Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists], 2018, No. 14 (41), pp. 8-11.
12. Golub B.V., Maksimov R.V. Tekhnicheskie sredstva i metody zashchity informatsii ot utechki po tekhnicheskimi kanalami [Technical means and methods of protecting information from leaks through technical channels], *Khroniki ob"edinennogo fonda elektronnykh resursov «Nauka i obrazovanie»* [Chronicles of the United Fund of electronic resources "Science and education"]. Moscow: Institut upravleniya obrazovaniem Rossiyskoy akademii obrazovaniya, 2014.
13. Davydov A.E., Maksimov R.V., Savitskiy O.K. Tekhnicheskie sredstva i metody zashchity informatsii ot utechki po tekhnicheskimi kanalami na ob"ektakh informatizatsii [Technical means and methods of information protection from leakage through technical channels to the information objects]. Saint Petersburg: NII "Masshtab", 2012.
14. Evstifeev A.A., Eroshov V.I., Kazakov A.A. Razrabotka predlozheniy po otsenke zashchishchennosti informatsii tekhnicheskikh sistem ot utechki po tekhnicheskimi kanalami [Development of proposals for assessing the security of information from technical systems leakage through technical channels], *Matematika i matematicheskoe modelirovanie: Sb. statey* [Mathematics and mathematical modeling: a Collection of articles]. Sarov, 2018, pp. 15-16.

15. *Zelenskiy A.A., Korochentsev D.A., Revyakina E.A.* Razrabotka adaptivnogo fuzzy-algoritma identifikatsii tekhnicheskikh kanalov utechki informatsii [Development of an adaptive fuzzy algorithm for identifying technical channels of information leakage], *Colloquium-journal* [Colloquium-journal], 2020, No. 11-1 (63), pp. 40-44.
16. *Korochentsev D.A., Zelenskiy A.A.* Sistema identifikatsii tekhnicheskikh kanalov utechki informatsii [Identification system for technical channels of information leakage], *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki: Sb. tezisev dokladov* [Actual problems of science and technology: Collection of abstracts]. Rostov-on-Don, 2019, pp. 357-358.
17. *Luk'yanov A.S., Perminov G.V.* Raznovidnosti i osobennosti tekhnicheskikh kanalov utechki informatsii [Varieties and features of technical channels of information leakage], *Okhrana, bezopasnost', svyaz': Sb. statey* [Security, safety, communication: Collection of articles]. Voronezh: 2013, pp. 41-44.
18. *Sadovskaya T.G., Khorev A.A.* Sredstva i metody obespecheniya bezopasnosti biznesa. Tekhnicheskie kanaly utechki informatsii [Tools and methods for ensuring business security. Technical channels of information leakage]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2009.
19. *Tegentsev I.M., Shcherbakov V.A., Ponomarenko S.A.* Formalizatsiya protsessov kompleksnogo tekhnicheskogo kontrolya zashchishchennosti informatsii ot utechki po tekhnicheskim kanalom [Formalization of processes of complex technical control of information security from leakage through technical channels], *Okhrana, bezopasnost', svyaz': Sb. statey* [Security, safety, communication: Collection of articles]. Voronezh, 2016, No. 1-2, pp. 150-154.
20. *Torokin A.A.* Inzhenerno-tekhnicheskaya zashchita informatsii [Engineering and technical protection of information]. Moscow: MO RF, 2004.

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

Чуб Павел Андреевич – Донской государственный технический университет; e-mail: pavel.chub.1997@mail.ru; 344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Мечникова, 154А, кв. 810; тел.: +79185140041; кафедра кибербезопасности информационных систем; студент.

Цветкова Диана Николаевна – e-mail: tswetckowa.diana@yandex.ru; 344018, г. Ростов-на-Дону, ул. Юфимцева, 14/2, кв. 60; тел.: +79198976476; кафедра кибербезопасности информационных систем; студентка.

Болдырихин Николай Вячеславович – e-mail: boldyrikhin@mail.ru; 344065, г. Ростов-на-Дону, пер. Днепровский, 116К, кв. 111; тел.: +79043442295; кафедра кибербезопасности информационных систем; к.т.н.; доцент.

Короченцев Денис Александрович – e-mail: mytelefon@mail.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, пр. Михаила Нагибина, 29, кв. 24; тел.: +7903489173; кафедра кибербезопасности информационных систем; зав. кафедрой; к.т.н.

Chub Pavel Andreyevich – Don State Technical University; e-mail: pavel.chub.1997@mail.ru; 154A, Mechnikova street, apt. 810, Rostov-on-Don, 344000, Russia; phone: +79185140041; the department of cybersecurity of information systems; student.

Tsvetkova Diana Nikolaevna – e-mail: tswetckowa.diana@yandex.ru; 14/2, Yufimtseva street, apt. 60, Rostov-on-Don, 344018, Russia; phone: +79198976476; the department of cybersecurity of information systems; student.

Boldyrikhin Nikolay Vyacheslavovich – e-mail: boldyrikhin@mail.ru; 116K, per. Dneprovsky, apt. 111, Rostov-on-Don, 344065, Russia; phone: +79043442295; the department of cybersecurity of information systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Korochentsev Denis Aleksandrovich – e-mail: mytelefon@mail.ru; 29, Mikhail Nagibin Ave., apt. 24, Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +79034895173; the department of cybersecurity of information systems; cand. of eng. sc.; head of the department.

Раздел III. Машинное обучение и нейронные сети

УДК 004.89:004.85

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-133-146

Д.В. Балабанов, А.В. Ковтун, Ю.А. Кравченко

ДВУХЭТАПНЫЙ БУСТИНГ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БИОИНСПИРИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ*

В процессе решения широкого круга прикладных задач возникает необходимость декомпозиции объектов. Как следствие, проблема классификации является актуальной проблемой в современных системах интеллектуального анализа данных. Бинарная классификация является одной из важнейших задач, и имеет целый ряд нерешенных проблем. Одной из таких проблем является эффективность автоматизированной классификации. В задачах автоматизированной классификации, актуально применение алгоритмического аппарата эволюционных вычислений. Таким образом целесообразно применение генетических и биоинспирированных алгоритмов, в задаче поиска оптимальных значений параметров классификатора. Для решения данной задачи предлагается применить алгоритм роя частиц(PSO). Данный алгоритм в контексте задачи поиска субоптимальных значений параметров классификатора способен обеспечить высокое качество классификации. Модификацией алгоритма является динамическое изменение значений координат, которые отвечают за тип функции ядра. Данная доработка позволяет значительно снизить затрачиваемое время разработки классификатора. Для повышения эффективности классификации целесообразно применять ансамбли алгоритмов. В работе приведена структура двухуровневого классификатора. На первом уровне данного классификатора, формируется ансамбль простых классификаторов которые формируют учебную выборку, которая, в дальнейшем используется алгоритмом роя частиц на втором этапе. Такой подход позволяет значительно уменьшить временные затраты, а также повысить качество получаемых решений. Алгоритм роя частиц(PSO), в контексте задачи поиска субоптимальных значений параметров классификатора способен обеспечить высокое качество классификации. Предложенный двухуровневый алгоритм был экспериментально протестирован. Произведено сравнение с аналогами, приведены сравнительные диаграммы. Описанные исследования показывают, что работа имеет высокую теоретическую значимость, а проведенные экспериментальные исследования доказывают высокую практическую значимость.

Классификация; бинарная классификация; биоинспирированные методы; метод опорных векторов; бустинг; алгоритм роя частиц.

D.V. Balabanov, A.V. Kovtun, Yu.A. Kravchenko

TWO-STAGE BOOSTING OF BINARY CLASSIFICATION BASED ON THE APPLICATION OF BIOINSPIRED ALGORITHMS

In the process of solving a wide range of applied problems, it becomes necessary to decompose objects. As a result, the classification problem is an urgent problem in modern data mining systems. Binary classification is one of the most important tasks, and has a number of unsolved problems. One such problem is the effectiveness of automated classification. In the tasks of automated classification, it is relevant to use the algorithmic apparatus of evolutionary computing. Thus, it is advisable to use genetic and bio-inspired algorithms in the task of finding the optimal

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 19-07-00099 и 18-07-00050.

values of the classifier parameters. To solve this problem, it is proposed to apply the particle swarm algorithm (PSO). This algorithm in the context of the task of finding suboptimal values of the parameters of the classifier is able to provide high quality classification. A modification of the algorithm is a dynamic change in the coordinate values that are responsible for the type of kernel function. This revision can significantly reduce the time spent developing the classifier. To increase the classification efficiency, it is advisable to use ensembles of algorithms. The paper presents the structure of a two-level classifier. At the first level of this classifier, an ensemble of simple classifiers is formed that form the training set, which is further used by the particle swarm algorithm in the second stage. This approach can significantly reduce time costs, as well as improve the quality of the resulting solutions. The particle swarm algorithm (PSO), in the context of the task of finding suboptimal values of the parameters of the classifier, is able to provide high quality classification. The proposed two-level algorithm has been experimentally tested. A comparison is made with analogues, comparative charts are given. The described studies show that the work is of high theoretical significance, and the conducted experimental studies prove high practical significance.

Classification; binary classification; bio-inspired methods; support vector method; boosting; particle swarm algorithm.

Введение. В современном мире тенденции информационных технологий, которые касаются сферы поддержки принятия решений, тесно связаны с такими понятиями как Big Data и Data Mining, а также с разработкой программных средств интеллектуального анализа данных. Такие программные средства способны обрабатывать сложноорганизованные многомерные структуры данных. Такие данные присутствуют в множестве областей производства, медицины, экономики, банковской деятельности и т.д.

В процессе решения широкого круга прикладных задач возникает необходимость декомпозиции объектов. Как следствие, проблема классификации является актуальной проблемой в современных системах интеллектуального анализа данных. Бинарная классификация является одной из важнейших задач, и имеет целый ряд нерешенных проблем. Одной из таких проблем является эффективность автоматизированной классификации.

Классификация является разделом машинного обучения. Задачу классификации можно описать следующим образом: существует множество объектов, которые разделены каким-то образом на классы. Множество объектов конечно, отношения объектов к классам также известны. Данное множество является обучающей выборкой. Объекты, не включенные в обучающую выборку являются неизвестными, т.е. у них не известна привязка к классу. Таким образом необходимо разработать такой алгоритм, который классифицирует произвольный объект из исходного множества. В частном случае классификации – бинарной классификации, присутствует только 2 класса, непересекающихся между собой.

В задачах автоматизированной классификации, актуально применение алгоритмического аппарата эволюционных вычислений. Таким образом целесообразно применение генетических и биоинспирированных алгоритмов, в задаче поиска оптимальных значений параметров классификатора. Для повышения эффективности классификации целесообразно применять ансамбли алгоритмов.

На данном этапе развития, не существует универсальных алгоритмов и методов, которые будут способны решать задачи классификации и кластеризации. Существует множество различных принципов моделирования. В основе различных инструментов, лежат различные критерии, метрики, функции близости и т.д. Применение различных инструментов, даже по отношению к одному и тому же набору, может привести к всевозможным результатам. Таким образом, одним из вариантов получения качественного классификационного решения, является комбинирование алгоритмов [1–3].

Среди таких композиций или «ансамблей» алгоритмов, можно выделить бустинг и бэггинг. Данные принципы получили широкое, активное распространение благодаря высокому качеству получаемых решений. Идея бэггинга состоит в параллельной работе нескольких простых алгоритмов, где итоговое решение выбирается некоторым голосованием. Бустинг, в свою очередь, представляет собой последовательное применение нескольких алгоритмов, где каждый последующий алгоритм оперирует решениями предыдущего [3–7].

Цель работы – повышение эффективности алгоритмов, решающих задачу классификации и упорядочивания объектов, повышение адекватности принимаемых решений, основанных на инструментальной интеллектуальной обработке информации и биоинспирированном моделировании и применении бустинга биоинспирированных алгоритмов, позволяющих устранить недостатки существующих аналогов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор основных подходов к решению задачи бинарной классификации методом опорных векторов, изучить варианты применения генетических и биоинспирированных эвристик к поставленной задаче.

2. Описать задачу бинарной классификации, построить ее математическую модель на основе алгоритма опорных векторов.

3. Разработать модифицированный алгоритм роя частиц для дальнейшего применения его в ансамбле.

4. Привести структуру двухуровневого классификатора с применением бустинга. Данный ансамбль алгоритмов на первом этапе, при помощи нескольких классификаторов должен создать учебную выборку, которая в дальнейшем будет использоваться для работы алгоритма роя частиц. Такой ансамбль позволит получать повышенную точность классификации, несравнимую с точностью отдельных алгоритмов.

5. Произвести экспериментальные исследования, оценить эффективность биоинспирированного алгоритма, а также двухуровневого алгоритма.

Проведем аналитический обзор состояния исследований по выбранной тематике и дадим постановку задачи.

1. Аналитический обзор и постановка задачи классификации. Существует несколько алгоритмов для решения задачи классификации. В работе предлагается более подробно остановиться на алгоритме опорных векторов. Полученные с его помощью классификаторы, способны демонстрировать высокое качество решений, кроме этого ввиду своей относительной новизны, требуются дальнейшие исследования в области поиска субоптимальных значений его параметров. Параметры включают в себя как значения параметров ядра, так и значения параметра регуляризации, а также используемой функции ядра. Изменение этих параметров непосредственно влияют на качество итоговой классификации.

Алгоритм опорных векторов (SVM классификатор)

Преимуществами алгоритма опорных векторов являются: способность работы с высоко-размерными входными данными, достаточная устойчивость к переобучению, высокая конкурентоспособность. Помимо этого, так как в основе алгоритма лежит решение задачи квадратичного программирования в выпуклой области, то такая задача имеет всего одно решение. SVM классификатор способен обучаться на сильно-коррелирующих выборках данных, размер которых составляют гигабайты.

Однако у любого алгоритма существуют недостатки. Недостатками SVM алгоритма являются: относительная нестабильность к шуму исходных данных, сложность выбора ядра в случае невозможности линейного разделения, поиск значения параметра регуляризации (если классы линейно неразделимы)

Использование базового подхода к разработке SVM-классификатора на основе SVM-алгоритма применительно к сложноорганизованным многомерным данным больших объемов сопряжено с необходимостью решения задачи квадратичного программирования большой размерности [8], характеризующейся высокой сложностью выполнения расчетов и требующей существенных временных затрат. Для ослабления остроты проблемы высокой сложности выполнения расчетов и сокращения времени при разработке SVM-классификатора предлагаются различные оригинальные подходы [9–11].

Одним из вариантов является каскадный алгоритм опорных векторов [9]. Такой алгоритм обучается итеративно, на поднаборах исходного набора данных. Опорные векторы используются при формировании последующих учебных наборов данных. Такой алгоритм можно легко разделить на ансамбль алгоритмов, для ускорения работы.

Система Hadoop MapReduce является одним из лидеров в области Bid Data и работе с ними. В работе [10], представлены решения, направленные на использование классификаторов данной системы. В системе представлено огромное количество утилит и библиотек, для работы с SVM классификаторами.

Помимо прочих, интересным является подход уменьшения учебной выборки, для ускорения разработки итогового классификатора [11, 12]. В работе предлагается исключать неиспользуемые объекты, которые не имеют влияния на финальное решение.

По итогам рассмотрения, можно сделать вывод что проблеме разработки классификатора, методом опорных векторов, выделяется повышенное внимание, и ее решение является актуальной задачей.

Рассмотрим постановку задачи классификации.

Задача обучения по прецедентам включает в себя рассмотрение двух множеств Z и Y . Множество Z представляет собой множество объектов, а множество Y множество меток и допустимых решений. Также существует неизвестная целевая зависимость $f: Z \rightarrow Y$. Эти значения $f^*(z_i)$ будут получены только в конечном множестве объектов $Z^* = \{z_1, \dots, z_n\}$ ($Z^* \subset Z$) и равны y_i^* ($y_i^* = f^*(z_i)$).

Прецедентом называется кортеж «объект-ответ» $\langle z_i, y_i^* \rangle$. Совокупность таких кортежей, где $i = (\overline{1, s})$ образуют учебный набор $U = \{\langle z_i, y_i^* \rangle\}_{i=1}^s$. В этом учебном наборе каждый кортеж $\langle z_i, y_i^* \rangle$ хранит в себе информацию $z_i \in Z^*$, а также метку класса $y_i^* \in Y$ принадлежности объекта z_i .

Таким образом имея учебный набор необходимо воссоздать некоторую зависимость f^* . Так как для решения такой задачи необходима программная реализация, такой процесс, создания неизвестной зависимости f^* называют обучением алгоритма. Итоговым результатом работы является решающая функция $A(z)$.

Процесс, создания зависимости f^* , используя учебный набор U , называют процессом построения решающей функции $A: Z \rightarrow Y$, что является *задачей обучения по прецедентам*. Данная решающая функция $A: Z \rightarrow Y$ приближает неизвестную целевую зависимость на объектах множества $Z^* \subset Z$ и на всем множестве Z [13].

Если множество Y конечно $Y = \{1, 2, \dots, c\}$, то такую задачу можно назвать *задачей классификации на c непересекающихся классов*. В таком случае можно сказать что множество Z разбито на подмножества Z^1, Z^2, \dots, Z^c , где $Z^j = \{z \in Z | f(z) = j\}$ при $j \in \{1, 2, \dots, c\}$: $Z = \bigcup_{j=1}^c (Z^j)$, а решающую функцию $A: Z \rightarrow Y$ называют классифицирующей функцией (правилом классификации) [14].

2. Задача бинарной классификации на основе алгоритма опорных векторов (SVM – алгоритм). Под задачей бинарной классификации понимают рассмотрение каждого объекта множества объектов Z , которое подлежит классификации. Каждому объекту множества ставится в соответствие q -мерный вещественный вектор характеристик

$$z_i = (z_i^1, z_i^2, \dots, z_i^q), \quad (1)$$

где z_i^l – числовое значение l -й характеристики для i -го объекта $l = (\overline{1, q})$, нормированные значениями $[0; 1]$; $Y = \{-1, +1\}$ – множество ответов (метки классов); $f^*: Z \rightarrow Y$ – целевая зависимость, данные значения известны только на объектах учебного набора $U = \{ \langle z_i, y_i^* \rangle \}_{i=1}^s$, $y_i^* = f^*(z_i)$ – число (-1 или +1), характеризующее классовую принадлежность объекта $z_i \in Z^*$, $Z^* \subset Z$ ($i = (\overline{1, s})$). Необходимо построить классифицирующую функцию $A: Z \rightarrow Y$, аппроксимирующую целевую зависимость на пространстве Z . Для этого необходимо построить разделяющую гиперплоскость [14–16].

Чтобы получить максимально эффективный классификатор, требуется многоэтапное обучение, а также применение различных тестовых выборок. В последствие выбирается наилучший вариант обучения и тестирования. При использовании ансамбля алгоритмов, процесс поиска лучших выборок можно ускорить. В последствии «обученный» классификатор применяется для классификации неизвестных объектов из множества Z .

Пусть из учебного набора $U = \{ \langle z_i, y_i^* \rangle \}_{i=1}^s$ случайно выбраны S кортежей ($S < s$), а также создана обучающая выборка $Train = \{ \langle z_i, y_i^* \rangle \mid z_i \in Z^*, y_i^* = f^*(z_i) \}_{i=1}^S$. Итогом процесса обучения классификатора является определение разделяющей гиперплоскости. Данная гиперплоскость задается уравнением [14, 15]:

$$w^*z + b = 0, \quad (2)$$

где w – вектор, перпендикулярный к разделяющей плоскости, $b \in \mathbb{R}$ – параметр, определяющий смещение гиперплоскости относительно начала координат (при $b=0$ гиперплоскость совпадает с осью начала координат); w^*z – скалярное произведение векторов w и z .

Следует обратить внимание, что определение параметров классификатора задано с точностью до нормировки: в случае одновременного умножения векторов w и b на положительную константу, алгоритм $A(z)$ не будет изменен. Таким образом, данная константа выбирается исходя из условия $w^*z_i + b = y_i$, для всех близких к разделяющей гиперплоскости объектов $z_i \in Z^*$. Расстояние, в данном случае, от разделяющей гиперплоскости до пограничных объектов обоих классов будет равно 1.

Идеальный случай построения разделяющей гиперплоскости представлен на рис. 1. В пространстве $D-2$, если объект находится на положительной части относительно гиперплоскости, ему присваивается первый класс, во всех остальных случаях второй класс. Полоса, разделяющая классы задается условием $-1 < w^*z_i + b < 1$. Гиперплоскость лежит идеально посередине данной полосы. Ей параллельны две полосы с направляющим вектором w , которые служат ей границами. Опорными векторами называют векторы, которые располагаются на границе полосы, которая разделяет классы. Именно эти векторы несут информацию о разделении [14]. Чем шире данная полоса, тем лучше, и тем легче можно классифицировать объекты. В обучающей выборке не должно быть объектов внутри границ этой полосы.

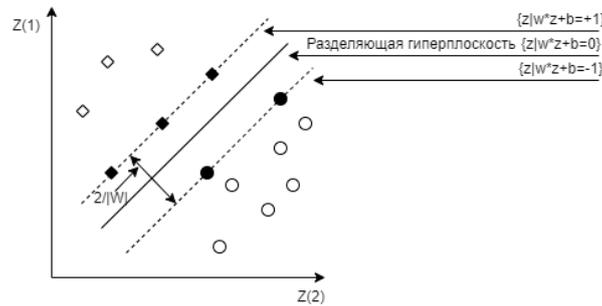


Рис. 1. Идеальный случай разделения классов гиперплоскостью

Для опорных векторов выполняется условие $w^*z_i + b = y_i$. Остальные объекты располагаются на удалении, значит для всех $z_i \in Z^*$ справедливы следующие неравенства [14, 15]:

$$\begin{cases} w^*z_1 + b \leq -1, & \text{если } y_i = -1 \\ w^*z_1 + b \geq 1, & \text{если } y_i = +1 \end{cases} \text{ или } y_i(w^*z_1 + b) \geq 1 \quad (i = \overline{1, S}). \quad (3)$$

Искомое правило классификации записывается в следующем виде:

$$A(z) = \text{sign}(w^*z_1 + b). \quad (4)$$

При допущении линейного разделения выборки, должны существовать такие w и b , при котором функционал числа ошибок будет равен нулю. При условии соблюдения ограничений:

$$Q(w, b) = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S [y_i(w^*z_1 + b) < 0]. \quad (5)$$

Однако, в данном случае присутствует несколько разделяющих плоскостей, которые реализуют тоже разбиение. Необходимо найти оптимальные значения w и b , которые позволяют разделяющей плоскости отстоять максимально удаленно от ближайших объектов обоих классов.

3. Алгоритм роя частиц в задаче разработки SVM-классификатора. В случае использования PSO-алгоритма при разработке SVM классификатора частицам роя могут быть сопоставлены векторы, описывающие их позиции в пространстве поиска и закодированные параметрами функции ядра и параметром регуляризации: (x_i^1, x_i^2, C_i) , где i – номер частицы ($i = \overline{1, m}$); x_i^1, x_i^2 – параметры функции ядра i -й частицы (при этом параметр x_i^1 полагается равным параметрам функций ядра d, γ, σ или k_2 (в зависимости от того, какому типу функции ядра соответствует частица роя); параметр x_i^2 полагается равным параметру функций ядра k_1 , если частица роя соответствует сигмоидному типу функции ядра, в противном случае значение этого параметра считается равным нулю.

Тогда традиционный подход к применению PSO-алгоритма при разработке SVM-классификатора заключается в многократном применении PSO-алгоритма при фиксированном типе функции ядра (в соответствии с целью выбора субоптимальных значений параметров функции ядра и значения параметра регуляризации [17–19]). Такой подход предполагает выполнение следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Определить значения параметров PSO-алгоритма: число частиц в рое m , масштабирующий коэффициент для скорости K , личный и глобальный коэффициенты ускорения φ^+ и φ^- , максимальное число итераций PSO-алгоритма N_{max} .

Определить типы T функций ядра, участвующие в поиске ($T = 1$ – полиномиальная однородная, $T = 2$ – полиномиальная неоднородная, $T = 3$ – радиальная базисная, $T = 4$ – радиальная базисная функция Гаусса, $T = 5$ – сигмоидная функция ядра) и границы изменения значений параметров функции ядра и значения параметра регуляризации C для выбранных типов функций ядра T : $x^{1T}_{min}, x^{1T}_{max}, x^{2T}_{min}, x^{2T}_{max}, C^{T}_{min}, C^{T}_{max}$ ($x^{2T}_{min} = 0$ и $x^{2T}_{max} = 0$ для $T = 1, 4$).

Шаг 2. Для каждого выбранного на шаге 1 типа функции ядра T сгенерировать начальное положение i -й частицы ($i = 1, m$) с помощью случайного вектора (x_i^1, x_i^2, Ci) , где $x_i^1 \in [x^{1T}_{min}, x^{1T}_{max}]$, $x_i^2 \in [x^{2T}_{min}, x^{2T}_{max}]$ ($x_i^2 = 0$ при $T = 1, 4$), $C_i \in [C^{T}_{min}, C^{T}_{max}]$; инициализировать случайный вектор скорости $v_i(v_i^1, v_i^2, v_i^3)$ i -й частицы ($i = 1, m$) ($v_i^2 = 0$ при $T = 1, 4$). Принять начальное положение i -й частицы ($i = 1, m$) за лучшее ее известное положение $(\tilde{x}_i^1, \tilde{x}_i^2, \tilde{C}_i)$ и определить лучшую частицу среди всех частиц $(\tilde{x}^1, \tilde{x}^2, \tilde{C})$ для рассматриваемого типа функции ядра T . После чего N_{max} раз для каждой i -й частицы ($i = 1, m$) выполнить:

♦ коррекцию вектора скорости $v_i(v_i^1, v_i^2, v_i^3)$ i -й частицы и ее положения (x_i^1, x_i^2, Ci) по формулам:

$$v_i^j = \begin{cases} x * (v_i^j + \hat{\varphi} * \hat{r} * (\tilde{x}_i^j - x_i^j) + \tilde{\varphi} * \tilde{r}(\tilde{x}^j - x_i^j)), j = 1, 2, \\ x * (v_i^j + \hat{\varphi} * \hat{r} * (\tilde{C}_i - C_i) + \tilde{\varphi} * \tilde{r}(\tilde{C} - C_i)), j = 3 \end{cases} \quad (6)$$

$$x_i^j = x_i^j + v_i^j \text{ для } j = 1, 2, \quad (7)$$

$$C_i = C_i + v_i^3, \quad (8)$$

где \hat{r} и \tilde{r} – случайные числа в интервале $(0, 1)$, χ – коэффициент сжатия, – расчет точности SVM-классификатора с параметрами (x_i^1, x_i^2, Ci) для рассматриваемого типа функции ядра T с целью поиска оптимальной комбинации $(\tilde{x}^1, \tilde{x}^2, \tilde{C})$, обеспечивающей высокое качество классификации.

В результате для каждого типа T функции ядра, участвующего в поиске, будет определена частица с оптимальной комбинацией значений параметров $(\tilde{x}^1, \tilde{x}^2, \tilde{C})$, обеспечивающая высокое качество классификации при использовании соответствующего типа функции ядра T .

Шаг 3. Выбрать из полученных для каждого типа функции ядра T , включенного в поиск, те значения параметров $(\tilde{x}^1, \tilde{x}^2, \tilde{C})$ SVM-классификатора и соответствующий тип функции ядра T , при которых качество классификации оказалось максимальным (наилучшим).

Лучший тип и лучшие значения соответствующих ему значений параметров определяются по результатам сравнительного анализа лучших частиц, полученные при реализации PSO-алгоритма с фиксированным типом функции ядра.

4. Структура двухуровневого классификатора с применением бустинга.

Самая главная проблема, которая возникает в результате применения вышеприведенного алгоритма роя частиц, это повышенное время выполнения, затрачиваемое при поиске оптимальных или около оптимальных параметров классификатора. В больших объемах, данных, в многомерной среде, поиск оптимальных параметров ядра, типа функции ядра занимает много времени [12, 20]. Одними из вариантов решения данной проблемы являются уменьшение количества частиц в рое, а также уменьшений числа итераций. Однако, такой подход неизбежно приводит к ухудшению качества финального классификатора, в виду уменьшения вариантов выбора.

Для решения проблемы повышенной затраты времени, был рассмотрен подход, уменьшающий группу объектов, которые учувствуют при генерации обучающей и тестовой выборки. Объекты, которые не имеют влияния на финальный результат классификации, в данном случае не рассматриваются. Таким образом при обучении классификатора учитываются только опорные векторы, параметр кото-

рых не равен 0. Так как именно опорные векторы служат хранилищем информации о классах, а также то, что с учетом их расположения строится гиперплоскость, считается целесообразным использовать данный подход.

Таким образом целесообразна структура двухуровневого ансамбля классификаторов, которая повысит качество классификации в системах, характеризующихся сложной организацией с многомерными данными. Помимо прочего, данный подход не ведет к существенному повышению затрачиваемого времени. На первом уровне предлагается использовать группу классификаторов, полученных в результате работы нескольких простых алгоритмов, например, генетических, которые можно модифицировать для повышения эффективности. Эта группа алгоритмов результатом своей работы являют обучающую выборку для алгоритма роя частиц на втором этапе. Биоинспирированный алгоритм использует сформированный набор опорных векторов, полученный на первом этапе. Ниже, на рис. 2, приведена двухуровневая структура классификации с использованием бустинга.

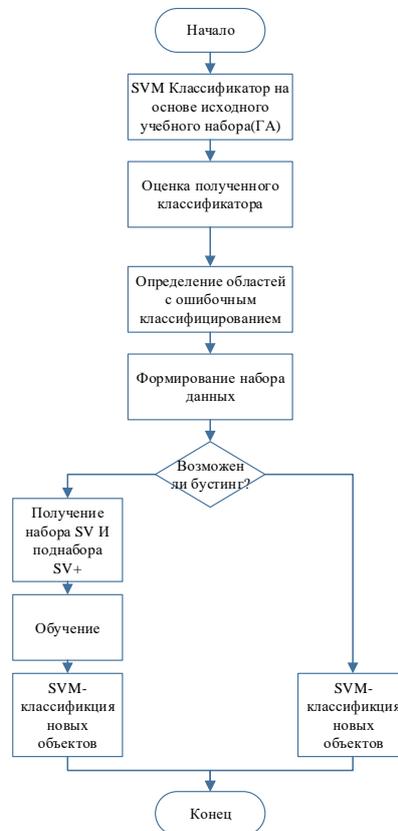


Рис. 2. Структура двухэтапного бустинга классификации объектов

1. Применение генетического алгоритма для создания t частных классификаторов. Классификаторы обучаются на учебном наборе. Для каждого из них ИСПОЛЬЗУЮТСЯ свои обучающие выборки TR_1, TR_2, \dots, TR_t . При этом для каждого из классификаторов задаются отдельно такие параметры как: типы и значения параметров функции ядра, а также параметры работы генетических алгоритмов, такие как вероятность мутации и т.д.

2. Результаты работы каждого частного классификатора, состоящие из набора опорных векторов SV_1, SV_2, \dots, SV_s , объединяются для создания обобщенного набора SV из ℓ объектов ($\ell \leq s$, где s – размер учебного набора).

3. Создается поднабор SV^+ , объекты которого (L) выделяются из общего набора опорных векторов ($L \leq \ell$). В данный поднабор относятся классификаторы, которые успешно справились с определением реальных классов опорных векторов. Создание такого набора позволяет отсеять наименее удачные классификаторы, для повышения эффективности обучения классификатора на втором этапе. Также создается поднабор SV^- , в который попадают наименее удачные классификаторы ($\ell \leq L$). Они потребуются для тестирования.

4. Итоговый классификатор создается с помощью бустинга биоинспирированного алгоритма, в данном случае PSO-алгоритма. Он использует набор удачных решений sv^+ для обучения, а набор SV^- для тестирования. Определяются значения параметров итогового классификатора.

5. Применение найденных параметров для создания итогового классификатора.

6. Для объектов, не попавших в какой-либо поднабор, выполняется доклассификация.

7. Оценка результатов работы алгоритма. Выполняется оценка качества, оценка затраченного времени, удовлетворение критериев.

Таким образом в результате работы, получаем классификатор, обеспечивающий повышенную точность классификации. Точность работы двухуровневого классификатора выше точности отдельных частных SVM классификаторов, используемый независимо. Также использование ансамбля алгоритмов, позволит значительно сократить время обучения алгоритма PSO, и соответственно время классификации.

5. Экспериментальные исследования. Оценка эффективности разработанного алгоритма проводилась на реальных наборах данных. Были использованы наборы German, Australian, Firms – наборы для кредитной оценки, наборы WDBC и Hearts – данные диагностики в медицине, а также наборы Spam и MOTP12. Полученные результаты на заданных наборах сравнивались с результатами классификации, проводимой в пакете SPSS Modeler (интенсивно используется за рубежом), а также в статистическом пакете STATISTICA StatSoft (популярен в России).

Ниже представлены диаграмма сравнения точности разработанного классификатора с вышеописанными пакетами. На рис. 3 представлено сравнение точности с использованием радиальной базисной функции Гаусса. Параметры функции ядра были заданы по умолчанию. Параметры регуляции – по умолчанию.

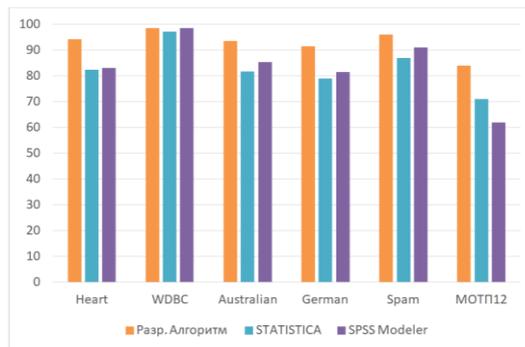


Рис. 3. Диаграмма точности классификаторов для радиальной базисной функции Гаусса

На рис. 4 представлено сравнение точности классификаторов для полиномиальной неоднородной функции ядра.

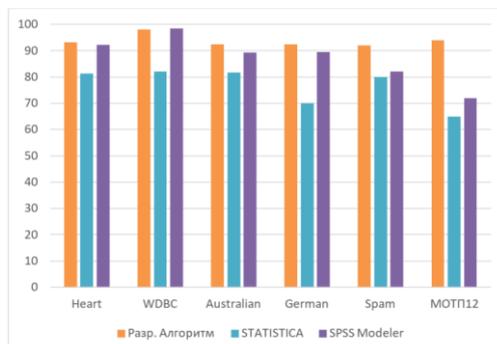


Рис. 4. Диаграмма точности классификаторов для полиномиальной неоднородной функции ядра

Таким образом можно сделать промежуточный вывод, что разработанный классификатор не уступает, а зачастую, и превосходит по точности, классификаторы, созданные в таких пакетах как SPSS Modeler и STATISTICA StatSoft. Однако, наряду с точностью алгоритма, возросло и время выполнения. Алгоритм долго обучается на неэффективном учебном наборе. Для решения этой проблемы предлагается использовать ансамбль алгоритмов.

Двухуровневый классификатор

По результатам анализа полученных данных, был сделан вывод, что по мере роста объема входных данных, увеличивается время поиска оптимальных значений параметров алгоритма роя частиц. Для решения данной проблемы предложен двухуровневый классификатор.

Эффективность данного классификатора можно увидеть на примере классификации набора MOTP12 (рис. 5). Данный набор считается сложноорганизованным и сложно-классифицируемым. Приведенные выше классификаторы справляются с классификацией за продолжительное время, несмотря на небольшой объем (400 эл. и 2 хар.) В процессе работы алгоритма, на первом уровне двухуровневого классификатора, обучаются 10 простых классификаторов, в которых используются различные значения параметров. Для каждого отдельного классификатора, затрачиваемое время не превышает 2 секунд. Эти частные классификаторы отобрали 224 опорных вектора, большинство из которых были классифицированы верно. Они в дальнейшем составили учебную выборку SV^+ . Остальные объекты составили тестовую выборку SV^- .

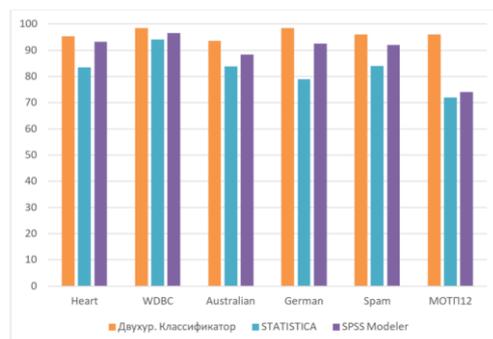


Рис. 5. Диаграмма итоговой точности классификаторов

На основе учебной выборки, модифицированный алгоритм роя частиц находит субоптимальные значения в 1.5 раза быстрее, чем при использовании полного набора данных. Итоговый классификатор верно классифицировал все объекты тестовой выборки SV.

Точность решений частных классификаторов составила 80–92 %, а точность итогового классификатора, в среднем 96%. Таким образом использование двухуровневого классификатора повышает точность итоговой классификации, по сравнению с частными классификаторами. Помимо этого, сокращение учебного набора с 400 до 224 сократило время поиска более чем в 2 раза. Таким образом двухуровневый классификатор ускоряет процесс классификации, по сравнению с модифицированным PSO алгоритмом в 2 раза.

Таким образом использование двухуровневого классификатора повышает точность итоговой классификации, по сравнению с частными классификаторами. Помимо этого, сокращение учебного набора с 400 до 224 сократило время поиска более чем в 2 раза. Таким образом двухуровневый классификатор ускоряет процесс классификации, по сравнению с модифицированным PSO алгоритмом в 2 раза.

Заключение. Целью работы являлось повышение эффективности алгоритмов, решающих задачу классификации с применением биоинспирированных алгоритмов. Для достижения данной цели был проведен аналитический обзор существующих подходов к решению задачи бинарной классификации. В процессе анализа был выбран метод опорных векторов. Была изучена возможность применения генетических и биоинспирированных эвристик в задаче классификации. Была приведена постановка задачи классификации, а также задача бинарной классификации на основе алгоритма опорных векторов (SVM-алгоритма).

Для решения данной задачи был применен алгоритм роя частиц(PSO). Данный алгоритм в контексте задачи поиска субоптимальных значений параметров классификатора способен обеспечить высокое качество классификации. Модификацией алгоритма является динамическое изменение значений координат, которые отвечают за тип функции ядра. Данная доработка позволяет значительно снизить затрачиваемое время разработки классификатора.

Была приведена структура двухуровневого классификатора. На первом уровне данного классификатора, формируется ансамбль простых классификаторов которые формируют учебную выборку, которая, в дальнейшем используется PSO алгоритмом на втором этапе. Такой подход позволяет значительно уменьшить временные затраты, а также повысить качество получаемых решений.

По итогам экспериментальных исследований был сделан вывод что приведенный алгоритм роя частиц в задаче классификации превосходит по качеству классификации существующие решения, полученные в пакетах STATISTICA StatSoft и IBM SPSS Modeler.

Экспериментальные исследования двухуровневого классификатора показали, что он способен принимать решения высокой точности в многомерных, сложноорганизованных массивах данных. За счет использования ансамбля алгоритмов на первом уровне, была уменьшена и качественно улучшена учебная выборка для алгоритма роя частиц на втором уровне. Данный двухуровневый классификатор позволяет сократить затраты времени на поиск субоптимальных значений параметров классификатора, гарантируя высокую точность решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воронцов, К.В.* Обзор современных исследований по проблеме качества обучения алгоритмов // Таврический вестник информатики и математики. – 2004. – № 1. – С. 5-24.
2. *Курейчик В.М., Курейчик В.В., Родзин С.И., Гладков Л.А.* Основы теории эволюционных вычислений. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2010.

3. *Карпенко А.П.* Популярные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов // Информационные технологии. – 2012. – № 7 (Приложение). – С. 1-32.
4. *Родзин С.И., Курейчик В.В.* Состояние, проблемы и перспективы развития биоэвристик // Программные системы и вычислительные методы. – 2016. – № 2. – С. 158-172.
5. *Курейчик В.М., Запорожец Д.Ю.* Роевой алгоритм в задачах оптимизации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 28-32.
6. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с.
7. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
8. *Clarke, B., Fokoue E., Zhang H.H.* Principles and Theory for Data Mining and Machine Learning. – Springer Science, LLC, 2009. – 781 p.
9. *Graf H.P., Cosatto E., Bottou L., Durdanovic I., Vapnik V.* Parallel Support Vector Machines: The Cascade SVM // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2004. – Vol. 17. – P. 521-528.
10. *Priyadarshini A., Agarwal S.* A Map Reduce based Support Vector Machine for Big Data Classification // International Journal of Database Theory and Application. – 2015. – Vol. 8, No. 5. – P. 77-98.
11. *Demidova L., Sokolova Yu.* A Novel SVM-kNN Technique for Data Classification // 6-th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO' 2017). – 2017. – P. 459-462.
12. *Zhang H., Berg A.C., Maire M., Malik J.* SVM-KNN: Discriminative Nearest Neighbor Classification for Visual Category Recognition, Proceedings // 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – Vol. 2. – P. 2126-2136.
13. *Воронцов К.В.* Комбинаторные оценки качества обучения по прецедентам // Докл. РАН. – 2004. – Т. 394, № 2. – С. 175-178.
14. *Дьяконов А.Г.* Анализ данных, обучение по прецедентам, логические игры, системы WEKA, RapidMiner и MatLab (Практикум на ЭВМ кафедры математических методов прогнозирования): учеб. пособие. – М.: Издательский отдел факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 278 с.
15. *Lean Yu, Shouyang Wang, Kin Keung Lai, Ligang Zhou.* Bio-Inspired Credit Risk Analysis. Computational Intelligence with Support Vector Machines. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 244 p.
16. *Вьюгин В.В.* Математические методы теории машинного обучения и прогнозирования: учеб. пособие. – М.: МФТИ, 2013. – 379 с.
17. *Демидова Л.А., Соколова Ю.С.* Аспекты применения алгоритма роя частиц в задаче разработки SVM-классификатора // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – № 3 (53). – С. 84-92.
18. *Duggal P.S., Paul S., Tiwari P.* Analytics for the Quality of Fertility Data using Particle Swarm Optimization // International Journal of Bio-Science and Bio-Technology. – 2015. – Vol. 7, No. 1. – P. 39-50.
19. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В.* Анализ и обзор моделей эволюции // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2007. – № 5. – С. 114-126.
20. *Chapelle O., Vapnik V., Bousquet O., Mukherjee S.* Choosing Multiple Parameters for Support Vector Machine // Machine Learning. – 2002. – Vol. 46. – P. 131-159.

REFERENCES

1. *Vorontsov, K.V.* Obzor sovremennykh issledovaniy po probleme kachestva obucheniya algoritmov [Review of modern research on the problem of the quality of learning algorithms], *Tavrisheskiy vestnik informatiki i matematiki* [Tauride Bulletin of Informatics and mathematics], 2004, No. 1, pp. 5-24.
2. *Kureychik V.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I., Gladkov L.A.* Osnovy teorii evolyutsionnykh vychisleniy [Fundamentals of the theory of evolutionary computing]. Rostov-on-Don: YuFU, 2010.
3. *Karpenko A.P.* Populyarnye algoritmy global'noy poiskovoy optimizatsii. Obzor novykh i maloizvestnykh algoritmov [Popular algorithms for global search engine optimization. Review of new and little-known algorithms], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2012, No. 7 (Appendix), pp. 1-32.

4. Rodzin S.I., Kureychik V.V. Sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya bioevristik [State, problems and prospects for the development of bioheuristics], *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody* [Software systems and computational methods], 2016, No. 2, pp. 158-172.
5. Kureychik V.M., Zaporozhets D.Yu. Roeffy algoritm v zadachakh optimizatsii [Swarm algorithm in optimization problems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 28-32.
6. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.
7. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: tutorial]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014, 446 p.
8. Clarke, B., Fokoue E., Zhang H.H. Principles and Theory for Data Mining and Machine Learning. Springer Science, LLC, 2009, 781 p.
9. Graf H.P., Cosatto E., Bottou L., Durdanovic I., Vapnik V. Parallel Support Vector Machines: The Cascade SVM, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2004, Vol. 17, pp. 521-528.
10. Priyadarshini A., Agarwal S. A Map Reduce based Support Vector Machine for Big Data Classification, *International Journal of Database Theory and Application*, 2015, Vol. 8, No. 5, pp. 77-98.
11. Demidova L., Sokolova Yu. A Novel SVM-kNN Technique for Data Classification, *6-th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO' 2017)*, 2017, pp. 459-462.
12. Zhang H., Berg A.C., Maire M., Malik J. SVM-KNN: Discriminative Nearest Neighbor Classification for Visual Category Recognition, *Proceedings, 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, Vol. 2, pp. 2126-2136.
13. Vorontsov K.V. Kombinatornye otsenki kachestva obucheniya po pretsedentam [Combinatorial evaluations of the quality of training based on precedents], *Dokl. RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 2004, Vol. 394, No. 2, pp. 175-178.
14. D'yakonov A.G. Analiz dannykh, obuchenie po pretsedentam, logicheskie igry, sistemy WEKA, RapidMiner i MatLab (Praktikum na EVM kafedry matematicheskikh metodov prognozirovaniya): ucheb. posobie [Data analysis, case studies, logic games, WEKA, RapidMiner and MatLab systems (computer Workshop of the Department of mathematical forecasting methods): textbook]. Moscow: Izdatel'skiy otdel fakul'teta VMK MGU im. M.V. Lomonosova, 2010, 278 p.
15. Lean Yu, Shouyang Wang, Kin Keung Lai, Ligang Zhou. Bio-Inspired Credit Risk Analysis. Computational Intelligence with Support Vector Machines. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 244 p.
16. V'yugin V.V. Matematicheskie metody teorii mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya: ucheb. posobie [Mathematical methods of the theory of machine learning and forecasting: textbook]. Moscow: MFTI, 2013, 379 p.
17. Demidova L.A., Sokolova Yu.S. Aspekty primeneniya algoritma roya chastits v zadache razrabotki SVM-klassifikatora [Aspects of applying the particle swarm algorithm to the problem of developing an SVM classifier], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan state radio engineering University], 2015, No. 3 (53), pp. 84-92.
18. Duggal P.S., Paul S., Tiwari P. Analytics for the Quality of Fertility Data using Particle Swarm Optimization, *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 2015, Vol. 7, No. 1, pp. 39-50.
19. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V. Analiz i obzor modeley evolyutsii [Analysis and review of evolution models], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2007, No. 5, pp. 114-126.
20. Chapelle O., Vapnik V., Bousquet O., Mukherjee S. Choosing Multiple Parameters for Support Vector Machine, *Machine Learning*, 2002, Vol. 46, pp. 131-159.

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

Балабанов Дмитрий Валерьевич – Южный федеральный университет; e-mail: dbalabanov@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Ковтун Антон Владиславович – e-mail: anton.kovtun93@gmail.com; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

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

Balabanov Dmitry Valerievich – Southern Federal University; e-mail: dbalabanov@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; graduate student.

Kovtun Anton Vladislavovich – e-mail: anton.kovtun93@gmail.com; the department of computer aided design; graduate student.

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

УДК 004.032.26

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-146-156

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

СПОСОБ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДСТВ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ПЛИС

Исследования в области искусственного интеллекта ведутся с возрастающим интересом с каждым годом. Области применения искусственного интеллекта довольно обширны: автоматизация, анализ большого объема данных, технологии умного дома, машинное зрение и т.д. Технологии искусственного интеллекта базируются на использовании искусственных нейронных сетей, имеющие в своей основе принципы нервной системы животных. При этом актуальным вопросом является реализация искусственных нейронных сетей на различных программно-аппаратных платформах: программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) типа FPGA (Field Programmable Gate Array), на интегральных схемах специального назначения (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC), GPU, CPU и т.д. ПЛИС наилучшим образом проявляют себя в малоомощных мобильных системах. ASIC демонстрируют наибольшую производительность с недостатком: высокая цена разработки. Проблема быстрого прототипирования проектов, основанных на использовании искусственных нейронных сетей, для ПЛИС привычными методами (с помощью HDL-языков, HDL-кодеров, графического программирования) заключается в том, что либо такой проект сложен и длителен в отладке (HDL-языки), либо не оптимален получающийся код (HDL-кодеры), либо высока длительность разработки проекта и сложность реконфигурации нейронной сети (графическое программирование). Поэтому в рамках данной работы рассматривается эффективный метод проектирования полносвязных и сверточных нейронных сетей для их реализации на ПЛИС использованием пакета Xilinx System Generator for DSP и Matlab/Simulink. Генерируемые таким образом искусственные нейросети легко реконфигурируемы и позволяют решать следующие задачи: распознавание изображений, оптимальная фильтрация (например, для задач подповерхностной радиолокации).

Искусственный интеллект; искусственные нейронные сети; реализация на ПЛИС; сверточная нейросеть; метод проектирования.

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

USING FAST PROTOTYPING FACILITIES FOR IMPLEMENTATION OF A CONVOLUTION NEURAL NETWORK ON A FPGA

Research in the field of artificial intelligence is carried out with increasing interest every year. The fields of application of artificial intelligence are quite extensive: automation, analysis of a large amount of data, smart home technology, machine vision, etc. Artificial intelligence technologies are based on the use of artificial neural networks, which are based on the principles of the animal nervous system. In this case, the actual issue is the implementation of artificial neural networks on various software and hardware platforms: programmable logic integrated circuits of the FPGA type (Field Programmable Gate Array), on special purpose integrated circuits (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC), GPU, CPU etc. FPGA performs best in low-power mobile systems. ASIC demonstrates the highest performance at a fairly high development cost. The problem of rapid prototyping of projects based on the use of artificial neural networks for FPGAs using conventional methods (using HDL languages, HDL encoders, graphic programming) is that either such a project is complex and time-consuming to debug (HDL languages), or the resulting code is not optimal (HDL encoders), or the duration of the project development and the complexity of reconfiguring the neural network (graphical programming) are high. Therefore, in the framework of this work, an effective method for designing fully connected and convolutional neural networks for their implementation on FPGAs using the Xilinx System Generator for DSP and Matlab / Simulink package is considered. Artificial neural networks generated in this way are easily reconfigurable and allow solving the following problems: image recognition, optimal filtering (for example, for problems of subsurface radar).

Artificial Intelligence; artificial neural networks; FPGA implementation; convolutional neural network; design method.

Введение. За последнее время значительно возрос интерес к изучению и применению искусственных нейросетей. В данной работе уделяется особое внимание разработке искусственных нейронных сетей (ИНС) на ПЛИС, как платформе, наилучшим образом проявляющей себя в энергоэффективных решениях [1, 2]. Существует проблема разработки проектов для ПЛИС привычными методами, основанных на использовании ИНС, как полносвязных (ПНС), так и сверточных (СНС). Заключается она в том, что либо такой проект сложен и длителен в отладке (HDL-языки) [3–5], либо не оптимален с точки зрения получаемого кода (HDL-кодеры) [6]. В работах [7–9] описана разработка ПНС и СНС для ПЛИС с помощью Xilinx System Generator for DSP, однако проектирование ПНС с большим количеством нейронов представляет немалые временные сложности. Для устранения данной проблемы и предлагается метод, описанный в данной работе. Метод заключается в проектировании СНС с использованием библиотеки Xilinx System Generator for DSP, импортированную в среду Matlab/Simulink, и использовании встроенного языка MatlabC для автоматической генерации заданной структуры ИНС. Генерируемые по данному методу искусственные нейросети легко реконфигурируемы и позволяют решать следующие задачи: распознавание изображений, оптимальная фильтрация (например, для задач подповерхностной радиолокации [10]). Очевидно, что применение методов искусственного интеллекта на основе нейросетей позволит, в том числе, вывести на качественно новый уровень процедуры распознавания технических состояний при контроле и диагностике сложных объектов [11], а также стать практической альтернативой строгим математическим методам [12] по решению задач идентификации объектов различных типов.

Целью работы является разработка и верификация метода проектирования сверточной нейронной сети для прототипирования на ПЛИС с помощью средств Xilinx System Generator for DSP и Matlab.

Разрабатываемый метод. На рис. 1 представлен полный маршрут проектирования ИНС на ПЛИС.

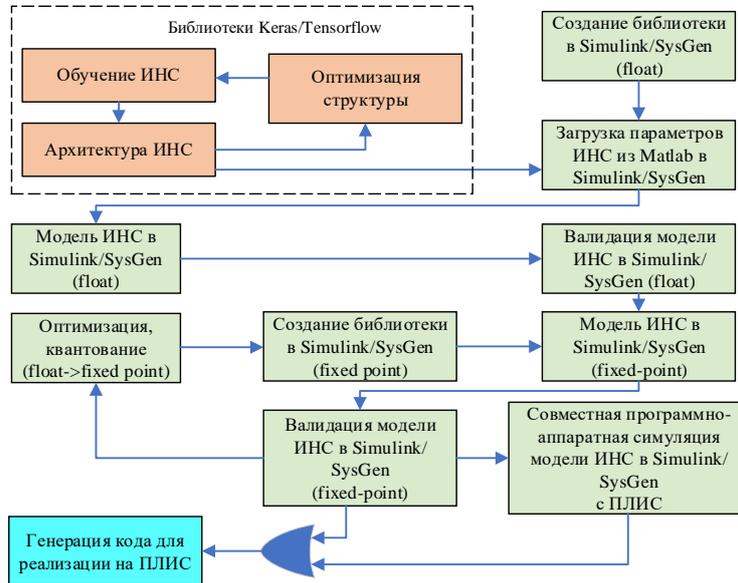


Рис. 1. Маршрут разработки ИНС на ПЛИС для предложенного метода

На представленной схеме оранжевым цветом выделены те процедуры, которые производятся с помощью инструментов проектирования, обучения и тестирования ИНС с использованием соответствующих библиотек (TensorFlow, Keras). Зеленым цветом выделены операции, производимые в Simulink/Xilinx SysGen и необходимые для подготовки проекта к реализации ИНС на целевую платформу с ПЛИС. Библиотека Xilinx элементов описана в [13]. Создание собственной библиотеки необходимо для возможности осуществления автоматической генерации архитектуры ИНС в Simulink/SysGen. Описание работы с Simulink и генерации модели с помощью команд представлено в [14].

Рассмотрим структуру ИНС, которую будем брать для автоматической генерации по разрабатываемому методу. Обобщенная структура одноканальной сверточной нейросети представлена на рис. 2.

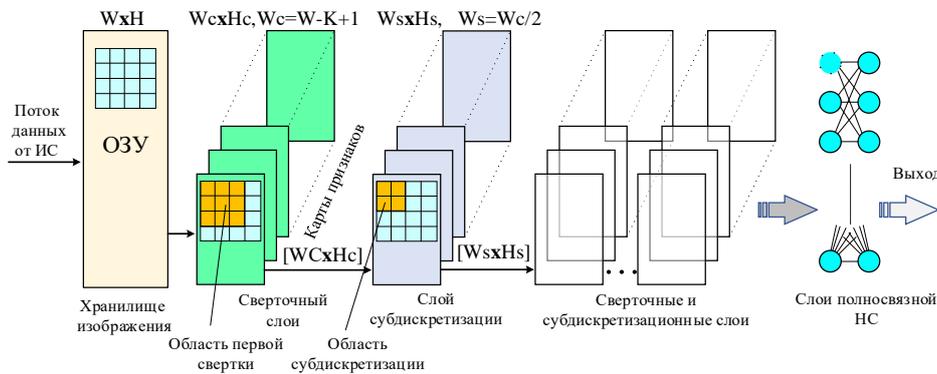


Рис. 2. Структура сверточной нейросети (1 канал)

Здесь блок «Хранилище изображения» представляет собой набор компонентов (RAM, ROM), позволяющих хранить в ячейках RAM изображение, подаваемое на вход в потоковом виде.

В задачи сверточного слоя входит формирование двумерной свертки между входным изображением и ядром фильтра свертки [2, 5,15]. Выходной сигнал сверточного слоя представлен выражением (1).

$$f_i^{CLout} = F_{act} \left(\sum_{j=1}^{n_m} f_j^{in} * k_{i,j} + b_i \right), 1 \leq i \leq n_{out}, \quad (1)$$

где $k_{i,j}$ – фильтры свертки, b_i – значения смещения, F_{act} – функция активации [2]. Методы реализации двумерной свертки на ПЛИС описаны в [16].

Слой субдискретизации производит сокращение изображения в 2 раза (по горизонтали и вертикали) [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Сигнал на выходе слоя субдискретизации (MaxPooling) основан на применении формулы (2).

$$f_{i,j}^{SDout} = \max_{p \times p} (f_{m,n}^{in}, f_{m,n+1}^{in}, \dots, f_{m,n+p-1}^{in}, f_{m+1,n}^{in}, f_{m+1,n+1}^{in}, \dots, f_{m+1,n+p-1}^{in}, \dots, f_{m+p-1,n}^{in}, f_{m+p-1,n+1}^{in}, \dots, f_{m+p-1,n+p-1}^{in}) \quad (2)$$

где f^{in} – значения пикселей входного изображения.

После осуществления операций двумерной свертки и субдискретизации сигнал со всех потоков, связанных с количеством карт признаков, мультиплексируется в один поток и подается на полносвязную часть ИНС [15]. Уравнением (3) описывается расчет сигнала на выходе i -го нейрона полносвязной НС [2].

$$f_i^{FNout} = F_{act} \left(\sum_{j=1}^{n_m} f_j^{in} \cdot w_j + b_i \right), \quad (3)$$

где w_j – весовые коэффициенты, b_i – значения смещения, F_{act} – функция активации.

Функция активации F_{act} применяется после операции свертки, а также в нейронах ПНС [15]. Для СНС в качестве ФА чаще всего используют RELU, в нейронах выходного слоя ПНС – гиперболический тангенс TanH. Также на практике применяются и другие ФА [17].

Автоматическая генерация структуры нейросети предполагает написание скриптов в Matlab для каждого отдельного блока Simulink/SysGen (слои свертки, субдискретизации, нейронов ПНС), а также их соединения между собой в единую структуру.

Генерация сверточной нейросети. В качестве примера будем рассматривать СНС со структурой, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Пример анализируемой СНС

Слой НС	Input	Conv2D	MaxPool2D	Flatten	Dense_1	Dense_2
Размерность сигнала	6x6	4x4x3 (ядро 3x3)	2x2x3	1x12	12x32	32x2

Блок «Хранилище изображения» на блоках Simulink/SysGen в сгенерированном для примера из табл. 1 виде представлен на рис. 3. Данный блок является уникальным для каждого канала (цвет) и общим для всех карт признаков следующего слоя. Для ускорения производительности в схему включена двухпортовая ОЗУ, чтобы производить чтение одновременно с записью. Чтение производится после записи первых двух строк изображения плюс количество пикселей, равное линей-

ному размеру сверточного ядра. В ПЗУ записываются массивы вспомогательных значений адреса так, чтобы данные в ОЗУ были представлены в «квадратичной» форме. Это нужно, чтобы как можно скорее производилась операция субдискретизации, работающая с квадратами пикселей 2x2.

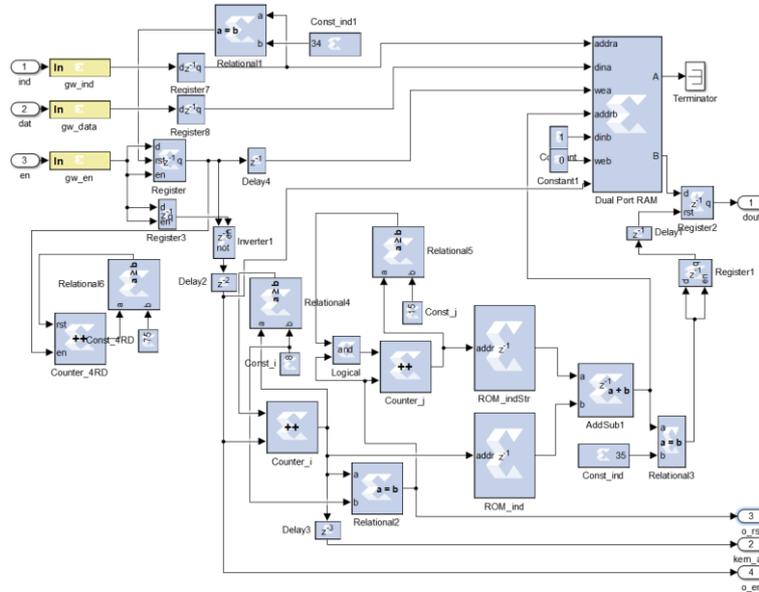


Рис. 3. Блок хранения изображения

На рис. 4,а представлен блок двумерной свертки, производящей операцию из выражения (1). Функциональная схема свертки основана на умножении с накоплением. Рис. 4,б представляет собой функциональную схему слоя субдискретизации для одной карты признаков, работа которой описывается формулой (2). Режим данной схемы является потоковым, поэтому необходимо в блоке хранения изображения использовать квадратичную форму представления информации.

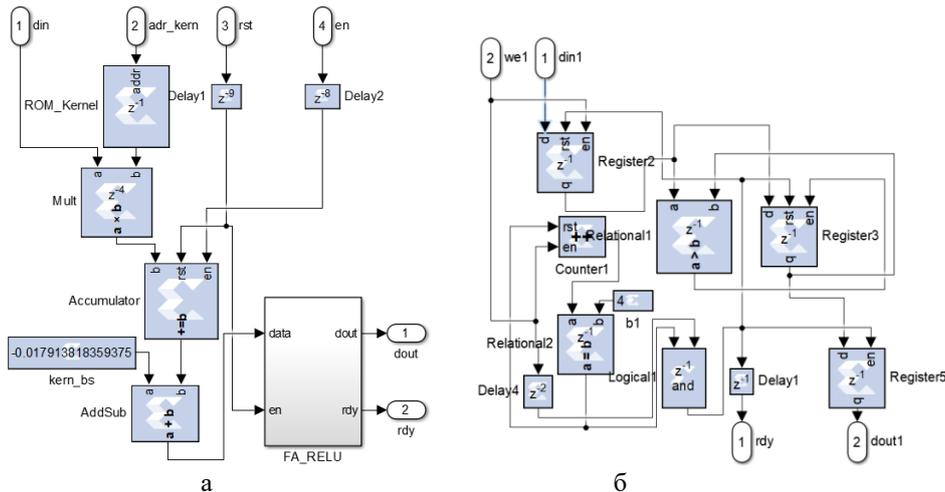


Рис. 4. Блоки для одной карты признаков: а – двумерной свертки, б – субдискретизации

Блок мультиплексирования данных со всех карт признаков в один поток представлен на рис. 5. Данный блок необходим для дальнейшей обработки сигнала в ПНС в потоковом режиме.

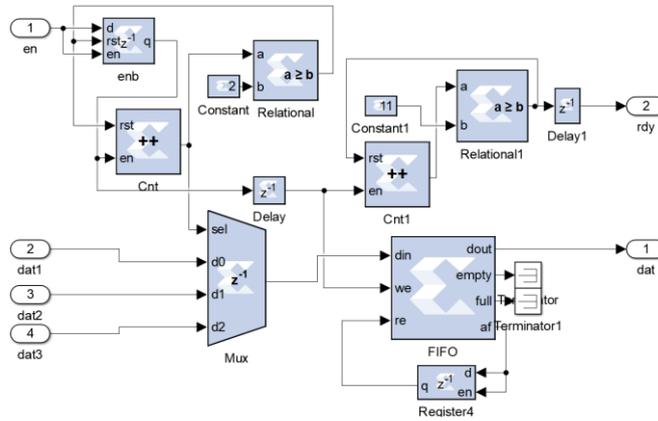


Рис. 5. Блок мультиплексирования в общий поток (Flatten)

На рис. 6,а изображен функциональный блок управления и подготовки сигнала для нейронов первого слоя ПНС. Для последующих слоев ПНС данный блок будет еще содержать мультиплексор, так данные перед этим блоком представляются в параллельном виде. Нейроны ПНС, чья функциональность описывается формулой (3), построены по схеме умножения с накоплением, представленной в работе [8], и последующим применением функции активации, либо RELU, либо TanH (рис. 6,б).

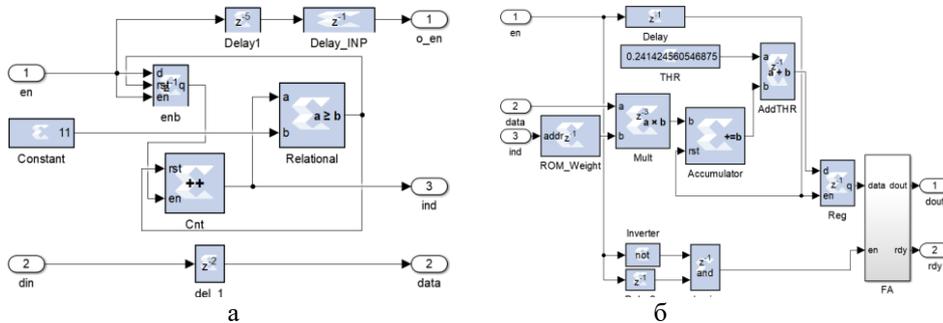


Рис. 6. Блоки: а – управления слоя ПНС, б – нейрон ПНС

Автоматическая генерация СНС позволяет на основе представленных выше функциональных блоков строить нейросеть любой конфигурации, подставляя необходимые значения в некоторые элементы блоков (константы, ПЗУ и т.д.).

Результаты работы сверточной нейросети. Проведем анализ работы СНС, построенной по архитектуре из табл. 1. Обучение нейросети проводилось с помощью средств Keras/TensorFlow. Коэффициенты фильтров свертки и весовые коэффициенты для полносвязной НС загружались в Matlab из файла *.h5. Классификация производилась по двум классам изображений: изображение нуля и единицы.

В целях уменьшения потребляемых ресурсов для функции активации «гиперболический тангенс» была использована его аппроксимация, описанная в работе [18] и представлена выражением (4).

$$FA_{TANH}(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z \leq L \\ H(z) & \text{при } -L < z < L \\ -1 & \text{при } z \geq L \end{cases}, \quad H(z) = \begin{cases} z \cdot (\beta - \theta \cdot z) & \text{при } 0 \leq z \leq L \\ z \cdot (\beta + \theta \cdot z) & \text{при } -L \leq z \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где z – значение входного сигнала, $\beta = 2/L$, $\theta = 1/L^2$. Интервал L в работе был принят, равной 2.

Погрешность аппроксимации гиперболического тангенса показана на рис. 7.

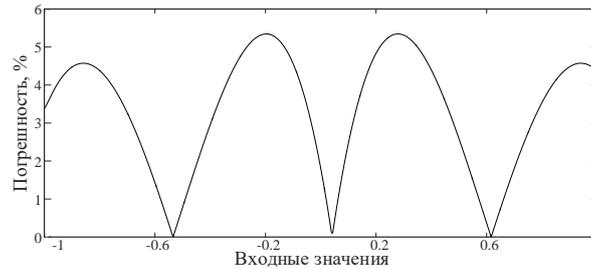


Рис. 7. Погрешность аппроксимации TanH

Максимальная погрешность, связанная с квантованием функции активации TanH, составила -90дБ для 20-битного квантования, -65дБ для 16-битного квантования, -40дБ для 12-битного квантования и -20дБ для 8-битного квантования. Уровень 0 дБ соответствует расхождению значения между идеальным гиперболическим тангенсом и его аппроксимацией на интервале от 0 до 1.

Оценим количество потребляемых ресурсов СНС целевой ПЛИС (Kintex UltraScale KU-040). Доступные ресурсы ПЛИС представлены в табл. 2.

Таблица 2

Доступные ресурсы ПЛИС Kintex UltraScale KU-040

Наименование блоков	Регистры	Число LUTs	Число Block RAM	Число блоков DSPs
Количество	484800	242400	600	1920

Используемые ресурсы ПЛИС Kintex UltraScale KU-040 для СНС с 32-, 20- и 8-битным квантованием представлены на рис. 8.

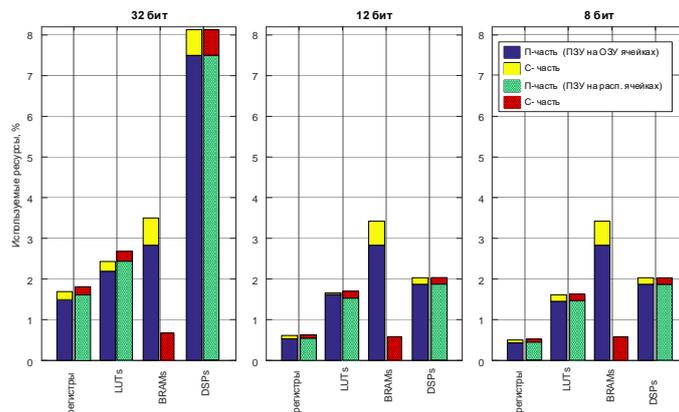


Рис. 8. Используемые ресурсы ПЛИС Kintex UltraScale KU-040

«П-часть» из рисунка означает полносвязную часть нейросети, «С-часть» – сверточную часть нейросети.

Как видно из рис. 8, если реализовать ячейки ПЗУ ПНС на распределенной памяти, то эффективность использования ресурсов ПЛИС увеличится примерно в 4 раза.

В табл. 3 представлена максимальная ошибка квантования относительно вычисления с плавающей запятой (single float) на интервале $[-1;1]$ E_{qMax} . Во втором столбце представлена ошибка для полносвязной части ИНС, в третьем – для всей СНС.

Таблица 3

Погрешности квантования E_{qMax}

Разрядность, бит	ПНС, %	СНС (вместе с ПНС), %
32	4.17e-5	5.96e-5
20	0.0160	0.0228
16	0.27	0.32
12	3.75	4.53
8	27.97	27.97

Причем максимальная ошибка наблюдается в случаях, когда значения на выходах нейросети близки к нулю (т.е., когда на вход подается неклассифицируемое нейросетью изображение).

Из анализа рис. 8 и табл. 3 следует, что понижение уровня квантования до 8 бит нецелесообразно в виду небольшой выгоды в потребляемых ресурсах ПЛИС и значительному повышению погрешности вычислений. Можно сделать вывод, что применение 12-битного квантования СНС является компромиссным решением между ресурсами и погрешностью вычисления.

Заключение. Таким образом была произведена разработка и верификация метода проектирования сверточной нейронной сети для прототипирования на ПЛИС с помощью средств Xilinx System Generator for DSP и Matlab. В рамках данной работы анализировалась простая сверточная нейросеть для входного изображения 6×6 с тремя картами признаков, слоем ПНС с 32-мя нейронами и выходным слоем ПНС с двумя нейронами. Обучение нейросети проводилось с помощью средств Keras.TensorFlow. Коэффициенты фильтров свертки и весовые коэффициенты для полносвязной СНС загружались в Matlab из файла *.h5. Максимальная ошибка квантования на интервале $[-1;1]$ для ИНС с разрядностью 32 бита составила $5e-5$ %, для разрядности 12 бит – 4.53 %. Были проанализированы используемые ресурсы ПЛИС Kintex UltraScale KU-040 разработанной СНС. Реализация СНС с разрядностью 12 бит и ячейками ПЗУ ПНС на распределенной памяти является компромиссным решением между эффективностью использования ресурсов ПЛИС (уменьшение числа блочных ОЗУ BRAM в 4.3 раза и числа блоков ЦОС DSP в 4 раза) и погрешностью квантования (4.5 % относительно вычислений с одинарной точности single float).

Данный метод пригоден для разработки ИНС в проектах по обработке радиолокационного сигнала в радиотехнических системах [19], а также в имитационном моделировании [10]. При реализации СНС по данному методу необходимо учесть, что запись/чтение изображения в ОЗУ наиболее удобно представлять в квадратичной форме. Если же требуется разработать СНС для распознавания линейных сигналов (одномерных), то индексы для записи/чтения сигнала в ОЗУ будут иметь более простой вид, а остальные модули разработанной библиотеки вид не изменят, что говорит об универсальности модулей. Стоит также отметить, что представленный алгоритм двумерной свертки имеет альтернативы [20], которые можно применять в зависимости от задач, поставленных перед реализацией СНС на ПЛИС (скорость вычисления или ресурсоемкость).

Научные исследования выполнены в рамках проекта «Создание высокотехнологического производства аппаратно-программных комплексов обработки сельхозсырья на основе СВЧ излучения» (Соглашение с Минобрнауки РФ № 075-11-2019-083 от 20.12.2019 г., Договор ЮФУ № 18 от 20.09.2019 г., номер работы в ЮФУ № ХД/19-25-РТ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шутицин С.П., Ямаев М.И.* Развитие аппаратно-ориентированных нейронных сетей на FPGA и ASIC // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 31.
2. *Misra J., Saha I.* Artificial neural networks in hardware: a survey of two decades of progress // Neurocomputing. – 2010. – Vol. 74, No. 1-3, pp. 239-255.
3. *Qiu, J., Song, S., Wang, Y., Yang, H., Wang, J., Yao, S., Xu, N.* Going Deeper with Embedded FPGA Platform for Convolutional Neural Network. Proceedings of the 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays – FPGA '16. – 2016. – DOI: 10.1145/2847263.2847265.
4. *Alçın M., Pehlivan İ., Koyuncu İ.* Hardware design and implementation of a novel ANN-based chaotic generator in FPGA // Optik. – 2016. – Vol. 127, No. 13. – P. 5500-5505.
5. *Solovyev R.A. et al.* FPGA implementation of convolutional neural networks with fixed-point calculations // Arxiv preprint arxiv:1808.09945. – 2018.
6. *Воробьев А.Н., Шидловский Д.Ю., Багров А.А.* Аппаратная реализация сверточной нейросети на ПЛИС с использованием модельно-ориентированного проектирования // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019. – 2019. – С. 423-429.
7. *Bahoura M.* FPGA implementation of an automatic wheezing detection system // Biomedical Signal Processing and Control. – 2018. – Vol. 46. – P. 76-85. (bahoura2018.pdf).
8. *Oniga S.* A new method for FPGA implementation of artificial neural network used in smart devices // International computer science conference microCAD. – 2005. – P. 31-36.
9. *Khodja D.E., Kheldoun A., Refoufi L.* Sigmoid function approximation for ANN implementation in FPGA devices. – 2010.
10. *Бахчевников В.В.* Электродинамическая модель радиосигнала, рассеянного на многослойной структуре, с использованием физической оптики и метода трассировки лучей // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22, № 6.
11. *Usenko O.A.* Estimation of diagnostic significance of the control parameters of technological objects based on graph model // Innovative technologies and didactics in teaching. – 2017. – P. 67-73.
12. *Ромм Я.Е., Белоконова С.С., Усенко О.А.* Поиск и идентификация объектов различных типов на основе признаков экстремального вида. II. – 2008.
13. *Design M. B. D. S. P.* Vivado Design Suite Reference Guide. – 2012.
14. *Matworks. Help Center.* Add_block. – URL: https://www.mathworks.com/help/simulink/shref/add_block.html#d120e249911 (accessed 20.04.2020).
15. *Kubat M.* Neural networks: a comprehensive foundation by Simon Haykin, Macmillan, 1994, ISBN 0-02-352781-7 // The Knowledge Engineering Review. – 1999. – Vol. 13, No. 4. – P. 409-412.
16. *Chang J., Sha J.* An efficient implementation of 2D convolution in CNN // IEICE Electronics Express. – 2016. – P. 13.20161134.
17. *Sibi P., Jones S. A., Siddarth P.* Analysis of different activation functions using back propagation neural networks // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2013. – Vol. 47, No. 3. – P. 1264-1268.
18. *Panicker M., Babu C.* Efficient FPGA implementation of sigmoid and bipolar sigmoid activation functions for multilayer perceptrons // IOSR J Eng. – 2012. – Vol. 2. – P. 1352-6.
19. *Лобач В.Т. и др.* Последовательный способ формирования каналов ММО при измерении параметров радиолокационных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 11 (172). – С. 213-224.
20. *Lu L. et al.* Evaluating fast algorithms for convolutional neural networks on FPGAs // 2017 IEEE 25th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). – IEEE, 2017. – P. 101-108.

REFERENCES

1. Shipitsin S.P., Yamaev M.I. Razvitiye apparatno-orientirovannykh neyronnykh setey na FPGA i ASIC [Development of hardware-oriented neural networks on FPGA and ASIC], *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of the Perm national research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, management systems], 2019, No. 31.
2. Misra J., Saha I. Artificial neural networks in hardware: a survey of two decades of progress, *Neurocomputing*, 2010, Vol. 74, No. 1-3, pp. 239-255.
3. Qiu, J., Song, S., Wang, Y., Yang, H., Wang, J., Yao, S., Xu, N. Going Deeper with Embedded FPGA Platform for Convolutional Neural Network, *Proceedings of the 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays – FPGA '16*, 2016. DOI: 10.1145/2847263.2847265.
4. Alçın M., Pehlivan İ., Koyuncu İ. Hardware design and implementation of a novel ANN-based chaotic generator in FPGA, *Optik*, 2016, Vol. 127, No. 13, pp. 5500-5505.
5. Solovyev R.A. et al. FPGA implementation of convolutional neural networks with fixed-point calculations, *Arxiv preprint arxiv:1808.09945*, 2018.
6. Vorob'ev A.N., Shidlovskiy D.Yu., Bagrov A.A. Apparattaya realizatsiya svertochnoy neyroseti na PLIS s ispol'zovaniem model'no-orientirovannogo proektirovaniya [Hardware implementation of convolutional neural network on FPGA using model-oriented design], *Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye – DSPA-2019* [Digital signal processing and its application-DSPA-2019], 2019, pp. 423-429.
7. Bahoura M. FPGA implementation of an automatic wheezing detection system, *Biomedical Signal Processing and Control*, 2018, Vol. 46, pp. 76-85. (bahoura2018.pdf).
8. Oniga S. A new method for FPGA implementation of artificial neural network used in smart devices, *International computer science conference microCAD*, 2005, pp. 31-36.
9. Khodja D.E., Kheldoun A., Refoufi L. Sigmoid function approximation for ANN implementation in FPGA devices, 2010.
10. Bakhchevnikov V.V. Elektrodinamicheskaya model' radiosignala, rasseyannogo na mnogosloynnoy strukture, s ispol'zovaniem fizicheskoy optiki i metoda trassirovki luchey [Electrodynamics model of a radio signal scattered on a multilayer structure using physical optics and ray tracing], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [News of higher educational institutions of Russia. Radioelectronics], 2019, Vol. 22, No. 6.
11. Usenko O.A. Estimation of diagnostic significance of the control parameters of technological objects based on graph model, *Innovative technologies and didactics in teaching*, 2017, pp. 67-73.
12. Romm YA.E., Belokonova S.S., Usenko O.A. Poisk i identifikatsiya ob"ektov razlichnykh tipov na osnove priznakov ekstremal'nogo vida. II [Search for and identify various types of objects based on extreme features. II], 2008.
13. Design M. B. D. S. P. Vivado Design Suite Reference Guide, 2012.
14. Matworks. Help Center. Add_block. Available at: https://www.mathworks.com/help/simulink/sref/add_block.html#d120e249911 (accessed 20.04.2020).
15. Kubat M. Neural networks: a comprehensive foundation by Simon Haykin, Macmillan, 1994, ISBN 0-02-352781-7, *The Knowledge Engineering Review*, 1999, Vol. 13, No. 4, pp. 409-412.
16. Chang J., Sha J. An efficient implementation of 2D convolution in CNN, *IEICE Electronics Express*, 2016 33. 13.20161134.
17. Sibi P., Jones S. A., Siddarth P. Analysis of different activation functions using back propagation neural networks, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013, Vol. 47, No. 3, pp. 1264-1268.
18. Panicker M., Babu C. Efficient FPGA implementation of sigmoid and bipolar sigmoid activation functions for multilayer perceptrons, *IOSR J Eng.*, 2012, Vol. 2, pp. 1352-6.
19. Lobach V.T. i dr. Posledovatel'nyy sposob formirovaniya kanalov MIMO pri izmerenii parametrov radiolokatsionnykh ob"ektov [Sequential method for forming MIMO channels when measuring parameters of radar objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 11 (172), pp. 213-224.
20. Lu L. et al. Evaluating fast algorithms for convolutional neural networks on FPGAs, 2017 *IEEE 25th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*. IEEE, 2017. pp. 101-108.

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

Бахчевников Валентин Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: bahchevnikov@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79518289271; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; ассистент.

Деркачев Владимир Александрович – e-mail: vderkachev@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: +79614154733; Научно-конструкторское бюро цифровой обработки сигналов; конструктор.

Бакуменко Алексей Николаевич – e-mail: baku@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: +79886031853; Инжиниринговый центр приборостроения радио и микроэлектроники; инженер.

Bakhchevnikov Valentin Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: bahchevnikov@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79518289271; the department of radio engineering & telecommunication systems; associate professor.

Derkachev Vladimir Aleksandrovich – e-mail: vderkachev@sfedu.ru; 347922, 2, Shevchenko street, Taganrog, Russia; phone: +79614154733; Research and Design Bureau of Digital Signal Processing; constructor.

Bakumenko Alexey Nikolaevich – e-mail: baku@sfedu.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79886031853; Engineering Center of Instrument Making, Radio- and Microelectronics; engineer.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-156-172

**В.В. Бова, Д.Ю. Запорожец, Ю.А. Кравченко, Э.В. Кулиев, В.В. Курейчик,
Н.А. Лызь**

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЯВНЫХ УГРОЗ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АКТИВНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В ИНТЕРНЕТ-ПРОСТРАНСТВЕ*

Статья посвящена проблеме идентификации неявных информационных угроз поисковой деятельности пользователя в Интернет-пространстве на основе анализа его активности в процессе данного взаимодействия. Применение знаний, хранящихся в интернет-пространстве, для реализации преступных намерений несет в себе угрозу для всего общества. Выявление злого умысла в действиях пользователей глобальной информационной сети не всегда является тривиальной задачей. Отработанные технологии анализа контекста интересов пользователя дают сбой в случае осторожных грамотных действий злоумышленников, которые в явном виде не демонстрируют преследуемой ими цели. В работе проведен анализ угроз, связанных с определенными сценариями реализации поисковых процедур, проявляющихся в поисковой деятельности. Описаны критерии оценки неэффективных и эффективного сценариев поиска. Среди признаков, указывающих на возможность наличия угрозы, выделены следующие основные: уход от решения задачи в бесцельную навигацию или к привлекательным ресурсам, поверхностный поиск, отсутствие смыслового погружения в решение поисковой задачи, хаотичные действия при поиске. Для определения наличия неблагоприятных признаков построена система показателей. Сформулированы признаки эффективного сценария организации поиска в Интернет-пространстве, описаны варианты наличия неявных угроз для подобной ситуации. Представлен подход идентификации описанных угроз с учетом заданных критериев оценки различных сценариев поведения пользователя в глобальном информационном пространстве. Разработан алгоритм машинного обучения для идентификации проблемных сценариев путем сравнения с ключевыми паттернами поведения. Создана программная реализация подсистемы идентификации информационных угроз, проведены экспериментальные исследования для подтвержде-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-22019.

ния эффективности подсистемы. Экспериментальные исследования проводились на основе обработки открытых данных из социальных сетей, а также с применением анализа поисковой деятельности пользователей в университетской корпоративной информационной среде.

Информационный поиск; неявные угрозы; анализ активности пользователя; вектор признаков; методы машинного обучения; оптимизация; интеллектуальные системы.

**V.V. Bova, D.Yu. Zaporozhets, Yu.A. Kravchenko, E.V. Kuliev, V.V. Kureyichik,
N.A. Lyz**

IMPLICIT THREATS IDENTIFICATION BASED ON ANALYSIS OF USER ACTIVITY ON THE INTERNET SPACE

The article is devoted to the problem of identifying implicit information threats of a user's search activity in the internet space based on an analysis of his activity in the course of this interaction. The use of knowledge stored in the Internet space for the implementation of criminal intentions poses a threat to the whole society. Identifying malicious intent in the users' actions of the global information network is not always a trivial task. The proven technologies for analyzing the context of user interests fail in the case of cautious and competent actions of attackers who do not explicitly demonstrate the goal they are pursuing. The paper analyzes the threats associated with certain scenarios for the implementation of search procedures that manifest themselves in search activities. Criteria of inefficient and effective search scenarios estimation are described. Among the signs indicating the possibility of a threat, the following main ones are highlighted: avoiding solving the problem in aimless navigation or attractive resources, superficial search, lack of meaningful immersion in solving the search problem, and chaotic actions during the search. To determine the presence of adverse signs, a system of indicators is built. The features of an effective scenario for organizing a search in the Internet space are formulated, options for the presence of implicit threats for a similar situation are described. An approach for identification the described threats is presented taking into account the specified criteria for evaluating various scenarios of user behavior in the global information space. A machine learning algorithm has been developed to identify problem scenarios by comparing with key behavioral patterns. The software implementation of the subsystem for identifying information threats has been created, experimental studies have been conducted to confirm the effectiveness of the subsystem. Experimental studies were carried out on the basis of processing open data from social networks, as well as using analysis of user search activity in the university corporate information environment.

Information search; implicit threats; analysis of user activity; feature vector; machine learning methods; optimization; intelligent systems.

Введение. Онлайн-обучение как восходящий тренд в развитии образовательных систем требует моделирования и разработки способов управления деятельностью обучающихся в интернет-пространстве. Широкое понимание онлайн-обучения позволяет говорить о многообразии видов информационно-образовательной деятельности, реализуемых в сети Интернет: учебно-познавательной, поисково-познавательной, коммуникативно-познавательной, информационно-созидательной, развлекательно-познавательной [1]. Одним из наиболее распространенных видов является поисково-познавательная деятельность, связанная с поиском информации в сети Интернет, включающая использование технологий поиска и работы с информацией, анализ и отбор релевантной информации, ее верификацию и применение [1]. Поиск и использование информации очень важны для обучающихся как в формальном, так и в неформальном и информальном образовании. Этот вид деятельности способствует накоплению не только «знаниевого» опыта, но и опыта работы с информацией, освоению технологий поиска и анализа, а также когнитивному и личностному развитию за счет расширения интересов и повышения мотивации познавательной деятельности обучающихся [2].

Однако исследования показывают, что студенты не готовы к эффективной поисковой деятельности, они весьма незначительно используют научные базы данных и электронные версии научных журналов. Так, для более чем 80 % студен-

тов вузов, наиболее важным, надежным и часто используемым источником академической информации являются поисковые системы общего назначения [3]. Большинство студентов не ищут новые подходы, а имеют тенденцию повторять стратегии, которые принесли успех в их предыдущем опыте [4]. Их поисковое поведение предвзято, они предпочитают результаты поиска с более высоким рейтингом, даже если это не вполне соответствует их потребностям [3]. Кроме того, поиск и обработка информации – это сложный процесс, включающий в себя постановку задачи, поиск соответствующих источников информации, извлечение и организацию соответствующей информации из каждого источника, синтез информации из различных источников и т.п. [5–7]. Эта деятельность востребует регулятивные, когнитивные и метакогнитивные способности студентов, которые не всегда развиты на должном уровне, следствием чего могут являться некачественные результаты поиска: плагиат, нерелевантная информация, некорректные выводы [5, 7, 8]. Клиповость мышления современной молодежи повышает вероятность данных следствий [9].

Дополнительные проблемы возникают в связи с тем, что поисковая деятельность имеет «затягивающий» характер и осуществляется не столько в специальных электронно-образовательных средах, сколько в сегментах интернет-пространства, где отсутствует контроль над потоком академической информации. В связи с этим к рискам потери эффективности деятельности добавляются кибер-риски, коммуникационные, контентные и другие риски, включая интернет-зависимость. Работа с информацией в Интернете, студенты могут испытывать дисфункциональные состояния, близкие к депрессии, связанные с ситуацией неопределенности и повышенной тревожностью [8]. У многих возникает «феномен потери в гиперпространстве», связанный с переживанием дезориентации из-за информационной перегрузки и бесцельного следования гиперссылкам [10]. Доказано, что такие интернет-активности, как поиск информации и общий серфинг, связаны с более высокими показателями проблематичного использования Интернета (интернет-зависимости) [11]. Веб-серфинг считается самым распространенным видом зависимости, в то же время он является и самым малоизученным [12]. Проявление и формирование склонности к интернет-зависимости может происходить в поисковой деятельности, когда она переходит в навязчивый веб-серфинг – просмотр многообразных интернет-ресурсов, хаотичную гипертекстовую навигацию, длительно и бесцельно осуществляемую субъектом.

Таким образом, важная роль поисково-познавательной деятельности в образовании, с одной стороны, и высокие риски для эффективности деятельности и психологического благополучия, с другой, требуют разработки как способов подготовки обучающихся, так и методов и инструментов внешнего сопровождения такой деятельности, в т.ч. интеллектуальных цифровых ассистентов. Решение второй задачи предполагает моделирование поисковой деятельности и угроз, возникающих в ней.

1. Описание проблемы и выбор критериев оценки угроз. Существуют различные по направленности исследования, в которых представлено моделирование поисковой деятельности человека в интернет-пространстве. Наиболее ранние психологические модели Б. Дэрвина, Д. Эллиса, К. Кухлтау, описывают только действия по поиску информации; расширенная модель Т. Уилсона включает пользователя информации, пользовательские потребности, запрос информации, обмен, использование и удовлетворенность (неудовлетворенность) пользователя результатами поискового запроса [13]. К настоящему времени создано множество поэтапных моделей поиска, при этом все многообразие выделяемых этапов можно свести к трем стадиям: начало и цепочка, мониторинг и дифференцирование, оценка и

извлечение [14]. Для изучения деятельности по поиску информации также используются модели поисковых стратегий, где акцент делается не столько на действиях, сколько на субъекте, ищущем информацию. Компонентами стратегий являются: планирование поиска, выбор ресурсов, реализация, извлечение знаний, способы преодоления трудностей, оценка, контроль и др. [5–7, 15, 16].

Поисковая деятельность характеризуется не только используемой стратегией, но и конкретным сценарием поведения, в т.ч. «механикой» использования поисковых систем. С этих позиций выделены различные способы поиска: сопоставление (соответствие) или исследование [6]; логический (булевый), наилучшего соответствия или комбинированный [16]; описана типовая модель поведения (тактика) пользователей при тематическом поиске информации [17]; построены формализованные вероятностные модели, обучающиеся из данных о пользовательских действиях (click logs) [18]; разработаны рекомендательные системы, поддерживающие направленный поиск в образовательных контекстах [19, 20].

Для документирования информации используются: метод навигационной карты (navigation flow map, NFM), который графически отображает многослойные взаимосвязи между веб-навигацией и поиском информации [6].

Как правило, моделируя действия пользователей, исследователи ставят задачи повышения интеллектуальности поисковых систем с целью удовлетворения потребностей и уменьшения информационной нагрузки на пользователя [17]. Ими не рассматривается контекст поисковой деятельности, несущие угрозу информационные события, возможности отвлечения и ухода пользователей в бесцельный серфинг. Без решения остаются важнейшие проблемы проявления и формирования склонности к интернет-зависимости в поисковой деятельности и другие вопросы обеспечения безопасности поискового поведения.

С позиции обеспечения безопасности поискового поведения обучающегося в части превенции веб-серфинга как интернет-зависимости можно выделить три угрозы и связанные с ними сценарии поведения: 1) уход от решения задачи в бесцельную навигацию или к привлекательным ресурсам (сценарий «отдаление»); 2) поверхностный поиск, отсутствие смыслового погружения в решение поисковой задачи (сценарий «сканирование»); 3) хаотичные действия при поиске (сценарий «спонтанность»).

Представим критерии для идентификации признаков наличия или отсутствия описанных угроз.

1. Для оценки признаков наличия сценария «Отдаление» выделим следующие критерии:

- 1.1) y_{11} – стабильность ключевых слов на страницах (релевантные слова);
- 1.2) y_{12} – переход по большому количеству гиперссылок (большое количество посещенных страниц);
- 1.3) y_{13} – постепенное увеличение времени пребывания на нерелевантных страницах;
- 1.4) y_{14} – длинные прямые цепочки без возвратов;
- 1.5) y_{15} – переход на рекламные баннеры;
- 1.6) y_{16} – переход от первой–второй к другим страницам поисковых результатов;
- 1.7) y_{17} – удержание «линии поиска».

2. Для оценки признаков наличия сценария «Сканирование» выделим следующие критерии:

- 2.1) y_{21} – большое количество просмотренных страниц с малым временем на просмотр отдельных страниц;
- 2.2) y_{22} – предпочтение простых и лаконичных источников;
- 2.3) y_{23} – использование легко доступных источников;

2.4) y_{24} – перепроверка найденной информации (возврат к посещенным страницам);

2.5) y_{25} – дочитывание страниц до конца, долгое нахождение на странице, существенная разница между временем просмотра отдельных страниц

2.6) $y_{26} = y_{16}$ – переход от первой–второй к другим страницам поисковых результатов;

3. Для оценки признаков наличия сценария «Спонтанность» выделим следующие критерии:

3.1) y_{31} – некорректная формулировка запроса;

3.2) y_{32} – использование результатов поиска, находящихся в первых строках списка;

3.3) y_{33} – частая смена запроса или отсутствие смены запроса;

3.4) y_{34} – фильтрация информации на ранней стадии цикла поиска

3.5) y_{35} – использование наиболее релевантных источников.

Противоположностью описанным нежелательным ситуациям в создаваемой модели является сценарий «Эффективность», который на начальном этапе оценки стал идентификатором отсутствия угроз. Для оценки признаков наличия сценария «Эффективность» выделим следующие критерии:

1) x_1 – просмотр релевантных страниц;

2) x_2 – существенное различие между временем нахождения на страницах;

3) x_3 – присутствие качественного результата поиска.

Показателями, определяющими наличие описанных критериев, являются следующие значения:

1. Формулировка запросов (абсолютное количество, относительное количество релевантных).

2. Работа с выданной поисковиком информацией (к каким по счету результатам поиска (строкам) происходит обращение, есть ли переход ко второй и последующим страницам результатов, подряд или выборочно).

3. Цепочки: длина, количество возвратов.

4. Количество просмотренных страниц: всего, релевантных, нерелевантных, относительное количество релевантных.

5. Время просмотра страницы: максимальное, минимальное, общее среднее, среднее по релевантным, среднее по нерелевантным, «разброс» во времени просмотра отдельных страниц (или частотное распределение).

6. На какой минуте поиска появляются нерелевантные страницы.

7. По каждому показателю в соотношении со средним по выборке: наличие завышенных (превышающих среднее + среднеквадратичное отклонение) или заниженных показателей.

На основе представленного описания проблемы и построенных сценариев наличия или отсутствия угроз разработаем подход идентификации неявных угроз на основе анализа активности пользователя в интернет-пространстве.

2. Подход идентификации неявных угроз на основе анализа активности пользователя в интернет-пространстве. Рассмотрим описанные в предыдущем пункте сценарии «отдаление», «сканирование» и «спонтанность» как слагаемые обобщенного критерия, однозначно указывающего на недопустимую форму организации работы пользователя (обучающегося) в интернет-пространстве, назовем эту форму организации условно «неэффективным сценарием». Опасность здесь представляет случайный выход пользователя на вредоносный контент. Для построения вектора признаков идентификации «неэффективного сценария» рассмотрим в табл. 1 описанные ранее критерии. Наличие признака обозначим «1», отсутствие – «0».

Таблица 1

Построение вектора признаков для угрозы «неэффективный сценарий»

	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}	y_{25}	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}	y_{35}
Отдаление	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сканирование	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Спонтанность	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Общие векторы признаков																	
Max угроза	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
Min угроза	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1

В таком виде вектор признаков для идентификации возможной угрозы нежелательной формы организации активности пользователя в интернет-пространстве является суммой векторов наборов критериев трех рассмотренных неблагоприятных сценариев (рис. 1)



Рис. 1. Слагаемые вектора признаков «неэффективного сценария»

Обозначим сценарии «отдаление», «сканирование» и «спонтанность» через Q_1, Q_2, Q_3 соответственно. Таким образом, обобщенный критерий имеет следующий вид:

$$Q_{int} = \tau_1 Q_1 + \tau_2 Q_2 + \tau_3 Q_3 \rightarrow \max, \quad (1)$$

где τ_i – вес каждого из рассмотренных сценариев, заданный на основе экспертных оценок.

Рассмотрим теперь возможный «эффективный сценарий», как форму организации активности пользователя (обучающегося) в интернет-пространстве. За основу данной формы организации активности взят описанный в предыдущем пункте сценарий «эффективность», основными критериями которого приняты: x_1 – просмотр релевантных страниц; x_2 – существенное различие между временем нахождения на страницах; x_3 – присутствие качественного результата поиска.

Будем утверждать, что даже в случае максимально эффективного сценария активности пользователя в интернет-пространстве, чему соответствует расширенный вектор признаков (табл. 2), остается возможность появления неявных угроз системного характера, имеющих значительный уровень и масштаб опасности для всего общества.

Таблица 2

Максимально эффективный сценарий активности пользователя в Интернет-пространстве

x_1	x_2	x_3	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}	y_{25}	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}	y_{35}
1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1

Применение знаний, хранящихся в интернет-пространстве, для реализации преступных намерений несет в себе значительную угрозу. Выявление злого умысла в действиях пользователей глобальной информационной сети не всегда является тривиальной задачей. Отработанные технологии анализа контекста интересов пользователя дают сбой в случае осторожных грамотных действий злоумышленников, которые в явном виде не демонстрируют преследуемой ими цели.

Например, миллионы людей интересуются историей огнестрельного оружия, но только несколько из них могут интересоваться этой темой в преступных целях. Именно анализ семантики поисковой деятельности данных субъектов позволит выявить и классифицировать детали их интересов, которые дадут основания дифференцировать этих лиц от остального множества людей, интересующихся данной темой без злого умысла. Также возможен вариант присутствия пока еще несформировавшейся преступной личности, информационные интересы которой в будущем могут привести к печальным последствиям потери обществом законопослушного гражданина.

Оба эти случая простой анализ контекста интересов поиска информации может вовремя не идентифицировать, так как будут отсутствовать явные признаки преступных намерений. Единственным отличительным системно значимым признаком таких видов деятельности в среде Интернет будет наличие сценария высокой эффективности действий пользователя. Данные субъекты будут отличаться стабильной тематической привязкой (релевантностью) изучаемых материалов, длительным временем нахождения на определенных страницах поиска, что позволит им получить качественный результат проанализированного материала.

Этот признак, конечно, не указывает на преступные намерения или нежелательную траекторию интересов, но критерием угрозы в данном случае будет являться время, которое данные субъекты уделяют изучению тем, имеющих, с одной стороны, признаки двойного назначения, а, с другой – напрямую не связаны с профессиональной или образовательной деятельностью субъекта. Таким образом, авторы предлагают ввести в рассмотрение еще два следующих критерия: x_4 – изучение контента с информацией двойного назначения; x_5 – изучение контента с информацией, не имеющей прямого отношения к профессиональной или образовательной деятельности субъекта (табл. 3).

Таблица 3

Идентификация угроз при эффективном сценарии

№		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	Отсутствие угроз	1	1	1	0	0
2		1	1	1	0	1
3		1	1	1	1	0
4	Угроза	1	1	1	1	1

Первые три варианта этого сегмента вектора признаков имеют незначительный вес при идентификации возможных угроз, так как в первом варианте дополнительные признаки x_4 и x_5 вообще отсутствуют, во втором варианте нет сведений об изучении информации двойного назначения, а в третьем – интерес может быть связан с непосредственной профессиональной или образовательной деятельностью субъекта.

Наибольшее опасение должны вызвать максимальные значения критериев-признаков x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 . Максимальные значения данного критерия указывают на

одержимость и должны стать причиной более детального рассмотрения перспектив применения полученной субъектом информации в результате проведенного им поиска. В дальнейшем решение задачи классификации указанной информации, проведенной на основе методов оценки семантической близости (рис. 2), позволит исключить наличие угроз, например, в случае если речь идет о хобби человека, либо подтвердить опасения, что потребует определенного вмешательства.

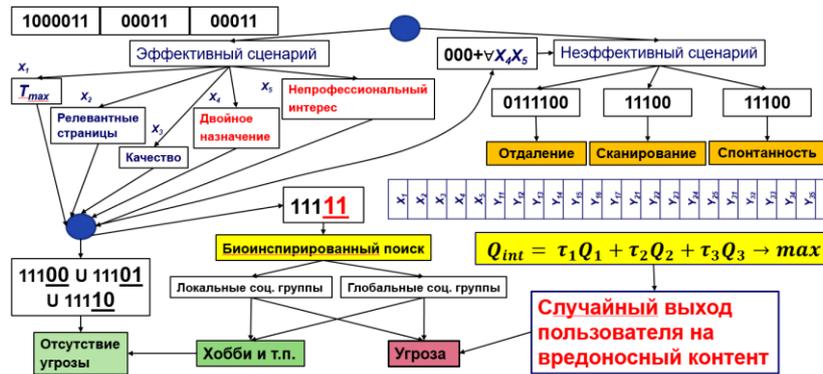


Рис. 2. Схема подхода идентификации неявных угроз на основе анализа активности пользователя

Идентификацию угроз в описанных сценариях предлагается проводить на основе комбинированных биологически правдоподобных методов машинного обучения. На первом этапе поиска необходимо исследовать локальные и глобальные социальные группы (рис. 2). Такой поиск эффективно выполняется на основе роевых методов с децентрализованной схемой управления, позволяющих провести максимальное количество локальных сравнений векторов признаков с достаточным количеством – глобальных (например, CS), на втором уровне для поиска в информационных пространствах, отобранных по описанным сценариям и результатам простого контекстного поиска субъектов, используются роевые методы с наиболее последовательными механизмами поиска, необходимыми для подтверждения или опровержения наличия угроз в рассматриваемом контенте (например, BFO).

3. Разработка биоинспирированного алгоритма идентификации неявных угроз. Метод расширенного интеллекта (AUI) в контексте интеллектуального анализа использует концепцию, в которой традиционный искусственный интеллект (ИИ) поддерживает принятие решений, обучение или планирование. Вместо группы из двух или более учащихя, есть конечный пользователь и машина, которые совместно строят решение для конкретной проблемы контекста, общаясь через среду машинного обучения. Роль конечного пользователя заключается в предоставлении набора данных для алгоритма машинного обучения, который строит модель из набора данных. Роль конечного пользователя активна, и целью является не просто эксперимент с такими параметрами, как количество кластеров или скорость обучения, которые влияют на то, как данный алгоритм строит модель. Вместо этого цель состоит в том, чтобы настроить саму модель.

Основываясь на информационных изменениях конечного пользователя, компьютер перестраивает новую модель, используя полученные знания и данные, которые он приобрел. Процесс повторяется итерационно, и на каждом этапе цикла вырабатываются новые знания о контексте и изучаемом явлении.

Процесс АUI приводит к циклическому процессу обнаружения знаний как конечного пользователя, так и компьютера. Вместе эти результаты углубляют предыдущие знания конечного пользователя о контексте, в котором были собраны наборы данных.

Чтобы расширить область применения метода АUI из легко интерпретируемых деревьев решений, необходимо также разработать новые вычислительные методы для обслуживания различных задач интеллектуального анализа данных в современных интеллектуальных средах обучения. Алгоритм нейронные *N-Tree* для образовательного кластерного анализа представляет собой сбалансированное двоичное дерево, каждый узел которого содержит точечный вектор. Длина точечного вектора равна длине входных векторов. Нейронное *N*-дерево строится рекурсивно путем инициализации каждого точечного вектора случайными числами в диапазоне от минимального значения до максимального значения, встречающегося в анализируемом наборе данных. Сначала алгоритм берет число кластеров *n* и создает вектор, длина которого $n \times 2 - 1$ со случайными точечными векторами. Во-вторых, из созданного вектора строится сбалансированное двоичное дерево.

После построения нейронного *N*-дерева со случайными точечными векторами каждый конечный узел индексируется путем обхода нейронного *N*-дерева с обходом по порядку и назначения терминальных узлов с другим индексом. Обучение модифицированного алгоритма делится на три фазы. На первом этапе обучения нейронного *N-Tree* производится на основе предложенного авторами биоинспирированного алгоритма.

Для анализа пользовательской активности в сети Интернет был разработан биоинспирированный алгоритм сбора и анализа данных о посещённых пользователями информационных ресурсах. В качестве биоинспирированного алгоритма авторами предложен модифицированный алгоритм капли воды. Опишем более подробно предложенный алгоритм на примере поведенческой модели в живой природе.

В данном алгоритме моделируется несколько искусственных капель воды, которые зависят друг от друга, способны менять свое окружение таким образом, что находят оптимальный путь по пути наименьшего сопротивления. Данный алгоритм является конструктивным популяционно-ориентированным алгоритмом оптимизации.

Для каждой капли воды *k* применимы следующие показатели: количество грунта *soil_k*; скорость передвижения *vel_k*. Среда нахождения капли воды дискретна. Каждая *k* представляет собой граф (*N*, *U*) с набором узлов *N* и множеством ребер *U*. Данный граф является средой для капель воды и их потока по ребрам графа. Каждая капля воды начинает строить свое решение постепенно, передвигаясь между узлами графа до тех пор, пока не завершится ее решение. Каждая итерация завершается, когда все капли воды завершили свой проход по ребрам графа. После каждой итерации вычисляется лучшее решение *F* в текущей итерации. После определения лучших решений на каждой итерации *F*, определяется набор лучших решений *Z* с начала работы алгоритма капли воды. В процессе перемещения капли собираются в поток (рис. 3).

Каждая капля воды принадлежит узлу *i* и должна из всех узлов *N* достичь конечного узла *j*. Вероятность попадания в конечный узел *j* вычисляется следующим образом [21]:

$$P_i^k(j) = \frac{f(\text{soil}(i,j))}{\sum_{l \in v_{visited}^k} f(\text{soil}(i,l))}, \quad (2)$$

где

$$f(\text{soil}(i,j)) = \frac{1}{\varepsilon + g(\text{soil}(i,j))}. \quad (3)$$



Рис. 3. Процесс обработки решения

Числовая постоянная $\epsilon \geq 0$. Данное ограничение вводится для исключения деления на 0. Функция $g(\text{soil}(i,j))$ используется для обозначения наличия грунта (i, j), которая обозначает весь грунт на пути между узлами i и j :

$$g(\text{soil}(i,j)) = \begin{cases} \text{soil}(i,j) & \text{if } \min_{v \in V^k \text{ visited}} (\text{soil}(i,l)) \geq 0 \\ \text{soil}(i,j) - \min_{v \in V^k \text{ visited}} (\text{soil}(i,l)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

По формуле 5 вычислим новую скорость:

$$vel^k(t+1) = vel^k(t) + \frac{a_v}{b_v + c_v \text{soil}(i,j)}, \quad (5)$$

где a_v , b_v и c_v являются наименьшими положительными значениями, чтобы избежать деления на нуль, а $\text{soil}(i,j)$ определяет количество грунта от узла i к узлу j .

Отметим основные принципы поведения капли воды [22]:

- ◆ предпочитает путь с меньшим количеством почвы, чем пути с большим количеством почвы;
- ◆ предпочитает более легкий путь, когда приходится выбирать между несколькими маршрутами, которые существуют на пути от источника к месту назначения;
- ◆ легкость или твердость пути определяется количеством почвы на этом пути. Путь с большим уровнем почвы считается трудным путем, тогда как путь с меньшим уровнем почвы считается легким путем.

В данной работе предлагается увеличение скорости расчетов по формуле 4, где показатель soil экспоненциален 2 [21].

- 1: Input: Постановка задачи.
- 2: Output: Оптимальное решение.
- 3: Формулировка проблемы оптимизации как связанного графа.
- 4: Инициализация постоянных параметров.
- 5: Repeat
- 6: Инициализация динамических параметров.
- 7: Распределите капли воды в случайном порядке по построенному графу.
- 8: Обновление списка посещенных узлов ($V_{visited}^k$), включая исходный узел
- 9: Repeat
- 10: For $k = 1$ to i do
- 11: i = исходный узел для капли k .
- 12: j = следующий выбранный узел, который не противоречит ограничениям.
- 13: Движение капли k от узла i к узлу j .
- 14: Обновление следующих параметров:
 - a) Скорость капли k .
 - b) Количество грунта в капле k .
 - c) Количество грунта на выходе e_{ij} .
- 15: End for
- 16: Until Не удовлетворены условия прекращения.
- 17: Выбор лучшего решения в этом цикле (T^{IB}).
- 18: Обновление значения содержания грунта на выходе для всех показателей (T^{IB}).
- 19: Обновление лучшего решения среди всех циклов (T^{TB}).
- 20: If (качество $T^{TB} <$ качества T^{IB}).
- 21: $T^{TB} = T^{IB}$.
- 22: Until не найдено решение, удовлетворяющее всем требованиям.
- 23: Return (T^{TB}).

На втором этапе обучения нейронного *N-Tree* происходит поиск наилучшего совпадающего блока осуществляется из терминальных узлов путем сравнения вектора произвольной выборки с каждым терминальным узлом.

На третьем этапе обучение начинается с корневого узла, и следующий узел входного вектора является либо левым, либо правым дочерним элементом текущего узла, в зависимости от расстояния входного вектора и точек. Правого и левого потомка (выбран узел с наименьшим). Таким образом, входной вектор проходит через нейронное *N*-дерево от корневого узла к одному из терминальных узлов. После каждого шага вычисляется порядок уровней, начиная с текущего узла (кроме корневого узла), и обновляются точки поддерева порядка уровней, начиная с текущего узла. Целью процесса прямого обучения является корректировка путей для входных векторов для процесса кластерного анализа.

4. Программное приложение и экспериментальные исследования. С целью апробации разработанных методов и алгоритмов анализа пользовательской активности в сети Интернет была разработана подсистема сбора и анализа данных о посещенных пользователями информационных ресурсов. Подсистема включает в себя два компонента: клиентский модуль, реализованный в виде расширения для браузера и серверного модуля, который реализует функции аутентификации пользователей, сбора информации, переданной с клиентского модуля, первичной обработки поступившей информации, ее хранения, а также идентификации угроз в случае эффективного сценария. На данном этапе реализации системы любой сценарий считается эффективным.

Функции клиентского модуля достаточно просты и заключаются исключительно в сборе информации и метаданных каждой загруженной пользователем страницы и передачи данной информации на серверный модуль.

Серверный модуль реализует более сложные функции. Работа модуля заключается в приеме информации от клиентского модуля, разбор контента страницы на термы, фильтрация через табу-лист, нормализация термов, подсчет повторений данного терма на странице, сохранение результатов в базу данных. На данном этапе реализации системы позволяет работать только с существительными. Табу-лист представляет собой список термов, которые потенциально не несут никакой смысловой нагрузки, но часто встречаются в контенте страниц. Исследования показали, что, например, как минимум один их термов, таких как: «комментарий», «предпросмотр», «запрос», входят в 10 наиболее часто встречающихся термов для 100% пользователей. Это затрудняет процесс распознавания угроз при расчетах. Поэтому использование фильтра по табу-списку на ранних этапах обработки входящей информации позволяет сократить пространство будущего поиска, сократить ресурсы на хранение информации и повысить точность определения угрозы.

В качестве эталона для определения угроз был использован «Список товаров и технологий двойного назначения, которые могут быть использованы при создании вооружений и военной техники и в отношении которых осуществляется экспортный контроль» (далее «целевой список»). С помощью разработанной подсистемы из данного целевого списка были выделены термы. В ходе исследований было также определено, что термы из целевого списка часто используются со «словами спутниками», которые не входят в целевой список, но могут также влиять на оценку угрозы. Поэтому было предложено разбить термы из целевого списка на категории, в соответствии с категориями целевого списка (перечислить) и включить в каждую категорию термы вместе с их спутниками. Стоит отметить, что терм может быть использован в одной и более категориях. Начальное разбиение на категории выполнялось автоматически, на основе данных их из целевого списка. Дальнейшее наполнение категорий термами-спутниками реализовывалось в виде опроса экспертов. Экспертам задавался вопрос: «К какой из представленных категории можно отнести следующий терм?». В качестве терма в общем случае выбирается произвольный терм из базы данных системы. Однако такой подход показал свою неэффективность из-за большого количества термов. Поэтому список термов, представляемых экспертам, задается заранее администратором системы в зависимости от текущих потребностей. Администратор имеет возможность изменять список термов для экспертизы в любое время.

Для расчета угрозы, исходящей от пользователя в системе применяются, методы АИ, в частности нейросетевой подход. Для заданного пользователя на входы нейронной сети подаются значения рисков каждой категории системы R_k , $R_k \in [0, 1]$, $k \in [1, K]$, где K – общее количество категорий.

Для расчета рисков каждой категории была применена следующая формула:

$$R_k = \frac{\sum_{x=1}^{|X^k|} (\arctg(x * \alpha (t_e - t_b)) * \pi * \beta)}{|X^k|}, \quad (6)$$

где X^k – множество термов, принадлежащих категории k ; α , β – поправочные коэффициенты. Эмпирически были выявлены следующие значения: $\alpha = 0.05$; $\beta = 0.2$.

Для начального обучения нейронной сети были сгенерированы наборы данных, имитирующие пользовательскую активность с заданными характеристиками. Для обучения сети, работающей с 10 категориями в общей сложности, было сгенерировано 50000 примеров для обучающей выборки и 50000 примеров для тестовой выборки. После обучения результаты тестов показали, что среднее отклонение значений результатов сети от эталонных результатов составило 0.651%. На рисунке 4 графически представлено распределение ошибок. Данное отклонение является приемлемым, так как ответ нейронной сети интерпретируется как бинарный сиг-

нал присутствия или отсутствия угрозы. Для подтверждения необходимости и достаточности количества обучающих примеров были проведены следующие обучающие и тестовые серии (табл. 4).

Таблица 4

Обучающие и тестовые выборки

Размер обучающей выборки (тыс.)	Размер тестовой выборки (тыс.)	Средняя ошибка (%)
20	50	21.38
40	50	2.19
50	50	0.66
60	50	0.65
80	50	0.64
100	50	0.63

Результаты экспериментальных серий приведены на рисунке 5. На данном рисунке можно видеть, что после **50000** обучающих примеров точность сети повышается незначительно, тогда так временные затраты на обучение имеют квадратичный характер.

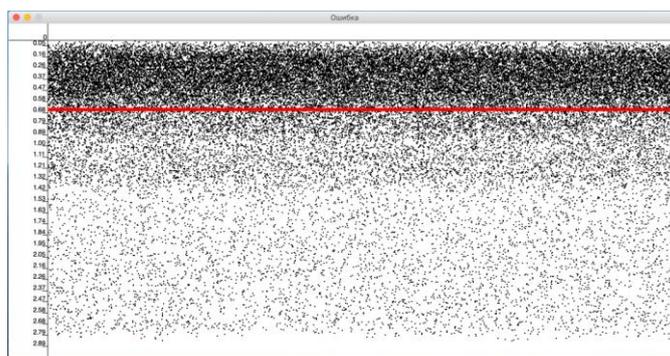


Рис. 4. Распределение ошибок

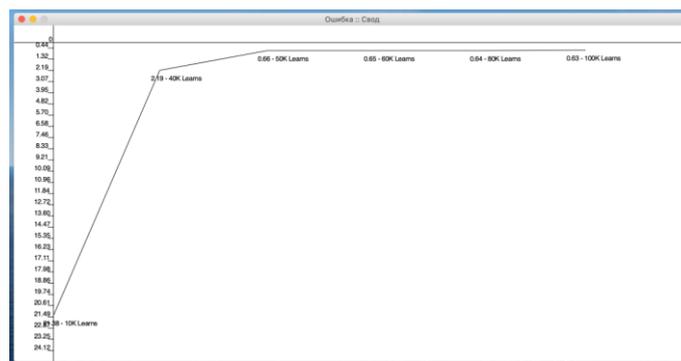


Рис. 5. Результаты тестирования обученной нейронной сети

Предложенный подход позволяет анализировать в реальном времени активность пользователя в сети Интернет и оценивать риски его поведения в контексте анализируемой проблемы на основе внедрения заранее обученной нейронной сети. За счет того, что нейронная сеть работает с категориями, а не с самими терминами не

требуется переобучения нейронной сети при изменении состава категорий за счет обновления перераспределения экспертных ответов по назначению термов и их сателлитов. Недостатком предложенного подхода является невозможность расширения количества категорий без переобучения сети, а также невозможности получения объяснений результатов о наличии или отсутствии рисков. На данном этапе разработки все случаи, квалифицированные как опасные (с высоким уровнем риска) требуют анализа человеком-экспертом.

Заключение. Проведенные в представленной работе исследования направлены на решение проблемы идентификации неявных информационных угроз поисковой деятельности пользователя в Интернет-пространстве на основе анализа его активности в процессе данного взаимодействия. Полученные в ходе работы результаты направлены на повышение эффективности интеллектуальных систем-ассистентов, обеспечивающих безопасность и эффективность деятельности пользователя в Интернет-пространстве, на основе биологически правдоподобных методов машинного обучения.

При изучении возможных явных и неявных информационных угроз поисковой деятельности авторами были построены векторы признаков, необходимые для проведения процедур классификации сценариев поведения пользователя и следующих за ними событий. Определены критерии оценки неэффективных и эффективного сценариев поиска, разработана система показателей для определения значений данных критериев.

Предложен подход идентификации описанных угроз с учетом заданных критериев оценки различных сценариев поведения пользователя в глобальном информационном пространстве. Разработан модифицированный биоинспирированный алгоритм капли воды для сбора и анализа данных о посещенных пользователями информационных ресурсах. Данный алгоритм является конструктивным популяционно-ориентированным алгоритмом оптимизации.

Для проведения экспериментальных исследований была создана подсистема сбора и анализа данных о посещенных пользователями информационных ресурсов. Для разработки системы использован нейросетевой подход. Паттерном определения угроз использован «Список товаров и технологий двойного назначения, которые могут быть использованы при создании вооружений и военной техники и в отношении которых осуществляется экспортный контроль».

Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность предложенного подхода идентификации информационных угроз, который позволяет анализировать в реальном времени активность пользователя в сети Интернет и оценивать риски его поведения в контексте анализируемой проблемы на основе внедрения заранее обученной нейронной сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лызь Н.А., Истратова О.Н.* Информационно-образовательная деятельность в интернет-пространстве: виды, факторы, риски // Педагогика. – 2019. – № 4. – С. 16-26.
2. *Раицкая Л.К.* Влияние интернета на личность студента // Коммуникация в современном поликультурном мире: диалог культур: Ежегодный сборник научных трудов / отв. ред. Т.А. Барановская. – М., 2014. – С. 429-441.
3. *Salehi S., Du J. T., Ashman H.* Use of Web search engines and personalisation in information searching for educational purposes // Information Research. – 2018. – Vol. 23, No. 2. – Режим доступа: <http://informationr.net/ir/23-2/paper788.html>.
4. *Cen Y., Gan L., Bai C.* Reinforcement learning in information searching // Information Research. – 2013. – Vol. 18, Issue 1. – Режим доступа: <http://informationr.net/ir/18-1/paper569.html#.X199magzaUk>.

5. Горюнова Л.Н., Круглова М.А., Провоторова Я.А., Цыган В.Н. Стратегии информационного поиска и их взаимосвязь с личностными особенностями студентов // Петербургский психологический журнал. – 2013. – № 2. – С. 1-15.
6. Lin C.-C., Tsai C.-C. A navigation flow map method of representing students' searching behaviors and strategies on the web, with relation to searching outcomes // Cyberpsychology and Behavior. – 2007. – Vol. 10, Issue 5. – P. 689-695. – DOI: 10.1089/cpb.2007.9969.
7. Walraven A., Brand-Gruwel S., Boshuizen H.P. Information-problem solving: A review of problems students encounter and instructional solutions // Computers in Human Behavior. – 2008. – Vol. 24, Issue 3. – P. 623-648.
8. Поршнев А.В. Психологические аспекты эффективного использования интернета в образовательных целях // Культурно-историческая психология. – 2008. – № 3. – С. 43-50.
9. Лозицкий В.Л. Феномен клипового мышления и информационно-коммуникационные технологии в высшем профессиональном образовании // Научные труды Республиканского института высшей школы. – 2016. – № 16-2. – С. 375-380.
10. Scholl P., Benz B.F., Böhnstedt D., Rensing C., Schmitz B., Steinmetz R. Implementation and evaluation of a tool for setting goals in self-regulated learning with Web resources / In U. Cress & V. Dimitrova (Eds.), Lecture Notes in Computer Science. EC-TEL 2009, LNCS 5794. – Berlin: Springer-Verlag, 2009. – P. 521-534.
11. Ioannidis K., Treder M.S., Chamberlain S.R., Kiraly F., Redden S.A., Stein D.J., Lochner C., Grant J.E. Problematic internet use as an age-related multifaceted problem: Evidence from a two-site survey // Addictive Behaviors. – 2018. – Vol. 81. – P. 157-166.
12. Янг К.С. Диагноз – интернет-зависимость // Мир Интернет. – 2000. – № 2. – С. 24-29.
13. Горюнова Л.Н. Развитие моделей информационного поведения с позиции обобщенной психологической теории деятельности // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2008. – Сер. 12. – Вып. 3. – С. 439-444.
14. Ho L.-A., Kuo T.-H., Lin B. The mediating effect of website quality on Internet searching behavior // Computers in Human Behavior. – 2012. – Vol. 28, Issue 3. – P. 840-848. – DOI: 10.1016/j.chb.2011.11.024.
15. Ek S. Factors relating to problems experienced in information seeking and use: findings from a cross-sectional population study in Finland // Information Research. – 2017. – Vol. 22, No. 4. – P. 775. – Режим доступа: <http://informationr.net/ir/22-4/paper775.html>.
16. Ford N., Miller D., Moss N. Web search strategies and approaches to studying // Journal of the American Society for Information Science and Technology. – 2003. – Vol. 54, Issue 6. – P. 473-489. – DOI: 10.1002/asi.10233.
17. Брумштейн Ю.М., Васьковский Е.Ю., Куаникалиев Т.Х. Поиск информации в Интернете: анализ влияющих факторов и моделей поведения пользователей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 1 (196). – С. 50-55.
18. Николенко С.И., Фишков А.А. Обзор моделей поведения пользователей для задачи ранжирования результатов поиска // Тр. СПИИРАН. – 2012. – № 3 (22). – С. 139-175.
19. Liu C.-C., Chang C.-J., Tseng J.-M. The effect of recommendation systems on internet-based learning for different learners: a data mining analysis // British Journal of Educational Technology. – 2013. – Vol. 44, No. 5. – P. 758-773. – <https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2012.01376.x>.
20. Бова В.В., Кравченко Ю.А., Кулиев Э.В., Курейчик В.В. Моделирование поведения субъекта в Интернет-сервисах на основе модифицированного алгоритма бактериальной оптимизации // Информационные технологии. – 2019. – Т. 25, № 7. – С. 397-404. – DOI: 10.17587/it.25.397-404.
21. Пантелюк Е.А., Кравченко Ю.А., Цырульникова Э.С. Решение задачи управления знаниями на основе алгоритма умной капли воды // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2017. – № 1. – С. 59-67.
22. Смирнова О.С., Богорадникова А.В., Блинов М.Ю. Описание роевых алгоритмов, инспирированных неживой природой и бактериями, для использования в онтологической модели // International Journal of Open Information Technologies. – 2015. – Vol. 3, No. 12. – P. 28-37. – ISSN: 2307-8162.

REFERENCES

1. Lyz' N.A., Istratova O.N. Informatsionno-obrazovatel'naya deyatel'nost' v internet-prostranstve: vidy, faktory, riski [Information and educational activities in the Internet space: types, factors, risks], *Pedagogika* [Pedagogy], 2019, No. 4, pp. 16-26.
2. Rait'skaya L.K. Vliyaniye interneta na lichnost' studenta [Influence of the Internet on the student's personality], *Kommunikatsiya v sovremennom polikul'turnom mire: dialog kul'tur: Ezhegodnyy sbornik nauchnykh trudov* [Communication in the modern multicultural world: a dialogue of cultures: Annual collection of scientific papers], ed. by T.A. Baranovskaya. Moscow, 2014, pp. 429-441.
3. Salehi S., Du J. T., Ashman H. Use of Web search engines and personalisation in information searching for educational purposes, *Information Research*, 2018, Vol. 23, No. 2. Available at: <http://informationr.net/ir/23-2/paper788.html>.
4. Cen Y., Gan L., Bai C. Reinforcement learning in information searching, *Information Research*, 2013, Vol. 18, Issue 1. Available at: <http://informationr.net/ir/18-1/paper569.html#X199magzaUk>.
5. Goryunova L.N., Kruglova M.A., Provotorova Ya.A., Tsygan V.N. Strategii informatsionnogo poiska i ikh vzaimosvyaz' s lichnostnymi osobennostyami studentov [Information search strategies and their relationship to students' personal characteristics], *Peterburgskiy psikhologicheskii zhurnal* [Petersburg psychological journal], 2013, No. 2, pp. 1-15.
6. Lin C.-C., Tsai C.-C. A navigation flow map method of representing students' searching behaviors and strategies on the web, with relation to searching outcomes, *Cyberpsychology and Behavior*, 2007, Vol. 10, Issue 5, pp. 689-695. DOI: 10.1089/cpb.2007.9969.
7. Walraven A., Brand-Gruwel S., Boshuizen H.P. Information-problem solving: A review of problems students encounter and instructional solutions, *Computers in Human Behavior*, 2008, Vol. 24, Issue 3, pp. 623-648.
8. Porshnev A.V. Psikhologicheskie aspekty effektivnogo ispol'zovaniya interneta v obrazovatel'nykh tselyakh [Psychological aspects of effective use of the Internet for educational purposes], *Kul'turno-istoricheskaya psikhologiya* [Cultural and historical psychology], 2008, No. 3, pp. 43-50.
9. Lozitskiy V.L. Fenomen klipovogo myshleniya i informatsionno-kommunikatsionnye tekhnologii v vysshem professional'nom obrazovanii [The phenomenon of clip thinking and information and communication technologies in higher professional education], *Nauchnye trudy Respublikanskogo instituta vysshey shkoly* [Scientific works of the Republican Institute of higher education], 2016, No. 16-2, pp. 375-380.
10. Scholl P., Benz B.F., Böhnstedt D., Rensing C., Schmitz B., Steinmetz R. Implementation and evaluation of a tool for setting goals in self-regulated learning with Web resources, In U. Cress & V. Dimitrova (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science. EC-TEL 2009, LNCS 5794*. Berlin: Springer-Verlag, 2009, pp. 521-534.
11. Ioannidis K., Treder M.S., Chamberlain S.R., Kiraly F., Redden S.A., Stein D.J., Lochner C. Grant J.E. Problematic internet use as an age-related multifaceted problem: Evidence from a two-site survey, *Addictive Behaviors*, 2018, Vol. 81, pp. 157-166.
12. Yang K.S. Diagnostika – internet-zavisimost' [Diagnosis-Internet addiction], *Mir Internet* [Mir Internet], 2000, No. 2, pp. 24-29.
13. Goryunova L.N. Razvitiye modeley informatsionnogo povedeniya s pozitsii obobshchennoy psikhologicheskoy teorii deyatel'nosti [Development of models of information behavior from the position of a generalized psychological theory of activity], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta* [Vestnik of Saint Petersburg University], 2008, Ser. 12, Issue 3, pp. 439-444.
14. Ho L.-A., Kuo T.-H., Lin B. The mediating effect of website quality on Internet searching behavior, *Computers in Human Behavior*, 2012, Vol. 28, Issue 3, pp. 840-848. DOI: 10.1016/j.chb.2011.11.024.
15. Ek S. Factors relating to problems experienced in information seeking and use: findings from a cross-sectional population study in Finland, *Information Research*, 2017, Vol. 22, No. 4, pp. 775. – Режим доступа: <http://informationr.net/ir/22-4/paper775.html>.
16. Ford N., Miller D., Moss N. Web search strategies and approaches to studying, *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2003,– Vol. 54, Issue 6, pp. 473-489. DOI: 10.1002/asi.10233.
17. Brumshteyn Yu.M., Vas'kovskiy E.Yu., Kuanshkaliev T.Kh. Poisk informatsii v Internete: analiz vliyayushchikh faktorov i modeley povedeniya pol'zovateley [Search for information on the Internet: analysis of influencing factors and user behavior patterns], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestiya Volgograd state technical University], 2017, No. 1 (196), pp. 50-55.

18. *Nikolenko S.I., Fishkov A.A.* Obzor modeley povedeniya pol'zovateley dlya zadachi ranzhirovaniya rezul'tatov poiska [Overview of user behavior models for the task of ranking search results], *Tr. SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2012, No. 3 (22), pp. 139-175.
19. *Liu C.-C., Chang C.-J., Tseng J.-M.* The effect of recommendation systems on internet-based learning for different learners: a data mining analysis, *British Journal of Educational Technology*, 2013, Vol. 44, No. 5, pp. 758-773. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2012.01376.x>.
20. *Bova V.V., Kravchenko Yu.A., Kuliev E.V., Kureychik V.V.* Modelirovanie povedeniya sub"ekta v Internet-servisakh na osnove modifitsirovannogo algoritma bakterial'noy optimizatsii [Modeling the behavior of a subject in Internet services based on a modified algorithm of bacterial optimization], *Informatsionnye tekhnologii [Information technologies]*, 2019, Vol. 25, No. 7, pp. 397-404. DOI: 10.17587/it.25.397-404.
21. *Pantelyuk E.A., Kravchenko Yu.A., Tsyru'nikova E.S.* Reshenie zadachi upravleniya znaniyami na osnove algoritma umnoy kapli vody [Solving the problem of knowledge management based on the smart water drop algorithm], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie [Informatics, computer engineering and engineering education]*, 2017, No. 1, pp. 59-67.
22. *Smirnova O.S., Bogoradnikova A.V., Blinov M.Yu.* Opisaniye roevykh algoritmov, inspirirovannykh nezhivoy prirodoy i bakteriyami, dlya ispol'zovaniya v ontologicheskoy modeli [Description of swarm algorithms inspired by inanimate nature and bacteria for use in an ontological model], *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, Vol. 3, No. 12, pp. 28-37. ISSN: 2307-8162.

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

Бова Виктория Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: vvbova@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Запорожец Дмитрий Юрьевич – e-mail: duzaporozhets@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

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

Кулиев Эльмар Валерьевич – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Курейчик Владимир Викторович – e-mail: vvkur@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой; профессор.

Лызь Наталья Александровна – e-mail: nlyz@sfedu.ru; тел.: 88634361586; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой; профессор.

Bova Victoria Victorovna – Southern Federal University; e-mail: vvbova@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

Zaporozhets Dmitrii Yurievich – e-mail: duzaporozhets@sfedu.ru; the department of computer aided design; associate professor.

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

Kuliev Elmar Valerievich – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; the department of computer aided design; associate professor.

Kureichik Vladimir Victorovich – e-mail: vvkur@sfedu.ru; the department of computer aided design; head of department; professor.

Lyz Nataliya Alexandrovna – e-mail: nlyz@sfedu.ru; phone: +78634361586; the department of psychology and life safety; head of department; professor.

Шивам Шендре, Шубханги Сапкал

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К БЕЗОПАСНОСТИ ШАБЛОНОВ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВЕН ПАЛЬЦА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Мы живем в современном обществе, где у нас достаточно много ресурсов и вычислительной мощности, единственной проблемой остается общественная безопасность. С развитием технологий личная информация становится все более не защищенной. Поэтому идентификация личности является актуальной проблемой. Существующие традиционные методы защиты личной информации оказались не надежными. Защита биометрических параметров является одной из наиболее важных проблем при обеспечении безопасности современной биометрической системы. Имеющиеся алгоритмы не дают адекватного решения этой проблемы. Поэтому мы попытались предложить метод, который будет более актуальным. В этой статье обсуждается гибридный метод биометрического распознавания вен на пальцах, основанный на методе глубокого обучения с использованием схем двоичной диаграммы принятия решений и нечетких обязательств. Предложенный гибридный метод состоит из четырех частей, а именно: извлечение признаков вены пальца, генерация защищенного шаблона, схема нечеткой фиксации, распознавание и принятие решения о структуре вен на пальце. Таким образом, имеются четыре модуля, при этом каждый модуль работает эффективно и дает точные результаты по всем базам данных.

Биометрия, безопасность шаблонов, гибрид, двоичная диаграмма принятия решений (BDD), схема нечетких обязательств, глубокое обучение и машинное обучение.

Shivam Shendre, Dr. Shubhangi Sapkal

A HYBRID APPROACH FOR DEEP LEARNING BASED FINGER VEIN BIOMETRICS TEMPLATE SECURITY

We are living in the today's society, where we have fairly-enough storage capacity and processing power, the only issue is with security. As, the technologies are evolving with faster rate, we are tend to grow the use of electronic devices rapidly in today's society, it started to flow or leakage of personal information around/across, which then leads to breach of this information. Now, personal or identical verification is key problem is being crucial. So whatever traditional methods we have for providing authentication or security those have proven inadequate to be unreliable and do not provide strong security. Biometric template protection is one of the most important issues in securing today's biometric system. We have many algorithms which don't give adequate solution for the same. So we tried to give a method which will reach to the expectations more satisfactorily and certainly to the extent required. In this paper we have discussed a hybrid method for finger vein biometric recognition based on deep learning approach using BDD and fuzzy commitment schemes. The proposed hybrid method consists of four parts, namely Finger vein feature extraction, BDD-based secure template generation, Fuzzy commitment scheme and ML based finger vein recognition and decision making. Thus it has four module and each module works efficiently and gives accurate results on all databases.

Biometric, template security, hybrid, binary decision diagram (BDD), fuzzy commitment scheme, deep learning and machine learning

Introduction. Biometric recognition is a reliable, robust, and convenient way for person authentication with growing concerns about security and terrorism, several large-scale biometric systems. Biometric systems are also being developed for many other applications such as banking (for ATM machines), the credit card industry, and physical access control. With the growing use of biometrics, there is a rising concern about the security and privacy of the biometric data itself. Since each person is claimed to have a unique biometric (e.g., fingerprint, face, and iris), if this biometric data is compromised,

it is impossible to have a replacement. Therefore, biometric data (template) security is one of the most important issues in developing a practical biometric system [2] (biometric template refers to the extracted biometric features stored in a central database or a smartcard). Edge computing, which refers to data processing at the edge devices of a network, has become the latest computing paradigm for reducing latency and achieving real-time services.

Every second, massive amounts of data are created by billions of Internet of Things (IoT) devices. Although cloud servers own super-powerful service ends and have a fast data processing speed, data transportation has become a bottleneck. Also, unnecessary bandwidth costs are high if tremendous volumes of raw data are exchanged between end users and the cloud server [1]. Authentication is the act of confirming the truth of an attribute of a datum or entity. The process of identifying an individual usually based on a username and password. There are different types of techniques used for authentication like personal identification number (PIN), Key smartcards, Deoxyribonucleic acid (DNA), Face recognition, fingerprint, iris ,voice recognition etc. now a day these methods do not provide adequately strong security. Hence, personal verification methods that utilize a person biometric trait has been intensively investigated and developed to overcome the disadvantage of the traditional methods. Biometric recognition (biometrics) refers to automatic recognition of individual based on their physiological and behavioral characteristics. Many biometric such as face, fingerprint, is and voice have been developed [19].

There are many applications of edge biometrics with AI. We give three examples in [1]. 1) Automated surveillance: Smart cameras with built-in AI capabilities can figure out whom they are see inland track specific individuals; 2) Gait identification: By using specific sensors on a mobile device, a person's way of walking can be identified by AI algorithms. With rapid evolution of on-device AI algorithms, higher identification accuracy using gait will be achievable in the foreseeable future. 3) Voice authentication/assistant: Nowadays, smart phones with voice assistant powered by AI, e.g., Siri on iPhone, are commonplace. Vein patterns are the vast network of blood vessels underneath a person's skin. They are unique to each individual and are stable over long period time. It provides "aliveness" detection as it senses the flow of blood in the vessels. Even twins are said to have different finger vein patterns. It is used in hospitals, law enforcement, military facilities and other applications that require very high levels of security. Vein recognition biometric devices can also be used for PC login, bank, ATM identification, verification, and many other applications such as opening car doors. Vein recognition biometrics is a particularly impressive and promising technology because it requires only a single-chip design, meaning that the units are relatively small and cheap. Using a light transmission technique, the structure of the vein pattern can be detected, captured and subsequently verified [20].

Although biometric security for non-machine learning based finger vein recognition systems is an established topic; there is a major security loophole in the existing machine/deep learning based finger vein identification systems, which do not protect raw finger-vein templates. This security issue is particularly crucial given the fact that artificial neural networks for image classification are invertible. A novel biometric template protection algorithm using the binary decision diagram (BDD) [4] for deep learning based finger vein biometric systems. Specifically, instead of using raw finger-vein templates for biometric recognition, a transformed version of the raw finger-vein template is created by a noninvertible transformation based on the BDD. The transformed version is further processed by a multilayer extreme learning machine (ML-ELM) for training and classification. Thanks to template protection, the deep learning based privacy preserving finger vein recognition system named BDD-ML-ELM has heightened security [1].

In this paper, we investigate a methods on non-deep learning base and deep learning based finger vein authentication and recognition and propose new hybrid algorithm with high performance and optimum accuracy. The rest of the paper is organized as follows. Section IV describes the proposed system.

Related work. Finger-vein based biometric recognition has come in use more drastically in the past few years. Finger-vein recognition is widely divided into two types, (1) Non-machine learning based and (2) Machine-learning based.

In [1, 3], Miura et al. proposed to use repeated line tracking to extract finger-vein features from an unclear finger-vein image. The line tracking operation starts from different positions and is repeated multiple times. In order to handle challenges brought by noise and deformation, in [5], Gupta et al., proposed a low-cost finger-vein sensor based on a single camera that can capture finger-vein images from dorsal and ventral parts of the finger with high quality, system consists of multiple near-infrared light sources to illuminate the finger from both sides and top, coupled with the custom designed physical structure to facilitate high reflectance of the emitted light and distribute the light uniformly on the finger to capture good-quality dorsal and ventral finger-vein patterns. Extensive experiments are carried out on the data captured using the developed sensor and benchmarked the performance with eight different state-of-the-art (SOTA) algorithms.

In [6], Xi et al. proposed a novel discriminative binary codes (DBC) learning method for finger vein recognition, in which the subject relation graph is built to capture correlations among subjects and binary templates are transformed to describe vein characteristics of subjects then graph transform is formulated into an optimization problem, in which the distance between templates from different subjects is maximized and templates provide maximum information about subjects and finally supervised information for training instances is provided by the obtained binary templates, and SVMs are trained as the code learner for each bit. In [7], Lu et al. proposed a system for finger vein recognition, including an anatomy structure analysis-based vein extraction algorithm and an integration matching strategy in which pattern is extracted from the orientation map-guided curvature and it is further refined to obtain a network finally the similarity matches by elastic matching and recomputed by integrating the overlap degree of veins. In [8], Kauba et al. made a strategyie the fusion of several feature extractors' outputs, and the study involving different feature extraction techniques (maximum curvature, repeated line tracking, wide line detector, ...) and different fusion techniques (majority voting, weighted average, STAPLE, ...) on multiple finger vein datasets.

In [9], Liu and Kim defined an efficient finger-vein extraction algorithm based on random forest training and regression with efficient local binary pattern feature. They achieved state-of-the-art finger vein recognition by integrating the vein pattern matching method, which is robust to finger misalignment. In [10], Van et al., discussed method to improve the performance of finger vein identification systems includes three steps first, images of finger veins are cropped to have regions of interest (ROI's) then, local invariant orientation features are extracted by using MFRAT and then, Grid PCA is applied to further remove redundant information and form a discriminant representation finally, the enlarging training set (ETS) based matching technique is used to overcome the translations. In [11], Banerjee et al. developed a finger vein based biometric authentication system by combining three algorithms—an image enhancement algorithm, a registration algorithm based on mutual information and affine transformation, and a matching algorithm based on correlation coefficient.

As we are going work on deep learning based approach, our main focus or aim to AI, machine learning or deep learning and it has achieved promising results in tasks, such as speech, image, and video processing, as well as, biometric recognition, e.g., finger vein image recognition. In [1], they proposed an algorithm which is capable of creating a new

noninvertible version of the original finger-vein template, which is stacked with an artificial neural network– the multilayer extreme learning machine (ML-ELM) to generate a privacy-preserving finger-vein recognition system i.e. named BDD-ML-ELM.

In [12], a four-layer convolutional neural network (CNN) with the convolutional-subsampling architecture is designed, for finger-vein recognition. In this scheme, a modified stochastic diagonal Levenberg–Marquardt algorithm is utilized to network training to make convergence faster. In [13], proposed a finger-vein recognition method which is robust to the three database that they used and environmental changes based on the convolutional neural network (CNN) by using NRI image sensor. In [14], for finger-vein verification, a deep learning based segmental model is developed to predict the probability of pixels from veins or the background. Moreover, a missing finger vein pattern recovering method based on a fully convolutional network is introduced to improve recognition performance. Das et al., [15] proposed a deep learning based scheme to handle finger-vein images of varying qualities. In [15], extensive experiments are conducted on four different publicly available databases to evaluate system performance. A lightweight deep learning scheme for finger-vein verification is proposed in [16], which tackles the restrictions of CNN, e.g., large training sample sizes and high computation. The proposed scheme contains a two-channel convolutional network to solve the problem of a lack of finger-vein data, while demonstrating satisfactory performance. The extreme learning machine (ELM) [17], as a kind of artificial neural network, is another stream of AI. In an ELM, the hidden layer biases and input weights are randomly assigned without requiring any fine-tuning of parameters, making it much faster than a traditional deep learning neural network, e.g., CNN. Therefore, it is attracting a strong research interest in image classification and regression, including finger vein recognition. For example, in [18], the feature component based ELMs are designed to improve recognition accuracy and stability. Features are extracted from eight block based directional features. The extracted features are further trained by eight single ELMs and the outputs of the eight ELMs are connected by an output layer before classification is performed.

Motivation and objective. After knowing the Consequences and the risk of biometric data breach and this could be used in a wide range of criminal activities that would be disastrous for both the businesses and the organizations, also equally can affect, as well as their employees and clients/associates.

With the rapid growth and use of electronic information systems in today's society, personal or identity, verification is now a critical key problem. Traditional method uses personal identification number (PIN), password, key smartcards, etc. But these methods have proven adequately to be unreliable and do not provide strong security. So, the biometrics, which are highly accurate and use a part of one's body, have become the ideal answer to these security needs [20]. The advancement of on-device AI will undoubtedly accelerate the development of voice recognition technique.

With the rapid development of AI, machine learning based biometric recognition systems are advantageous to their non-machine learning counterpart due to superior recognition performance. However, given that deep learning methods, e.g., CNN, being a representative of AI, are invertible using the outputs from the trained network, machine learning based biometric systems may suffer security threats, such as adversaries retrieving raw biometric templates by inverting the artificial neural network. This information leakage is a considerable security weakness of machine learning based biometric recognition [1].

The only objective of this paper is to propose a hybrid technique of finger vein recognition based on the deeplearning approach, which will be more accurate and faster than the existing methods.

Proposed hybrid approach. As we mentioned in the section III the motivation behind. In this section we are going to discuss the detail structure and technique of proposed system. The deep learning base hybrid system with template security mainly consists of four parts as they follows: Finger vein feature extraction, BDD-based secure template generation, Fuzzy commitment scheme and ML based finger vein recognition and decision making. AS you can see in Fig. 1.

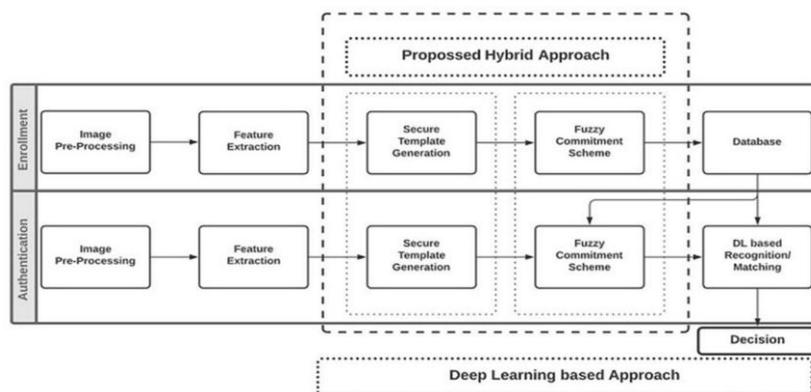


Fig. 1. Block diagram of the proposed hybrid system

A. Finger Vein Feature Extraction

This operation will perform for both the Enrolment as well as Authentication part. First take the image and perform the pre-processing operation in it later give an input finger-vein image, region of interest (ROI) extraction and image enhancement should be performed first. After ROI extraction and image enhancement using the same methods as in [18].

The enhanced finger-vein image is further processed by a set of Gabor filters and the linear discriminate analysis (LDA) [23]. Finger vein's texture features and characteristics provide information about the spatial arrangement of color or intensities of a finger-vein image. These features are extracted by a filter bank at different orientations and on different scales. The filter bank contains 40 Gabor filters of eight orientations and five scales, using the same parameter settings in [23] for finger-vein texture feature extraction. The texture feature vector extracted from a finger-vein image of size 256×96 with the constructed Gabor filter bank is of super high dimension, which is costly to process and store. Hence, the dimensionality reduction technique, LDA [23] is employed to reduce the feature vector's dimension. By this means, a real-valued feature vector FR of length NR is created.

B. BDD-Based Secure Template Generation

In this step, Adapted from [1] BDD-based noninvertible transformation and apply it to the binary vector FB to generate secure finger-vein templates. Since both the inputs and outputs of the proposed transformation are binary vectors, only Boolean operation is needed, for which the BDD [4] is a good fit. We design a BDD with three variables, b1, b2, and b3. As shown in Fig. 2, the designed BDD has a structure of b1 being the root, and b2 and b3 being the decision nodes. Each decision node, b2 or b3 has two child nodes named low child and high child. In Fig. 2, the dotted line (labelled 0) represents the path to the low child, while the solid line (labelled 1) denotes the path to the high child. Now combine the BDD (as shown in Fig. 2) and the permutation technique to produce a noninvertible transformation, which is to be used to generate a cancellable finger-vein template with strong security. Then the transformed feature vector FB will serve as the input to the subsequent deep-learning algorithm.

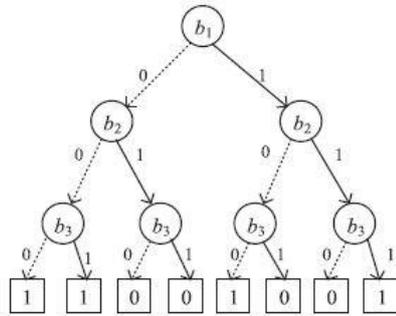


Fig. 2. Designed BDD (adapted from [4])

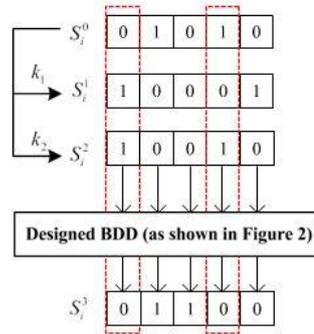


Fig. 3. Example of the BDD-based transformation

We give a simple example to illustrate the above-mentioned BDD-based transformation. Assume that the original segment $S^0 = '01010'$ and the user-specific keys are $k_1 = [4, 3, 1, 5, 2]$ and $k_2 = [2, 1, 5, 4, 3]$. Under the guidance of k_1 and k_2 , two new segments are generated as $S^1 = '10001'$ and $S^2 = '10010'$, respectively. If the variables b_1, b_2 , and b_3 in the BDD are, respectively, as signed the first element of S^0, S^1 and S^2 , i.e., $b_1 = 0, b_2 = 1$ and $b_3 = 1$, then according to the designed BDD in Fig. 2, the output is $f(b_1 = 0, b_2 = 1, b_3 = 1) = 0$, as indicated in the first red rectangle in Fig. 3. If $b_1 = 1, b_2 = 0$, and $b_3 = 1$ are as signed, as shown in the second red rectangle in Fig. 3, then the output is $f(b_1 = 1, b_2 = 0, b_3 = 1) = 0$. After applying this operation to all three segments element by element, we get a new binary segment S^3 . By concatenating all the new segments, transformed from F_B by the designed BDD and permutation, we form a new feature vector F_B , which is the secure finger-vein template [1].

C. Fuzzy Commitment Scheme

In [2], they explained a fuzzy commitment scheme which treats the biometric template itself as a corrupted code word. The security of this method is linked to the number of code words. The scheme encrypts the original template u_E to a pair (Hash C) where C is a randomly generated code word. At authentication, given a query template u_A , the method computes result and corrects it to the closest code word C^1 . If u_E is close to u_A then will be corrected to C, (i.e. $C^1 = C$). Then Hash (C^1) and Hash(C) are compared to make the decision. This algorithm can tolerate a relatively large error rate with enhanced security level. Also, both the off-line scheme and the fuzzy commitment scheme require a binary input.

D. ML-ELM-Based Finger-Vein Recognition

Extreme learning machines are feedforward neural networks with a single layer or multiple layers of hidden nodes, where the parameters of hidden nodes (not just the weights connecting inputs to hidden nodes) need not be tuned. These hidden nodes can be randomly assigned and never updated (i.e. they are random projection but with non-linear transforms), or can be inherited from their ancestors without being changed. In most cases, the output weights of hidden nodes are usually learned in a single step, which essentially amounts to learning a linear model. In most cases, ELM is used as a single hidden layer feedforward network (SLFN) including but not limited to sigmoid networks, RBF networks, threshold networks, fuzzy inference networks, complex neural networks, wavelet networks, Fourier transform, Laplacian transform, etc. Due to its different learning algorithm implementations for regression, classification, sparse coding, compression, feature learning and clustering, multi ELMs have been used to form

multi hidden layer networks, deep learning or hierarchical networks. A hidden node in ELM is a computational element, which need not be considered as classical neuron. A hidden node in ELM can be classical artificial neurons, basis functions, or a subnet work formed by some hidden nodes. Here we used to make our system faster than traditional systems in terms of accuracy and computing.

The ML-ELM possesses a multilayer learning architecture that stacks single ELMs one by one in a hierarchical structure, as demonstrated in Fig. 4(a). In our method, the secure template feature vector F_B , generated from the previous step, is treated as the input to the ML-ELM. The output of the $(k-1)^{\text{th}}$ hidden layer is used as the input to the k^{th} hidden layer. Similar to traditional deep neural networks, the hidden layer weights β_{k-1} of the $(k-1)^{\text{th}}$ hidden layer are initialized by using ELM auto encoder, but the time for fine tuning is not required. The ELM auto encoder performs layer wise unsupervised training that uses the inputs as outputs with the traditional least mean square method to compute the hidden layer weights β_{k-1} , as shown in Fig. 4(b). By going through the above-mentioned recursive calculation, the ML-ELM with N_H hidden layers out-puts a vector O containing the probability values for all the available classes/subjects. The maximum probability indicates the most similar class/subject that the test sample belongs to [1].

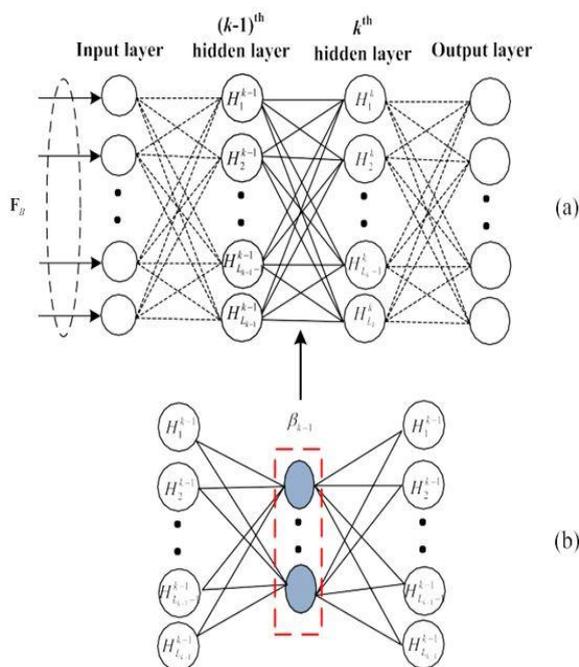


Fig. 4 (a). Structure of the ML-ELM and (b) the ELM auto encoder

Experimental results. In the experimental results section, we divided results into three parts. Part I, reports the image pre-processing and enhancement using Gabor filter and guided filter. The accuracy of the proposed hybrid algorithm is evaluated and reported in Part II. The decision making of the hybrid algorithm is discussed in Part III.

The public domain database is used in our experiment, first of all we found ROI (Region of Interest) from the give input image as shown in following image.

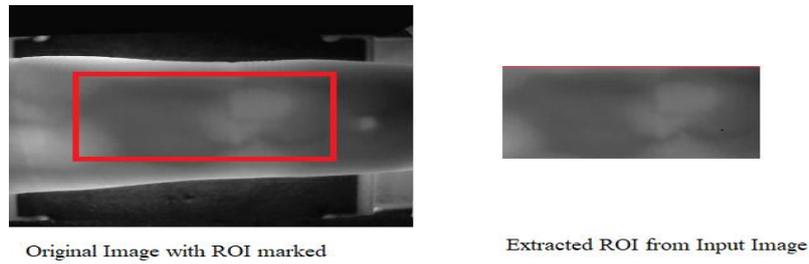


Fig. 5. Extraction of ROI from Input image

The proposed image pre-processing method comprises of eight sub-steps: color to grayscale conversion, grayscale median filter, image alignment and resize, global thresholding, Adaptive mean thresholding, Gaussian thresholding, and lastly thinning process. The result is shown in Fig. 6 and Fig. 7.

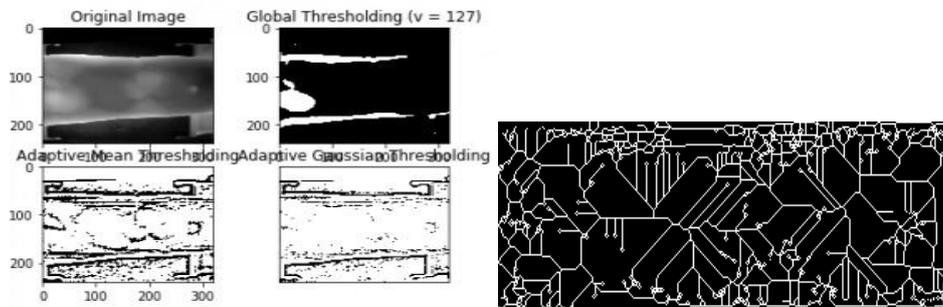


Fig. 6. Output images after applying thresholding

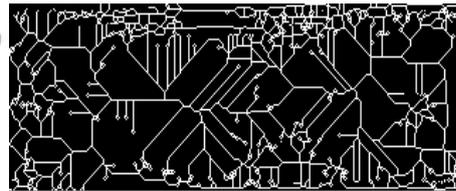


Fig. 7. Output images after Thinning

Then after extracting features from the input image, we further pass these from BDD (Binary Decision Diagram) to generate the secure template, as the output we get new feature vector containing encrypted new feature data.

To further increment of security we again apply the Fuzzy Commitment Schemes to the output vector and generate new highly secure template vector with new encrypted and secure feature for the same input image and stored in the Database with a particular key.

All modules of this system working very efficiently on each image of given dataset of finger vein images. And performing cancelability and discriminability and increasing security.

Experiment was carried out to evaluate the performance of the system in term of speed and accuracy. Preliminary experiment on our finger vein database consists of 3816 images from 106 person's fingers. The system working properly on the given database and giving overall accuracy of 93 % as a result.

The testing accuracy, measured by the correct identification rate (CIR), is plotted in Fig. 8, from which we can see that, it provides strong template protection to the proposed deep learning based finger vein recognition system. Indeed, it is a balance between recognition accuracy and security.

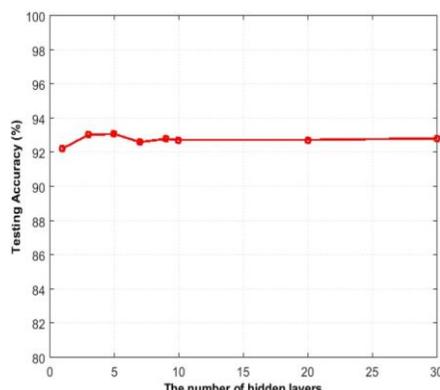


Fig. 8. Testing accuracy against hidden layers

Conclusion. The primary focus of this paper is to enhance the security of the pattern for finger vein authentication system as we are living in the era where we don't have problem of storage space and processing capability. So here we proposed the hybrid approach that takes advantage of deep learning based finger vein recognition system and fuzzy commitment scheme. The proposed framework consists of four parts, namely Finger vein feature extraction, BDD-based secure template generation, Fuzzy commitment scheme and ML based finger vein recognition and decision making. Each part provides the template cancellable ability, discriminability, and security, respectively. The proposed system is an enhancement over most existing permutation based cancellable biometrics as well as machine learning based finger vein recognition systems, which offer no template protection. And accurate up to 93%. And all modules in proposed model are working efficiently.

For future work on this system, work continues on the investigation on how to improve recognition accuracy and application of this method on the multiple databases and performance accuracy on those databases. Given below we have a table showing the comparison of proposed system with some other existing systems.

Table 1

Performance comparison in CIR

Methods	Template Protection	Accuracy (CIR)
Van et al. [10]	No	95.67%
Xie et al. [18]	No	97.76%
Banerjee et al. [11]	No	90.72%
Miura et al.[3]	No	96.06%
Das et al.[15]	No	98.90%
Kauba et al.[8]	No	-
Fang et al.[16]	No	90.47%
Liu and Kim [9]	No	-
Hong et al. [13]	No	93.91%
Yang et al. [1]	Yes	96.21%
Proposed Hybrid Method	Yes	93.05%

REFERENCES

1. Wencheng Yang, Song Wang, Jiankun Hu, Guanglou Zheng, Jucheng Yang, and Craig Valli. Securing Deep Learning Based Edge Finger Vein Biometrics With Binary Decision Diagram, *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, July 2019, Vol. 15, No. 7, pp. 4244-4253.
2. Yi C. Feng, Pong C. Yuen, and Anil K. Jain. A Hybrid Approach for Generating Secure and Discriminating Face Template, *IEEE Transactions on Information forensics and security*, March 2010, Vol. 5, No. 1, pp. 103-117.
3. Miura N., Nagasaka A., and Miyatake T. Feature extraction of fingervein patterns based on repeated line tracking and its application to personal identification, *Mach. Vision Appl.*, Oct. 2004, vol. 15, pp. 194-203.
4. Akers S.B. Binary decision diagrams, *IEEE Trans. Comput.* Jun. 1978, Vol. C-27, No. 6, pp. 509-516.
5. Gupta P. and Gupta P. An accurate finger vein based verification system, *Digit. Signal Process*, 2015, Vol. 38, pp. 43-52.
6. Xi X., Yang L., and Yin Y. Learning discriminative binary codes for fingervein recognition, *Pattern Recognit.*, 2017, Vol. 66, pp. 26-33.
7. Yang L., Yang G., Yin Y., and Xi X. Finger vein recognition with anatomy structure analysis, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, Aug. 2018, Vol. 28, No. 8, pp.1892-1905,.
8. Kauba C., Piciucco E., Maiorana E., Campisi P., and Uhl A. Advanced variants of feature level fusion for finger vein recognition, *Proc. Int. Conf. Biometrics Special Interest Group*, 2016, pp. 195-206.
9. Liu C. and Kim Y.-H. An efficient finger-vein extraction algorithm based on random forest regression with efficient local binary patterns, in Proc. IEEE Int. Conf. Image Process, 2016, pp. 3141-3145.
10. Van H.T., Thai T.T., and Le T.H. Robust finger vein identification base on discriminant orientation feature, in Proc. 7th Int. Conf. Knowl. Syst. Eng., 2015, pp. 348-353.
11. Banerjee A., Basu S., Basu S., and Nasipuri M. ARTeM: A new system for human authentication using finger vein images, *Multimedia Tools Appl.*, 2018, Vol. 77, pp. 5857-5884.
12. Radzi S.A., Hani M.K., and Bakhteri R. Finger-vein biometric identification using convolutional neural network, *Turkish J.Elect.Eng. Comput. Sci.*, 2016, Vol. 24, pp. 1863-1878.
13. Hong H.G., Lee M.B., and Park K.R. Convolutional neural network- based finger-vein recognition using NIR image sensors, *Sensors*, 2017, Vol. 17, pp. 1297.
14. Qin H. and El-Yacoubi M.A. Deep representation-based feature extraction and recovering for finger-vein verification, *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, Aug. 2017, Vol. 12, No. 8, pp. 1816-1829.
15. Das R., Piciucco E., Maiorana E., and Campisi P. Convolutional neural network for finger-vein-based biometric identification, *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, Feb. 2019, Vol. 14, No. 2, pp. 360-373.
16. Fang Y., Wu Q., and Kang W. A novel finger vein verification system based on two-stream convolutional network learning, *Neurocomputing*, 2018, Vol. 290, pp. 100-107.
17. Huang G.-B., Zhu Q.-Y., and Stew C.-K. Extreme learning machine: theory and applications, *Neurocomputing*, 2006, Vol. 70, pp. 489-501.
18. Xie S.J., Yoon S., Yang J., Lu Y., Park D.S., and Zhou B. Feature component-based extreme learning machines for finger vein recognition, *Cogn. Comput.*, 2014, Vol. 6, pp. 446-461.
19. Khalil-Han M. and Eng P.C. FPGA-Based embedded system implementation of finger vein biometrics, *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2010)*, October 3-5, 2010, Penang Malaysia.
20. Ayappan G. and Shankar A. Finger Vein biometric Authentication System, *International Journal of Trend in Research and Development*, April 2017, Vol. 4 (2), pp. 51-53.
21. Yang W., Hu J., and Wang S. A finger-vein based cancellable bio- crypto system, in *Proc. Int. Conf. Netw. Syst. Secur.*, 2013, pp. 784-790.
22. Yang W., Wang S., Hu J., Zheng G., and Valli C. A fingerprint and finger-vein based cancellable multi-biometric system, *Pattern Recognit.*, 2018, Vol. 78, pp. 242-251.
23. Yang W., Hu J., Wang S., and Yang J. Cancelable fingerprint templates with Delaunay triangle-based local structures, in *Proc. Cyberspace Safety Secur.: 5th Int. Symp.*, 2013, pp. 81-91.
24. Vitomirand S., Nikola P. The complete Gabor-Fisher classifier for robust face recognition, *EURASIP J.Advances Signal Process.*, 2010, Vol. 2010, Art. no. 31.

25. Jin A.T.B., Ling D.N.C., and Goh A. Bio hashing: Two factor authentication featuring finger print data and tokenised random number, *Pattern Recognit.*, 2004, Vol. 37, pp. 2245-2255.
26. Kasun L.L.C., Zhou H., Huang G.-B., and Vong C.M. Representational learning with extreme learning machine for big data, *IEEE Intell. Syst.*, Dec. 2013, Vol. 28, No. 6, pp. 31-34.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Б. Аббасов.

Шивам Шендре – Государственный инженерный колледж Аурангабада, Университет Маратвады им. доктора Бабасахеба Амбедкара; e-mail: shivamshendre8411@gmail.com; Аурангабад - 431005, Махараштра, Индия, тел.: +918623082270; кафедра компьютерных наук и инженерии; магистр технологий.

Доктор Шубханги Сапкал – e-mail: shubhangisapkal24@gmail.com; тел.: +919922112410; кафедра компьютерных наук и инженерии; доцент.

Shivam Shendre – Government College of Engineering Aurangabad, Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University; e-mail: shivamshendre8411@gmail.com; Aurangabad - 431005, Maharashtra, India, phone: +918623082270; the department of comp. sci. & engineering; cand. of master of technology.

Dr. Shubhangi Sapkal – e-mail: shubhangisapkal24@gmail.com; phone: +919922112410; the department of comp. sci. & engineering; assistant professor.

Раздел IV. Анализ и распознавание образов

УДК 004.93'1

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-184-192

Р.В. Гор, А.Д. Мишра, Р.Р. Дешмух, И.Б. Аббасов, П.У. Рандив

LULC-АНАЛИЗ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕКОНТРОЛИРУЕМОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

*Землепользование и растительный покров являются естественным состоянием поверхности земли. Дистанционное зондирование - очень важный метод изучения землепользования (LULC). Для анализа земного покрова при дистанционном зондировании используются различные методы классификации. Данные методы не требуют предварительную информацию о земном покрове или типах землепользования. Наиболее часто для анализа изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования, используют два метода классификации. К ним относятся контролируемая классификация и неконтролируемая классификация. Целями предлагаемой работы являются использование неконтролируемых методов классификации для поиска кластеров, по определению типов землепользования и сравнение данных методов с интерактивным анализом данных самоорганизации (ISODATA). Для анализа землепользования были использованы изображения датчика Hyperion. Датчик Hyperion имеет двести сорок две полосы, однако немногие полосы содержат полезную информацию для спектрального анализа. Поэтому полосы, не содержащие полезную информацию выявляются и удаляются. После обработки входного изображения по данному алгоритму из двухсот сорока двух полос остаются только сто шестьдесят пять полос. При этом учитываются радиометрическая калибровка и немаловажная коррекция атмосферных факторов. Затем по результатам обработки с применением предложенных методов формируются кластеры для изучения землепользования с использованием гиперспектрального изображения. Для формирования кластеров осуществлялась группировка пикселей, на основе выбранных данных. Пиксели из одного кластера имеют большие сходства, в то время как пиксели из разных кластеров отличаются друг от друга. На основе результатов делается вывод о том, что метод кластеризации (*k-means*) позволяет лучше идентифицировать или прогнозировать тип землепользования на основе гиперспектрального изображения с высоким разрешением, чем метод интерактивного анализа данных самоорганизации (ISODATA). Выходное изображение, которое является результатом кластеризации, может быть использовано для идентификации различных типов объектов землепользования. Лучшие всего были идентифицированы следующие объекты землепользования: водная среда, сельскохозяйственные угодья, растительность, застроенная территория или поселение, поля и скалистые регионы.*

*Земельный покров; землепользование; классификация земного ландшафта; LULC анализ; неконтролируемый процесс; платформа ENVI 5.5; методы кластеризации; метод *K-means*; интерактивный анализ самоорганизации (ISODATA).*

R.W. Gore, A.D. Mishra, R.R. Deshmukh, I.B. Abbasov, P.U. Randive

LULC-ANALYSIS OF LAND-USE WITH THE HELP OF UNSUPERVISED CLASSIFICATION

Land-use and vegetation cover are the natural state of the earth's surface. Remote sensing is a very important land use study (LULC) method. Various classification methods are used to analyze land cover in remote sensing. These methods do not require prior information on land cover or land use types. Two classification methods are most commonly used to analyze remote sensing images. These include controlled classification and uncontrolled classification. The objectives of the proposed work are to use unsupervised classification methods to find clusters, determine land use types, and compare these methods with interactive analysis of self-organization data (ISODATA). Hyperion sensor images were used for land use analysis. The Hyperion sensor has two hundred and forty-two bands, but few

bands provide useful information for spectral analysis. Therefore, bands that do not contain useful information are identified and removed. After processing the input image according to this algorithm, out of 242 bands, only one hundred and sixty-five bands remain. This takes into account radiometric calibration and an important correction of atmospheric factors. Then, based on the results of processing using the proposed methods, clusters are formed to study land use using a hyperspectral image. To form clusters, the pixels were grouped based on the selected data. Pixels from the same cluster have more similarity, while pixels from different clusters differ from each other. Based on the results, it is concluded that the clustering method (k-means) allows better identification or prediction of land use based on a high-resolution hyperspectral image than the Interactive Self-Organization Data Analysis (ISODATA) method. The output image, which is the result of clustering, can be used to identify different types of land use objects. The LULC classes predicted are Water Body, Agriculture Land, other Vegetation, Built Up or settlement, Bare Land and Rocky region.

Land Cover; Land Use; Classification of the Terrestrial Landscape; LULC; Unsupervised; ENVI 5.5; K-means; ISODATA.

1. Introduction. Remote sensing is the technique where information about the objects can be captured without directly touching that object or phenomenon i.e. the information can be obtained remotely by using the sensors or satellites [1]. There are two types of sensors viz. pushbroom scanner and whiskbroom scanner. The pushbroom scanner or across track scanner uses a line of detectors to capture the image one line at a time. Whiskbroom scanner or the along track scanner uses mirror, which moves back and forth to reflect the light onto one detector only [2].

The EO-1 satellite was launched by introducing hyperspectral remote sensing in Nov 2000. The EO-1 Hyperion is pushbroom imager having spectral range 400 nm to 2500 nm. The spatial resolution of EO-1 Hyperion sensor is 30m and spectral resolution of 10 nm. The total number of bands of Hyperion sensor is 242 [3]. The image acquired by Hyperion is with swath width of 7.5 km and covering 20km area as shown in fig. 1.

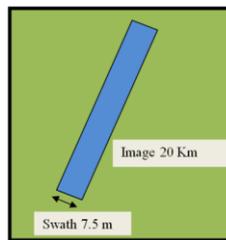


Fig. 1. Study Image Coverage with Swath

Land can be analyzed through remote sensing and its related techniques for variety of applications such as Land Use/Land Cover (LULC) Mapping [4, 5], hydrological impacts of LULC changes [6], changes in the water reservoirs or watershed [7], change detection with respect to the turban areas, Forest cover, and agriculture spread or decline and waterbody detecting the dynamics of LULCC [8] and change detection for river basins [9]. There are two types of classification techniques available for analyzing the images obtained through remote sensing viz. supervised classification and unsupervised classification. K-means and ISODATA (Interactive Self Organization Data Analysis) these are the two unsupervised techniques provided in ENVI [10]. In clustering the image pixels are grouped into clusters based on the similarity among those pixels.

Once the clusters formed, each cluster has to be identified and predicted for LULC type which is supportive for the land use and land cover studies. Most of the researchers have used k-means algorithm for remote sensing applications. In the field of remote sensing different classification techniques were used for land cover analysis. The unsupervised technique does not require any prior information about the land cover or types of land cover. A class is assigned to each cluster by interpreter leading to identification of land cover type [11].

The first method for land cover classification using LANDSAT image was pixel-based classification [12]. The other technique for image classification is Parallel piped technique which is based on finding the parallel piped-shaped boxes for the predefined classes. The parallel piped boundaries assist in assigning the test pixel to a particular matching class.

In mid 1970's it was recognized that as the land cover changes it modifies surface of albedo that's the reason the surface atmosphere energy exchanges which have effects on regional climate [13]. LULC primarily impacts on the biotic diversity worldwide. Like change on ecosystem, goods and services were further identified [14].

Aykut A. et al applied many classification methods on the satellite images. The maximum likelihood method was found reliable and applicable for satellite image classification [15]. According to the study of Bardsley J. M. et al. the image classification based on pixels does not depends on its neighbors and spatially based techniques which includes the methodologies like spectral based classification, quadratic discriminant analysis [16]. Lonesome M. M. developed an alternative procedure for an object based image classification. They used region based approach for classification of satellite images (17). Afroz S.M. et al. used high resolution satellite imagery to achieve meaningful area wide special information for the development and management of the city [18].

Harish K. E. et al. they worked on cadastral features like buildings and roads. They used Particle Swarm Optimization technique for extracting cadastral features and land cover mapping using swarm computing techniques [19]. Two k-means clustering algorithms with Laplacian of Gaussian (LoG) were coupled with Prewitt filter. These methods were used by Balasubramanian S. et al. for processing the satellite images [20]. Ashwini T. et al. used K-means clustering and back propagation algorithms of artificial neural network for segmentation and classification of satellite images [21].

The proposed work aimed at using the unsupervised classification methods K-means and ISODATA in order to do analysis of land use and land cover using high resolution image of Hyperion sensor.

2. Methodology. The hyperspectral imagery is having very high resolution and can be used for analyzing or identifying the different types of land use and land cover. The fig. 2 is the Methodology for proposed work.

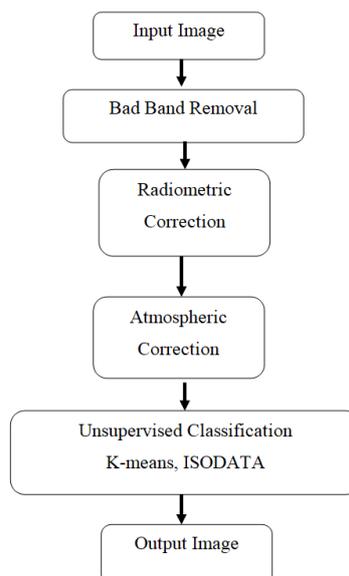


Fig.2. Methodology of Proposed Work

The proposed methodology used Hyperion sensor image with 242 bands. Few bands contain no useful information for spectral analysis. So there is need to identify and remove those bad bands which does not contain useful information. Out of 242 bands, only 165 bands remained after handling the input image for bad bands. The radiometric calibration and atmospheric correction are also very important preprocessing techniques for handling calibration problems and problems due to atmospheric factors.

Then K-means and ISODATA both techniques have to be applied in order to form the clusters and analyze the different types of LULC using hyperspectral image.

The output image which is the result of clustering can be used for indentifying the different types of LULC which utilizes the information from clusters or classes obtained through k-means.

3. Results and Discussions. The dataset for the proposed work was downloaded from Glovis Portal [22]. The Hyperion image was preprocessed for the removal of bad bands and 165 bands were left as informative band which were used for further analysis. Fig. 3,a is the input image after bad band removal. The image was also preprocessed for radiometric calibration and the result is shown in fig. 3,b.

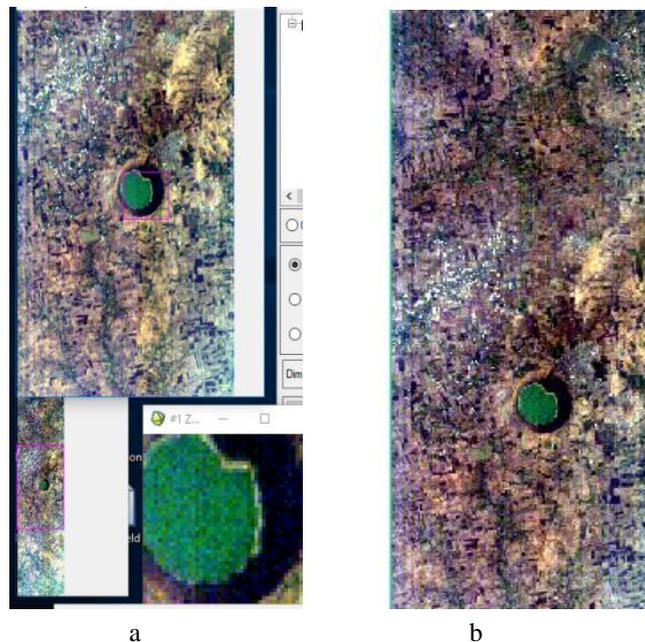


Fig. 3. Image Handled For (a) Bad Bands (b) Radiometric Calibration

The atmospheric correction was performed using FLAASH algorithm. The noise removal with dimensionality reduction was done using MNF (Minimum Noise Fraction) Technique. ENVI 5.5 was used for the proposed work. The k-means technique was applied with the parameters change threshold of 5.00, number of classes 6 with three iterations.

Result of k-means clustering is as shown in fig. 4,a. The different types of LULC identified from the output of K-means are Class 1 (Red) Water, Class 2 (Green) BuiltUp, Class 3 (Violet) Vegetation, Class 4 (Yellow) Agriculture Land, Class 5 (Blue) Rock, and Class 6 (Pink) Bare Land. The percentage for each class being classified is as shown in fig. 4,b.

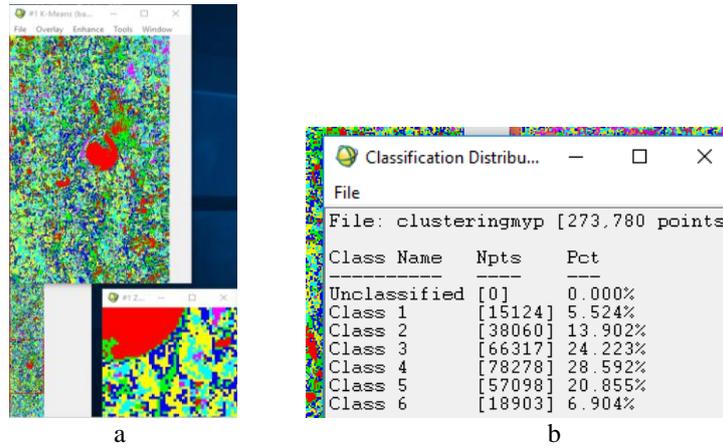


Fig. 4. a – Result of K-means Clustering b – Classification Distribution

The table 1 contain the classes identified with K-means technique with their corresponding LULC types and the result of percentage classified and the graph for different LULC types obtained by K-means is shown in fig. 5.

Table 1

LULC Types and Class-wise Percentage using K-means

Class Name	Color	LULC Types	Percent classified
Class 1	Red	Water Body	5%
Class 2	Green	BuiltUp	14%
Class 3	Violet	Vegetation	24%
Class 4	Yellow	Agriculture Land	28%
Class 5	Blue	Rock	21%
Class 6	Pink	Bare Land	7%

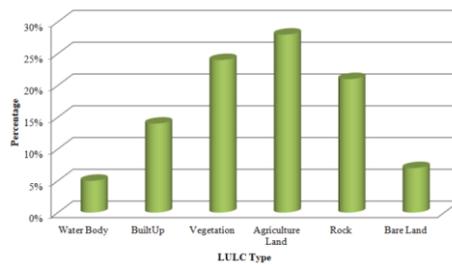


Fig. 5. LULC Types With Their Percentage of Classification

The class distribution in meters² for each class is as shown in fig. 6.

```

Class Distribution Summary
Unclassified: 0 points (0.000%) (0.0000 Meters2)
Class 1: 15,124 points (5.524%) (32,175,741.3376 Meters2)
Class 2: 38,060 points (13.902%) (80,971,218.9440 Meters2)
Class 3: 66,317 points (24.223%) (141,086,923.9808 Meters2)
Class 4: 78,278 points (28.592%) (166,533,501.7472 Meters2)
Class 5: 57,098 points (20.855%) (121,473,848.1152 Meters2)
Class 6: 18,903 points (6.904%) (40,215,421.7472 Meters2)
    
```

Fig. 6. Class-wise Area Covered in Meters²

From the values of class 3 and class 4 with 141km² and 166 km² respectively, indicates more vegetation in the selected area of study while class 5 and class 6 covers total area of 162 km² and 32km² for class waterbody.

Another technique for classifying the LULC types is ISODATA. It is also an unsupervised classification technique available in ENVI 5.5. This technique was applied on the pre-processed input image of Hyperion sensor. The parameter number of classes set in between 7 and 10 and the change threshold was set to 5. The output image of technique ISODATA is displayed in fig. 7,a and the resultant class distribution is as shown in fig. 7,b.

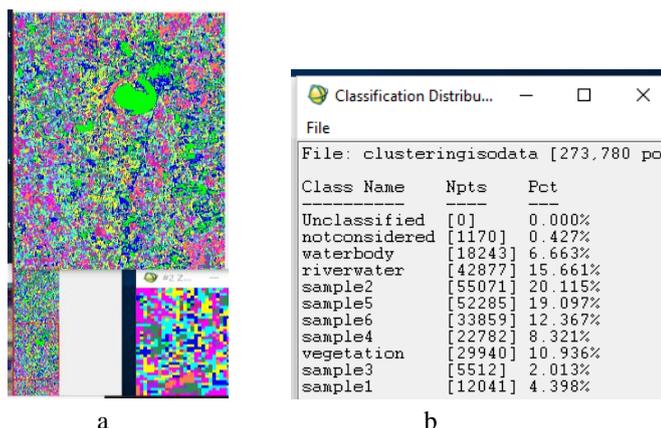


Fig. 7. a – Output Image of ISODATA Technique, b – Class Distribution

The table 2 shows LULC types identified and the corresponding percentage of classification.

Table 2

LULC Types and Class-wise Percentage using ISODATA

Class	Color	LULC Type	Percent Classified
Class 1	Green	Waterbody	6.66%
Class 2	Violet	Buildup	15.66 %
Class 3	Yellow	Agriculture Land	20.11%
Class 4, Class 7	Blue, Sea Green	Vegetation	29%
Class 5	Pink	Rock	12%
Class 9	Orange	Bare Land	4.39%

The fig. 8 mentions the LULC types predicted using ISODATA techniques with the corresponding percentage of classification.

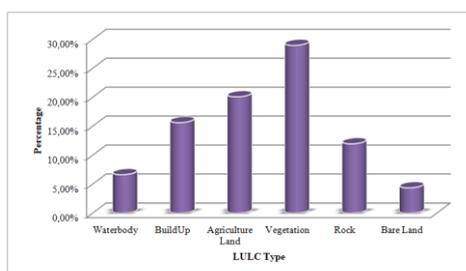


Fig. 8. LULC Types Identified with Percentage Classified using ISODATA

The comparison between the results of K-means and ISODATA technique is as displayed in fig. 9.

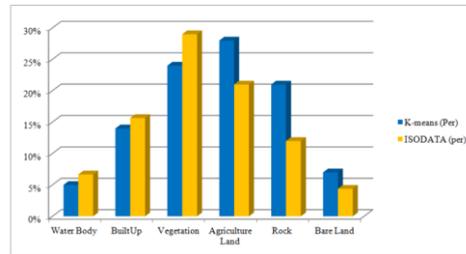


Fig. 9. Comparison of K-means and ISODATA Results

Thus the different types of LULC identified with both the techniques are Vegetation, Agriculture land, Water Body, Built up or settlement, bare land and Rock. The K-means method is better in LULC analysis than the ISODATA method.

Conclusion. The land can be analyzed accurately for its use and cover using remote sensing techniques. The unsupervised classification techniques K-means and ISODATA were used for the proposed work. In the K-means technique the Euclidean distance measure is used for forming the clusters. The minimum threshold for this technique was set to 5 based upon which the clusters were formed. The ISODATA used the Self Organization to form the clusters. From the comparison of both the techniques, k-means formed the clusters efficiently than ISODATA. Using ISODATA it was difficult to predict the LULC type for small clusters. Thus K-means is better in identifying or predicting LULC type using Hyperspectral image with high resolution than ISODATA. The LULC types identified in the proposed work are Water Body, Agriculture Land, other Vegetation, Built Up or settlement, Bare Land and Rocky region.

Acknowledgment. This work is supported by Department of Science and Technology under the Funds for Infrastructure under Science and Technology (DST-FIST) with the sanction no. SR/FST/ETI340/2013 for the Department of Computer Science and Information Technology, Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University, Aurangabad, Maharashtra, India. The authors are thankful of Department and University Authorities for providing the support and infrastructure for carrying out this remarkable research.

REFERENCES

1. Lillesand T.M., and Kiefer R.W. Remote sensing and image interpretation. 4th ed. John Wiley & Sons, 1999 724 p.
2. Push Broom and Whisk Broom Sensors. Available at: <https://www.harrisgeospatial.com>. Harris Geospatial Solutions, Inc., 2020. [Cited: 05/23/2020]. Available at: <https://www.harrisgeospatial.com/Support/Self-Help-Tools/Help-Articles/Help-Articles-Detail/ArtMID/10220/ArticleID/16262/Push-Broom-and-Whisk-Broom-Sensors>.
3. Pearlman J.S., Carman P., Lee L., Liao, Segal C. Hyperion imaging spectrometer on the new millennium program Earth Orbiter-1 system: in Proceedings of the International Symposium on Spectral Sensing Research (ISSR), Systems and Sensors for the New Millennium, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 1999.
4. Reis S. Analyzing Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS in Rize, North-East Turkey, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 6188-6202.
5. Manakos I., Braun M. Land Use and Land Cover Mapping in Europe. Practices & Trends, Springer, 2014. 441 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7969-3>.
6. Gashaw T., Tulu T., Argaw M., Worqlul A.W. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, blue Nile basin, Ethiopia, *Sci. Total Environ*, 2018, pp. 619-620, 1394-1408.

7. Butt A., Shabbir R., Ahmad S.S., Aziz N., Nawaz M., Shah M. Land cover classification and change detection analysis of Rawal watershed using remote sensing data, *J. Biodivers Environ Sci.*, 2015, Vol. 1. 6, pp. 236-248.
8. Malik A.H., Aziz Neelam, Butt Amna, Erum Summra. Dynamics of land use and land coverchange (LULCC) using geospatial techniques: a case study of Islamabad Pakistan. 812, Dynamics of land use and land cover change (LULCC) using geospatial techniques: a case study of Islamabad Pakistan Zahra Hassan1, Rabia Shabbir1, Sheikh Sae Springer Plus, 2016, Vol. 5. Available at: <https://doi:10.1186/s40064-016-2414-z>.
9. Twisa S., Buchroithner M.F. Land-Use and Land-Cover (LULC) Change Detection in Wami River Basin. Tanzania 136, Land, MDPI, 2019, Vol. 8. Available at: <https://doi:10.3390/land8090136>.
10. Fukue K., Shimoda H., Matumae Y., Yamaguchi R., Sakata T. Evaluations of unsupervised methods for land-cover/use classifications of Landsat TM data, *Geocarto Int.*, 1988, Vol. 3, pp. 37-44.
11. Thompson M.M., Mikhail E.M. Recent developments and applications. Automation in photogrammetry, *Photogrammetria*, 1976, Vol.3 2, pp. 111-145.
12. Shlien S., Smith A. A rapid method to generate spectral theme classification of Landsat imagery, *Remote Sens. Environ.*, 1975, Vol. 4, pp. 67-77.
13. Otterman J. Baring high-albedo soils by overgrazing: a hypothesized desertification mechanism 4163, *Science*, 1974, Vol. 86, pp. 531-533.
14. Sala O.E., Chapin F. S., Armesto J. J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Leemans R. Global biodiversity scenarios for the year 2100. 5459, *Science*, 2000, Vol. 287, pp. 1770-1774.
15. Akgün A., Eronat A.H., Türk N. Comparing Different Satellite Image Classification Methods, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Journal, ISPRS*, 2004, Vol. 5, pp. 1091-1097.
16. Bardsley J.M., Wilde M., Gotschalk C., Lorang M.S. MATLAB Software for Supervised Classification in Remotely Sensing and Image Processing, *Journal of Statistical Software*, 2010, Vol. 55, pp.1-4.
17. Lonesome M. A Region Based Approach to Image Classification, Photogrammetry, Earth Observation Systems, Information Extraction, *Applied Geoinformatics for Society and Environment-Stuttgart University of Applied Sciences*, 2009, pp. 109-211
18. Rusthum A.S., Mohammed S. Object-Oriented Image Processing of an high resolution satellite imagery with perspectives for urban growth, planning and development, *International Journal of Image Processing*, 2011, Vol. 2, pp.72-86
19. Kundra E.H., Panchal V.K., Singh K., Kaura H., Arora S. Extraction of Satellite Image using Particle Swarm Optimization, *International Journal of Engineering*, 2010, Vol. 4, pp.86-92.
20. Subbiah B., Christopher S. Image Classification through integrated K- Means algorithm, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2012, Vol. 2, pp. 518-524.
21. Sapkal A.T., Bokhare C., Tarapore N.Z. Satellite Image Classification using the Back Propagation Algorithm of Artificial Neural Network. 2009. Geomatrix Conference.
22. USGS. (U.S. Department of the Interior). USGS Glovis. Available at: <https://glovis.usgs.gov> [Cited: 12/23/2018] <https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=1>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Бутенко.

Гор Ранджана Уаман – Университет доктора Бабасаеба Амбедкара Маратвады; e-mail: goreranjana123@gmail.com; Аурангабад, Индия; кафедра компьютерных наук и информационных технологий; аспирант.

Дешмух Ратнадип Р. – e-mail: rrdeshmukh.csit@bamu.ac.in; тел.: 9423147466; кафедра компьютерных наук и информационных технологий; профессор.

Рандив Прианка У. – e-mail: priyankarandive7@gmail.com; кафедра компьютерных наук и информационных технологий; магистр.

Мишра Абхилаша Д. – Махараштрский технологический институт; e-mail: Abbhilasha@gmail.com; Аурангабад, Индия; кафедра электроники и телекоммуникаций; доцент.

Аббасов Ифтихар Балакишиевич – Южный федеральный университет; e-mail: iftikhar_abbasov@mail.ru; Таганрог, Россия; тел.: +79185115574; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; профессор.

Gore Ranjana Waman – Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University; e-mail: goreranjana123@gmail.com; Aurangabad, India; the department of computer science and information technology; postgraduate student.

Dr. Ratnadeep R. Deshmukh – e-mail: rrdeshmukh.csit@bamu.ac.in; Aurangabad, India; phone: 9423147466; the department of computer science and information technology; professor.

Priyanka U. Randive – e-mail: priyankarandive7@gmail.com; the department of computer science and information technology; master.

Dr. Abhilasha D. Mishra – Institute of Technology; e-mail: Abhilasha@gmail.com; Aurangabad, India; the department of electronics and telecommunication; associate professor.

Abbasov Iftikhar Balakishi – Southern Federal University; e-mail: iftikhar_abbasov@mail.ru; Таганрог, Russia; phone: +79185115574; the department of engineering graphics and computer design; head of department; professor.

УДК 004.932.72

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-192-201

К.И. Морев, А.В. Боженюк**СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ОСОБЫМ ТОЧКАМ
РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ***

Работа посвящена экспериментам с различными методами выделения особых точек на изображениях с последующим их описанием бинарным дескриптором и сопоставлением методом полного перебора. В работе активно используется метод описания окрестностей особых точек, основанный на построении бинарной строки, характеризующей изменения яркостей пикселей в описываемой окрестности. Результирующая строка получается путем сравнения яркостей пикселей по определенному шаблону. Сегодня использование особых точек при работе с изображениями позволяет разрабатывать прикладные методы в различных сферах компьютерного зрения с повышенными требованиями ко времени работы и устойчивости к резким изменениям сцен. В работе приведены результаты экспериментов с особыми точками различных классов, классификация приводится в разделе 1. При проведении экспериментов использовались методы, реализованные в библиотеке OpenCV. В работе даны краткие описания используемых в экспериментах методов. В разделе 1 работы предлагается классификация современных типов особых точек изображений и дается краткое описание популярных методов детектирования описываемых типов особых точек. В разделе 2 авторы дают общее описание методов работы с особыми точками изображений. В разделе 3 приводится описание проводимых экспериментов с сопоставлением особых точек различных типов, описанных одним дескриптором, и раскрываются их результаты. Проведенные эксперименты позволяют выявить сильные и слабые стороны связок различных типов особых точек при их сопоставлении.

Особые точки изображения; сопоставление особых точек; дескрипторы особых точек; классификация особых точек изображений.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №18-01-00023, № 20-01-00197.

К.И. Morev, А.В. Bozhenyuk

IMAGE MATCHING USING DIFFERENT KEYPOINTS TYPES

The work is devoted to experiments with various methods of selecting special points on images, followed by their description with a binary descriptor and comparison by a full search method. This paper actively uses the method of describing the neighborhood of singular points, based on the construction of a binary string that characterizes changes in the brightness of pixels in the described neighborhood. The resulting string is obtained by comparing the brightness of pixels according to a specific template. Today, the use of special points when working with images allows you to develop applied methods in various areas of computer vision with increased requirements for working time and resistance to sudden changes in scenes. The paper presents the results of experiments with special points of various classes, the classification is given in section 1. During the experiments, methods implemented in the OpenCV library were used. The paper provides brief descriptions of the methods used in experiments. Section 1 of the paper offers a classification of modern types of singular points of images and provides a brief description of popular methods for detecting the described types of singular points. In section 2, the authors give a General description of methods for working with special image points. Section 3 describes the experiments that are being carried out with the comparison of special points of different types described by a single descriptor, and reveals their results. The experiments performed allow us to identify the strengths and weaknesses of bundles of different types of singular points when comparing them.

Keypoints of the image; keypoints matching; keypoints descriptors; classification of keypoints of images.

Введение. Компьютерное зрение сегодня – активно развивающаяся область научного знания. В связи с бурным развитием, исследователям предоставляются широкие возможности в плане реализации их идей и проверки предположений. Развитие современных комплексов технического зрения определяется развитием новых методов компьютерного зрения и повышением качества работы существующих. Одним из способов развития существующих методов – их агрегирование с целью получения нового, нетривиального результата. В данной работе демонстрируются результаты экспериментов с сопоставлением особых точек (далее – ОТ) различных классов двух изображений.

Сопоставление особых точек есть ключевая прикладная задача из области компьютерного зрения и качество ее решения напрямую определяет развитие многих прикладных областей робототехники, искусственного интеллекта и т.д. Через агрегирование различных классов ОТ в одном алгоритме сопоставления предполагается выделение новых связей между исследуемыми классами, выявление сильных и слабых сторон исследуемых комбинаций.

1. Особые точки изображений и работа с ними. Особая точка изображения – уникальная, точно локализованная часть изображения, обладающая высокой информативностью [1].

Можно провести классификацию особых точек изображения по принципу их выделения на изображении. Первыми и наиболее популярными сегодня являются ОТ, относящиеся к классу уголков (от английского corner – угол). Уголки – локальные окрестности изображения, характеризующиеся резким изменением яркости изображения в двух ортогональных направлениях плоскости изображения из центра этой окрестности. Одним из самых популярных методом выделения ОТ типа уголок считается детектор уголков, предложенный Харрисом [2].

Данный метод заключается в поиске таких точек на изображении, в которых автокорреляционная матрица малого окна-окрестности точки будет иметь два больших собственных числа. Используемая автокорреляционная матрица представлена ниже:

$$M(x, y) = \begin{bmatrix} \sum_{-K \leq i, j \leq K} w_{i,j} I_x^2(x+i, y+j) & \sum_{-K \leq i, j \leq K} w_{i,j} I_x(x+i, y+j) I_y(x+i, y+j) \\ \sum_{-K \leq i, j \leq K} w_{i,j} I_x(x+i, y+j) I_y(x+i, y+j) & \sum_{-K \leq i, j \leq K} w_{i,j} I_y^2(x+i, y+j) \end{bmatrix},$$

где i и j – индексы пикселей в окрестности особой точки, индексу $(0,0)$ соответствует центр окрестности, K – размер окрестности, представляющий размер ОТ, $w_{i,j}$ – весовой коэффициент, I_x и I_y – производные в точке по соответствующему направлению.

Следующим обширным классом особых точек следует выделить блобы (от английского blob – капля). Подобные точки характеризуются эллипсоподобной формой и не резким изменением яркости в некоторых направлениях, а скорее равномерным и плавным изменением яркости во всех направлениях от центра. Блобы представляют как бы пятна, более темные или более светлые, чем окрестность этих пятен.

Наиболее ярким и популярным методом выделения блобов можно считать предложенный Лове метод, основанный на разнице гауссианов (от английского difference of Gaussians – разница гауссианов) [3]. Особенность метода заключается в работе с пирамидой масштабов изображения, которая получается в ходе фильтрации изображения фильтрами Гаусса различных размеров. Чем больше размер фильтра, тем больше его значение среднеквадратичного отклонения и тем более низкие частоты, составляющие спектр изображения, остаются после фильтрации. После построения пирамиды масштабов, считается разница между соседними слоями пирамиды, и если текущая анализируемая точка является локальным экстремумом среди своих 8-ми соседей на изображении и среди 18 соседей верхнего и нижнего слоя пирамиды (по 9 соседей на один слой), точка считается особенной. А ее размер определяется исходя из текущего слоя пирамиды. На рис. 1 схематично отображен пример, иллюстрирующий поиск локального экстремума в пирамиде масштабов.

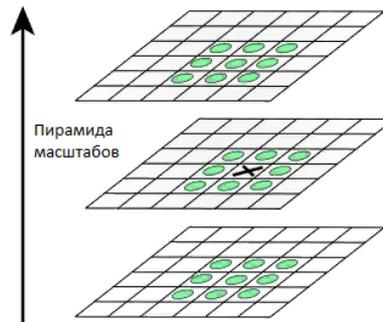


Рис. 1. Поиск экстремума

В отдельный класс особых точек также можно выделить регионы или области (от английского – regions). В целом, они похожи на блобы своей равномерностью по яркости, однако отличаются формой. Регионы характеризуются равномерной яркостью внутри их границ, но обладают сложной геометрической формой, не аппроксимирующейся эллипсом достаточно точно, в отличие от блобов. Один из методов детектирования ОТ типа регион на изображении является MSER метод или maximal stability extremal regions [4]. MSER метод выделения состоит в последовательной бинаризации изображения с постепенно возрастающим порогом. Таким образом строится последовательность бинаризованных изображений. Области изображения, относящиеся к одному классу после бинаризации на нескольких подряд элементах последовательности, считаются MSER особыми точками. Пример MSER регионов представлен на рис. 2.



Рис. 2. Слева, оригинальное изображение. Справа, MSER регионы зеленым – ярче окрестности, желтым – темнее

В настоящее время для исследования алгоритмов работы с особыми точками изображений исследователям предлагается множество реализаций различных алгоритмов их выделения, описания и сопоставления [5]. Однако, наиболее полный, удобный и готовый к использованию, инструментарий для экспериментов в области компьютерного зрения и работе с особыми точками в частности, предлагает программная библиотека OpenCV. При проведении экспериментов, в рамках данной работы, использовались методы, реализованные в библиотеке OpenCV версии 4.0.0.

2. Сопоставление изображений с использованием особых точек. Задача сопоставления изображений по особым точкам заключается в назначении истинных взаимных соответствий между ними [6, 7]. Соответствие определяется путем сравнения описаний точек. Пример сопоставления изображений приведен на рис. 3.



Рис. 3. Пример сопоставления особых точек двух изображений

Согласно классической концепции, сопоставление особых точек двух изображений разделяется на три основных этапа:

- 1) Выделение ОТ на изображениях;
- 2) Вычисление описаний обнаруженных ОТ;
- 3) Поиск соответствий между описаниями ОТ.

Причем при сопоставлении, как правило, используются особые точки, детектируемые одним методом и относящиеся к одному классу.

В рамках данной работы, проводится выделение на изображении особых точек различных классов, представленных в разделе 1. Далее они описываются одним дескриптором и анализируются результаты сопоставления.

Выделение особых точек. Ранее, в целях определения наиболее оптимальных методов выделения и описания особых точек были изучены алгоритмы работы доступных в библиотеке OpenCV 4.0.0 методов, а также проанализирована ско-

рость их обнаружения, их количество и устойчивость путем оптического сравнения двух обработанных изображений одного объекта с разных точек наблюдения. Результаты исследования были представлены в [8].

В качестве представителей различных классов были выбраны точки, полученные при использовании методов GFTT (от английского *good features to track* – хорошие особые точки для сопровождения), BRISK (от английского *binary robust invariant scalable keypoints* – бинарные устойчивые инвариантные масштабируемые особые точки) и описанный ранее MSER метод. GFTT – уголки, BRISK – блобы, MSER – регионы.

Метод GFTT использует подход, описанный для детектирования уголков на изображении, описанный в разделе 1. Аналогично и MSER. Метод BRISK детектирует ОТ, относящиеся к классу блобов по принципу анализа кольца пикселей вокруг центрального. Диаметр кольца определяется параметрами алгоритма, но в среднем равен 5 пикселям, и кольцо содержит 16 пикселей. В случае, когда непрерывная дуга из 9 пикселей ярче или темнее центра более чем на пороговое значение, пиксель считается центром ОТ. Также BRISK локализует особые точки в пирамиде масштабов, что наделяет их устойчивостью к изменению масштаба [9, 10].

Описание особых точек. Создание описания особой точки заключается в вычислении уникального описания окрестности точки, которое позволит найти эту точку на другом изображении исследуемой 3Д обстановки при изменениях ракурса, угла поворота или масштаба. Наиболее быстрыми к вычислению и последующему сравнению являются бинарные дескрипторы, состоящие из набора тестов, сравнивающих яркость пары пикселей в окрестности центра особой точки. Результат сравнения может принимать два значения: 0 или 1, в зависимости от яркостей сравниваемых точек. Таким образом, бинарный дескриптор – строка нулей и единиц конечной размерности (за правило взята размерность 512 бит). Сравнение двух дескрипторов сводится к вычислению операции XOR для двух строк-дескрипторов [8–10]. Современные процессоры способны выполнить эту операцию в один такт, что значительно ускоряет процесс сравнения бинарных дескрипторов.

Метод BRISK предполагает работу с бинарным дескриптором – что значительно ускоряет его работу, а специальная детерминированная структура шаблона для проведения тестов наделяет его высокими показателями устойчивости к изменениям угла поворота и масштаба наблюдаемой сцены. На рис. 4 представлен используемый для построения бинарного дескриптора методом BRISK шаблон. Отмеченные синим точки пиксели, значения яркостей которых сравниваются для построения дескриптора. Красные окружности вокруг центральных пикселей – радиусы, определяющие размер фильтра Гаусса для усреднения яркости в окрестности пикселя.

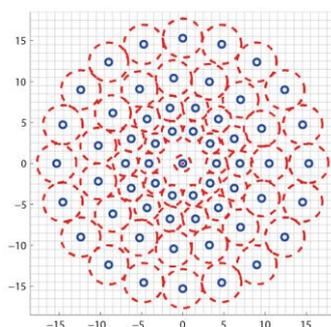


Рис. 4. Шаблон BRISK-дескриптора, использующийся для сравнения яркостей окрестных пикселей

Сопоставление особых точек. Вычисленные при помощи метода BRISK описания особых точек сопоставляются методом полного перебора. То есть, определяются пары соответствий, наиболее близкие по описанию.

Так, пользуясь методом полного перебора, сравниваются описания окрестностей всех точек. Результатом сравнения является количественная оценка разницы окрестностей для всех особых точек двух изображений [11, 12]. Полученное множество пар соответствий может быть фильтровано по относительному порогу:

$$f(dif) = 1 - \frac{dif}{desc_len'}$$

$$\begin{cases} match = true, & \text{когда } f(dif) \geq threshold \\ match = false, & \text{когда } f(dif) < threshold' \end{cases}$$

где dif – величина разницы описаний, $desc_len$ – длина дескриптора, $threshold$ – порог истинности соответствий, а $match$ – проверяемое соответствие. Таким образом из всего множества соответствий при фильтрации выбираются пары, различающиеся не более чем пороговое значение своими описаниями [13, 14].

3. Проведение экспериментов. Три различных типа особых точек были детектированы на двух кадрах – кадр-эталон и этот же кадр, только повернутый на 15° против часовой стрелки. Найденные особые точки были объединены в один общий вектор для каждого кадра [14]. Результаты поиска приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Обнаружение в первом кадре

Тип детектора	Время выполнения, с	Количество найденных точек, шт
GFTT	0,041	500
MSER	0,456	461
BRISK	0,329	500

Таблица 2

Обнаружение во втором кадре

Тип детектора	Время выполнения, с	Количество найденных точек, шт
GFTT	0,032	500
MSER	0,426	508
BRISK	0,297	500

Далее, для обобщенных векторов вычислялись дескрипторы методом BRISK. На выходе алгоритма детектирования BRISK некоторые точки на краях изображений отбрасывались дескриптором, как невозможные к вычислению [15]. Для ОТ первого кадра было отброшено 120, для второго – 90. Время вычисления дескрипторов и их сопоставления указано в табл. 3.

Таблица 3

Время вычисления дескрипторов их сопоставления

Операция	Время выполнения, с
Вычисление дескрипторов 1-го кадра	0,0256
Вычисление дескрипторов 2-го кадра	0,0259
Сопоставление полученных векторов	0,0000119

Два полученных обобщенных вектора сопоставлялись методом полного перебора.

С целью исследования сопоставленные пары были разбиты на 4 класса:

- ◆ класс 1 – пары уголок-уголок;
- ◆ класс 2 – пара блоб-блоб;
- ◆ класс 3 – пара BRISK-BRISK;
- ◆ класс 4 – пара, в которой присутствуют два различных типа ОТ.

В результате сопоставления объединенных векторов особых точек получили следующие результаты:

- ◆ Количество пар класса 1 – 405.
- ◆ Количество пар класса 2 – 269.
- ◆ Количество пар класса 3 – 386.
- ◆ Количество пар класса 4 – 281.

Следовательно, уголки совмещаются с уголками с наибольшей вероятностью, а блобы напротив менее стабильны при многоклассовом сопоставлении. Результаты сопоставления можно оценить на рис. 5. Четыре класса пар соединены отрезками четырех различных цветов, а размеры ОТ показаны окружностями. Класс 1 – красный, 2 – зеленый 3 – синий и 4-й класс белыми отрезками.

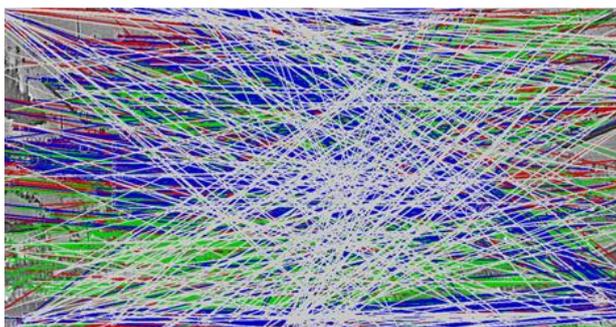


Рис. 5. Общие результаты сопоставления особых точек различных классов

Для приближения к реальным условиям работы, эксперимент был повторно проведен с проведением фильтрации сопоставлений с большим значением разницы описаний [16–18]. Фильтрация проводилась после вычисления дескрипторов.

При фильтрации удалялись все сопоставленные пары, дескрипторы которых отличаются более чем 50-ю результатами бинарных тестов дескриптора.

В итоге повторного эксперимента получили меньше сопоставлений, однако все они абсолютно точны. Были получены следующие результаты:

- ◆ Количество пар класса 1 – 110.
- ◆ Количество пар класса 2 – 30.
- ◆ Количество пар класса 3 – 68.
- ◆ Количество пар класса 4 – 0.

Результаты второго эксперимента схожи с первым: наибольшее количество пар точек одного типа дали уголки, вслед за ними BRISK-точки и последние – блобы. На рис. 6 отображен результат сопоставления второго эксперимента.

Прямыми отрезками соединены пары сопоставлений, окружностями — размеры особых точек. Цвет соответствует классу пары, как и в предыдущем эксперименте. Класс 1 – красный, 2 – зеленый 3 – синий. 4-й класс не имеет экземпляров в этом эксперименте – белых отрезков нет.

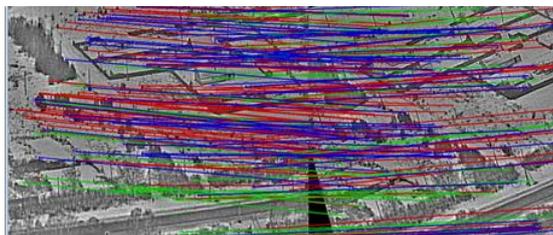


Рис. 6. Фильтрованные результаты сопоставления особых точек различных классов

В качестве выводов к результатам экспериментов необходимо отметить следующее:

- ◆ Объединенные вектора из нескольких типов особых точек могут быть описаны одним BRISK-дескриптором.

- ◆ При сопоставлении объединенных векторов повышается точность – за счет добавления новой информации.

- ◆ В случае сопоставления без фильтрации по значению метрики, велика вероятность ложного сопоставления, а так же сопоставления точек разных типов. При добавлении фильтрации качество сопоставления значительно повышается.

- ◆ Наибольшей устойчивостью при сопоставлении обобщенных векторов обладают точки типа уголок, наименьшей – блобы.

Заключение. Проведенные в работе эксперименты показали возможность использования различных типов особых точек при сопоставлении изображений. Причем использование различных типов особых точек повышает качество сопоставления и универсальность алгоритма в целом. В таблице 4 приведена статистика, полученная на изображениях с подавляющим количеством высоких частот в спектре (высоко детализированных) и напротив, с преобладанием низких частот в спектре. Изображения и данные для оценки истинности сопоставлений брались из наборов данных *homogr* (16 пар) и *EVD* (15 пар), центра машинного восприятия в Праге (ориг. англ. – Center for Machine Perception) [19, 20].

Таблица 4

Доля истинных сопоставлений ключевых точек различных классов на высоко и низко детализированных изображениях.

	Высоко детализированные изображения	Низко детализированные изображения
Класс 1	40%	25%
Класс 2	43%	56%
Класс 3	30%	35%
Класс 4	11%	8%

Так, изображения с подавляющей низкочастотной составляющей, несущие в себе больше особых точек типа блок или регион, или изображения с низким значением отношения сигнал-шум, будут сопоставляться с меньшей точностью при использовании только точек типа уголки. При использовании нескольких типов особых точек следует уделять внимание совместимости используемых типов и объединять типы с учетом их особенностей. Так, особые точки типа регион могут использоваться для получения информации о глобальном, резком изменении сцены в то время как точки типа уголок позволяют проводить точную субпиксельную локализацию самих особых точек и, следовательно, вести более точное сопоставление изображений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tassov K.L., Bekasov D.E.* Обработка перекрытий в задачах отслеживания объектов в видеопотоке // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 6 (18). – С. 1-18.
2. *Harris C., Stephens M.* A combined corner and edge detector // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. – 1988. – С. 147-151.
3. *Lowe D.G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision 60. – 2004. – С. 91-110.
4. *Matas J., Chum O., Urban M., and Pajdla T.* Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions // Proceedings of the British Machine Vision Conference. – 2002. – С. 384-396.
5. *Kaehler A., Bradski G.* Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library // O'Reilly Media. – 2017. – 1024 с.
6. *Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G.* ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF // IEEE International Conference. – 2011. – С. 2564-2571.
7. *Riba E., Mishkin D., Ponsa D., Rublee E., Bradski G.* Kornia: An open source differentiable computer vision library for PyTorch // IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2020. – 2020. – P. 3663-3672.
8. *Морев К.И.* Метод сопоставления особых точек изображений для задач трекинга, основанный на интуиционистской нечеткой логике // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 282-295.
9. *Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.* BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints // Computer Vision (ICCV). – 2011. – P. 2548-2555.
10. *Calonder M., Lepetit V., Strecha C., Fua P.* BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features // 11th European Conference on Computer Vision (ECCV). – 2010. – P. 778-792.
11. *David L.*, Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision, – 1999. – P. 1150-1157.
12. *Salahat E., Qasaimeh M.*, Recent advances in feature extraction and description algorithms: Hardware designs and algorithmic derivatives // Computer Vision: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. – 2018. – 33 p.
13. *Bay H., Tuytelaars T., Gool L.* SURF: Speeded up robust features // European Conference on Computer Vision. – 2006. – P. 404-417.
14. *Bian Lin, Matsushita Yeung, Nguyen Cheng.* GMS: Grid-based Motion Statistics for Fast, Ultra-Robust Feature Correspondence // CVPR. – 2017. – 10 p.
15. *Stauffer C., Grimson W.* Learning patterns of activity using real-time tracking // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – P. 747-757.
16. *Raja Y., Gong S.* Scaling up multi-camera tracking for real-world deployment // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2012. – No. 8546.
17. *Zheng W.-S., Gong S., Xiang T.* Person re-identification by probabilistic relative distance comparison // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2011. – P. 649-656.
18. *Yang M., Wu Y., Hua G.* Context-aware visual tracking // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2006. – No. 31. – P. 1195-1209.
19. *Sundaresan A., Chellappa R.* Multi-camera tracking of articulated human motion using shape and motion cues // IEEE Transactions on Image Processing. – 2009. – P. 2114-2126.
20. *Вражнов Д.А., Шаповалов А.В., Николаев В.В.* О качестве работы алгоритмов слежения за объектами на видео // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – № 2 (4). – С. 303-313.

REFERENCES

1. *Tassov K.L., Bekasov D.E.* Obrabotka perekrytiy v zadachakh otslezhvaniya ob"ektov v videopotoke [Overlapping solving in tracking tasks]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineer magazine: science and innovations], 2013, No. 6 (18), pp. 1-18.
2. *Harris C., Stephens M.* A combined corner and edge detector, *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, 1988, pp. 147-151.
3. *Lowe D.G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision* 60, 2004, pp. 91-110.

4. *Matas J., Chum O., Urban M., and Pajdla T.* Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions, *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, 2002, pp. 384-396.
5. *Kaehler A., Bradski G.* Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library, *O'Reilly Media*, 2017, 1024 p.
6. *Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G.* ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF, *IEEE International Conference*, 2011, pp. 2564-2571.
7. *Riba E., Mishkin D., Ponsa D., Rublee E., Bradski G.* Kornia: An open source differentiable computer vision library for PyTorch, *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2020*, 2020, pp. 3663-3672.
8. *Morev K.I.* Metod sopostavleniya osobykh tochek izobrazheniy dlya zadach trekinga, osnovanny na intuitsionistskoy nechetkoy logike [The method of feature matching for tracking tasks based on intuitionistic fuzzy sets], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2019, No. 1 (203), pp. 282-295.
9. *Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.* BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints, *Computer Vision (ICCV)*, 2011, pp. 2548-2555.
10. *Calonder M., Lepetit V., Strecha C., Fua P.* BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features, *11th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2010, pp. 778-792.
11. *David L.*, Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 1999, pp. 1150-1157.
12. *Salahat E., Qasaimeh M.*, Recent advances in feature extraction and description algorithms: Hardware designs and algorithmic derivatives, *Computer Vision: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, 2018, 33 p.
13. *Bay H., Tuytelaars T., Gool L.* SURF: Speeded up robust features, *European Conference on Computer Vision*, 2006, pp. 404-417.
14. *Bian Lin, Matsushita Yeung, Nguyen Cheng.* GMS: Grid-based Motion Statistics for Fast, Ultra-Robust Feature Correspondence, *CVPR*, 2017, 10 p.
15. *Stauffer C., Grimson W.* Learning patterns of activity using real-time tracking, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, pp. 747-757.
16. *Raja Y., Gong S.* Scaling up multi-camera tracking for real-world deployment, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2012, No. 8546.
17. *Zheng W.-S., Gong S., Xiang T.* Person re-identification by probabilistic relative distance comparison, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011, pp. 649-656.
18. *Yang M., Wu Y., Hua G.* Context-aware visual tracking, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2006, No. 31, pp. 1195-1209.
19. *Sundaresan A., Chellappa R.* Multi-camera tracking of articulated human motion using shape and motion cues, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, pp. 2114-2126.
20. *Vrazhnov D.A., Shapovalov A.V., Nikolaev V.V.* O kachestve raboty algoritmov slezheniya za ob'ektami na video [About quality of tracking algorithms in video], *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie [Computer investigation and modeling]*, 2012, No. 2 (4), pp. 303-313.

Статью рекомендовал к опубликованию профессор С.Л. Беляков.

Морев Кирилл Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: morev-ki@ya.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; аспирант.

Боженюк Александр Витальевич – кафедра информационно-аналитических систем безопасности; д.т.н.; профессор.

Morev Kirill Ivanovich – Southern Federal University; e-mail:morev-ki@ya.ru; 1, Engels street, Taganrog, 347922, Russia; the department of information security systems; graduate student.

Bozhenyuk Alexander Vitalievich – the department of information security systems; dr. of eng. sc.; professor.

И.Б. Аббасов, Р.Р. Дешмух

РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР, РАСТЕНИЙ И ЛЕСНЫХ МАССИВОВ

Представлен обзор некоторых исследований по проблеме распознавания изображений сельскохозяйственных культур, растений и лесных массивов. В этих системах распознавания изображений используются различные методы предварительной обработки, компьютерного зрения, глубокого обучения. В последнее время увеличиваются системы распознавания на основе мобильных устройств, что повышает их доступность и широкое распространение. Рассмотрены статьи по распознаванию, классификации плодов и фруктов в садах, создание банка данных этих аграрных продуктов (яблоки, груши, киви) для оценки созревания и урожайности. Описаны работы посвященные автоматизации сбора урожая зерновых культур на примере работы уборочного комбайна с применением машинного зрения. Растениеводство играет важную роль при обеспечении кормов для животноводства, анализированы статьи по распознаванию сельскохозяйственных растений на основе изображений листьев. Также по состоянию листьев картофельных кустов можно определить их болезни, оценить состояние почвы. Приведены работы по разработке мобильных систем контроля и распознавания процесса выращивания грибов на основе технологии «зеленый дом» для фермерских хозяйств. С помощью дистанционной диагностики можно анализировать и контролировать состояние поверхности суши и морей. Для дистанционного экологического мониторинга ландшафта земной поверхности описаны работы по распознаванию, классификации лесных массивов, водных ресурсов с применением гиперспектрального анализа спутниковых изображений.

Распознавание изображений; распознавание изображений фруктов, плодов, листьев, растений, грибов; глубокое обучение; компьютерное зрение; распознавание ландшафта; гиперспектральный анализ; дистанционный мониторинг

I.B. Abbasov, R.R. Deshmukh

IMAGE RECOGNITION OF AGRICULTURAL CROPS, PLANTS AND FORESTS

The paper provides an overview of some studies on the recognition of images of crops, plants and forests. These image recognition systems use various methods of pre-processing, computer vision, and deep learning. Recently recognition systems based on mobile devices are increasing, which increases their availability and wide distribution. The articles on recognition, classification of fruits and fruits in orchards, the creation of a data bank of these agricultural products (apples, pears, kiwi) to assess ripening and yield are considered. The works devoted to the automation of harvesting grain crops are described on the example of the work of a combine harvester using machine vision. Crop production plays an important role in providing feed for animal husbandry; articles on the recognition of agricultural plants based on leaf images are analyzed. Also, by the condition of the leaves of potato bushes, you can determine their disease, assess the condition of the soil. The work on the development of mobile systems for monitoring and recognition of the process of growing mushrooms based on the "green house" technology for farms is presented. Using remote diagnostics, you can analyze and monitor the state of the surface of land and seas. For remote environmental monitoring of the landscape of the earth's surface, work is described on the recognition, classification of forests, water resources using hyperspectral analysis of satellite images.

Image recognition; recognition of images of fruits, fruits, leaves, plants, mushrooms; deep learning; computer vision; landscape recognition; hyperspectral analysis; remote monitoring.

1. Введение. В повседневной жизни мы уже не обращаем внимание на внедрение систем слежения и распознавания в городской среде. Они в основном связаны с обеспечением безопасности как на дорогах, так и для общественного по-

рядка. Эти системы также активно используются в различных отраслях народного хозяйства, в том числе в сельском хозяйстве для повышения экономической эффективности производства аграрной продукции. Мобильные системы компьютерного зрения могут оценить состояние урожая растениеводства, садоводства. Они используют методы распознавания изображений для классификации объектов и сцен, с применением глубокого обучения и компьютерного зрения. В данной работе представлен обзор и анализ некоторых современных исследований в области распознавания изображений сельскохозяйственных культур, растений и лесных массивов с целью оценки перспектив применения и будущего развития.

2. Распознавание изображений фруктов: яблоки, груши. Технология глубокого обучения успешно применяется в различных областях науки и производства начиная от компьютерного зрения до распознавания речи. В области обработки изображений глубокое обучение используется для анализа сцен и обнаружения объектов. Однако с увеличением плотности сцен задача анализа усложняется. Работа [1] посвящена анализу плотности сцен в сельском хозяйстве. Описываются различные популярные глубокие нейронные сети по анализу плотных сельскохозяйственных сцен [2].

В дальнейшем приводится эффективность данного способа при распознавании, обнаружении, классификации, подсчете и оценке урожайности. Отмечается, что область распознавания сельскохозяйственных сцен с применением глубокого машинного обучения находится ещё в начальном этапе, так как необходима расширенная база данных по классификации различных сельскохозяйственных продуктов [3]. В работе [4] представлены данные по распознаванию плодов яблок и груш на основе анализа более ста фотографий фруктовых деревьев (рис. 1).

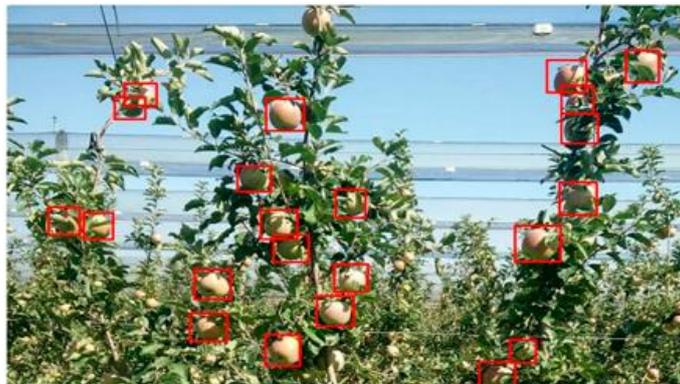


Рис. 1. Анализ сцены в сельском хозяйстве при распознавании изображений фруктов в саду [1, 4]

3. Распознавание плодов киви. Распознавание сельскохозяйственных продуктов является непростой задачей, особенно мало публикаций посвященных распознаванию плодов киви [5, 6]. Киви относится к плодовым культурам растений рода актинидия (лат. *actinidia chinensis*), имеющих вид древовидной лианы родом из Китая, из-за питательности широко культивируется в всем мире. В работе [7] используются цветовые модели для базовой обработки изображения с расширением частотной области. После фильтрации изображения, определяются характеристики ствола, также используется бинокулярная система стереозрения для распознавания плодов, что повышает определение местоположения объектов (рис. 2). Экспериментальные исследования показывают хорошие результаты работы предложенного алгоритма.



Рис. 2. Оригинальная фотография плода киви, обработка с распознаванием краев, результат распознавания изображения [7]

4. Автоматизация сбора урожая кукурузы на основе компьютерного зрения и распознавания растений. В последнее время все больше автоматизируется труд в сельскохозяйственной отрасли. Из-за расширения площадей посадки кукурузы в различных аграрных областях мира возникает ситуация по приспособлению кукурузоуборочного комбайна к конкретным условиям сбора урожая. Кукуруза относится к яровым зерновым, при выращивании в разных климатических условиях расстояние между рядами кукурузы меняется [8].

В статье [9] исследуется метод обработки изображений и математического расчета параметров кукурузных рядов с помощью цифровой камеры слежения (рис. 3). Процесс распознавания основан на поэтапной обработке изображения с применением математических методов для определения расстояния между рядами. Далее проводится калибровка режущего стола самого кукурузоуборочного комбайна. Технологические инновации позволяют автоматизировать процесс уборки урожая и повышать эффективность сбора аграрной продукции.

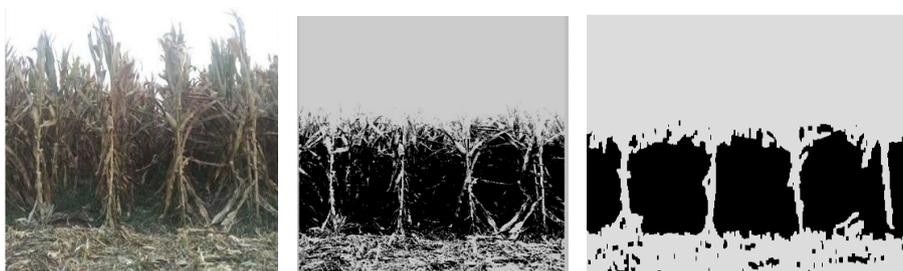


Рис. 3. Этапы последовательной обработки изображений [9]

5. Распознавание и контроль состояния растений на основе листьев. Недревесные растения, сельскохозяйственные травы обеспечивают домашние и фермерские хозяйства важнейшими кормами для животноводства. Для эффективного роста необходим контроль состояния растений и их популяции [10]. Использование ручного метода определения в современных условиях не отвечает требованиям времени, поэтому используются различные способы распознавания и идентификации растений на основе анализа характеристик листьев. Работа [11] посвящена разработке мобильных систем для распознавания и идентификации видов растений (рис. 4). В работе изучаются возможности различных мобильных систем распознавания листьев растений с помощью смартфонов.

В работе [13] рассматриваются различные нейронные сети для распознавания цветов и листьев растений [14, 15]:

- ◆ искусственная нейронная сеть (artificial neural network);
- ◆ вероятностная нейронная сеть (probabilistic neural network);
- ◆ сверточная нейронная сеть (convolutional neural network);

- ◆ по методу k-ближайшего соседа (k-nearest neighbor);
- ◆ поддержка по опорным векторам (support vector machine), и комбинированные методы.

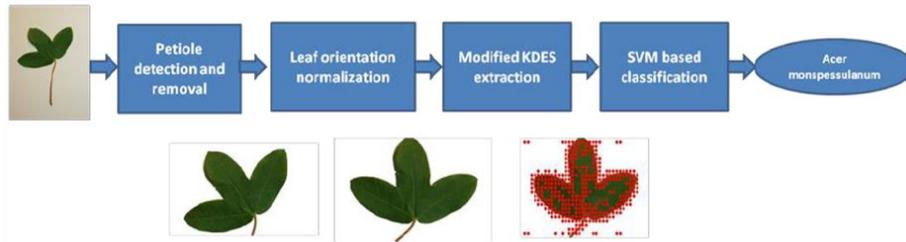


Рис. 4. Методология применения идентификации растений на основе листьев [11, 12]

Использование различных методов при предварительной обработке улучшает процесс классификации листа растения (рис. 5). Качество исходных изображений листьев играет важную роль при их дальнейшем распознавании.

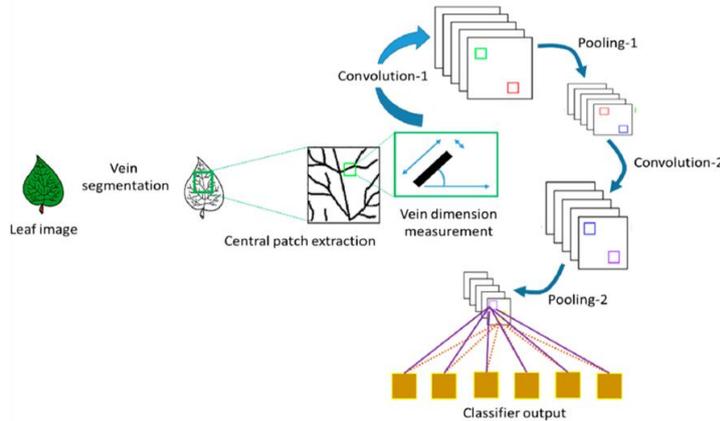


Рис. 5. Распознавание паттернов листьев с помощью сверточной нейронной сети [13]

Работа [16] посвящена анализу болезни листьев растения томата с помощью спектрометра ASD FieldSpec4. На индийскую экономику большое влияние оказывает сельское хозяйство, и согласно данным 30–35 % урожая теряется из-за болезней растений. С помощью гиперспектрального дистанционного зондирования предлагается контролировать состояние растений, выявлять болезни, которые отображаются в рамках узкого диапазона волн. Разработанная технология базируется на определенных признаках, атрибутах болезней растений, которые обнаруживаются в спектре отраженного сигнала. В работе [17] исследуются вопросы дистанционной оценки спектральной отражательной способности сельскохозяйственной почвы. Так как почва играет важную роль при производстве и контроле состояния аграрных культур. Своевременная дистанционная диагностика является более эффективным по сравнению с химическим анализом.

6. Система для контроля процесса выращивания грибов. В настоящее время грибы являются экономически выгодным сельскохозяйственным продуктом с высокой пищевой ценностью. Они являются живыми организмами, сочетающими в себе свойства растений и животных. Грибы играют важную роль в жизни

биосферы нашей планеты, перерабатывая органические материалы, тем самым повышают плодородность почвы. Из-за глобального изменения климата технологические теплицы начинают заменять традиционные способы выращивания грибов. Однако, эти теплицы имеют сложную структуру управления [18]. В статье [19] представлена разработка системы контроля роста и подсчета количества грибов на основе интеллектуальной сверточной нейронной сети. Предложенная система записывает данные о грибах и передает их на мобильный телефон фермера (рис.6), что повышает оперативность, эффективность управления производством.

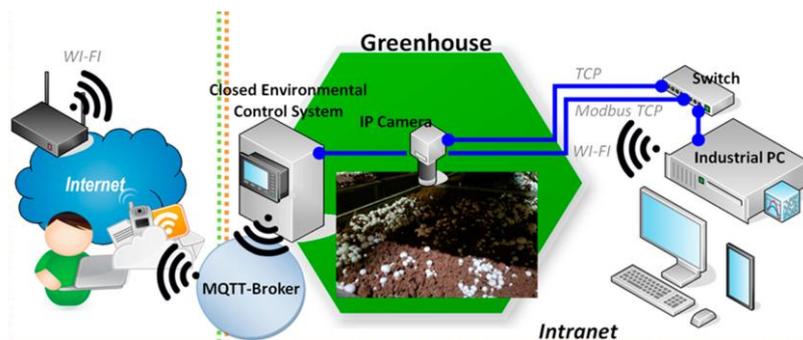


Рис. 6. Структура коммуникации для контроля состояния грибов [19]

7. Распознавание ландшафта по спутниковым изображениям. В статье [20] сравниваются спутниковые снимки 1985 и 1996 годов (рис. 7), которые используются для визуальной интерпретации устья бразильской реки Рио-Парайба [21]. В результате сравнения были выявлены следующие отличия: изменение русла реки Парайба на расстоянии нескольких километров, изменение береговой линии в результате океанского течения, вызванного юго-восточными пассатами, постоянство границ между полями сахарного тростника, пастбищами и остатками оригинальных прибрежных лесов, а также рост территории городских застроенных районов.

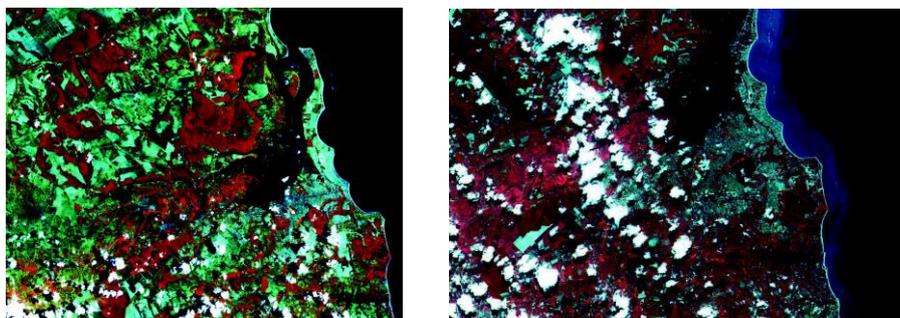


Рис. 7. Спутниковые снимки устья реки Рио-Парайба в 1985 и 1998 годах [20]

Генетический алгоритм предназначен для поиска оптимального решения путем исключения худшего варианта из генных последовательностей с использованием функции эффективности [22]. Этот алгоритм хорошо работает при классификации изображений без деталей. В статье [23] предлагается новый гибридный алгоритм повышения точности и надежности классификации спутниковых изображений. На примере изображения водохранилища демонстрируется эффективность предложенного метода по распознаванию объектов землепользования (рис. 8).

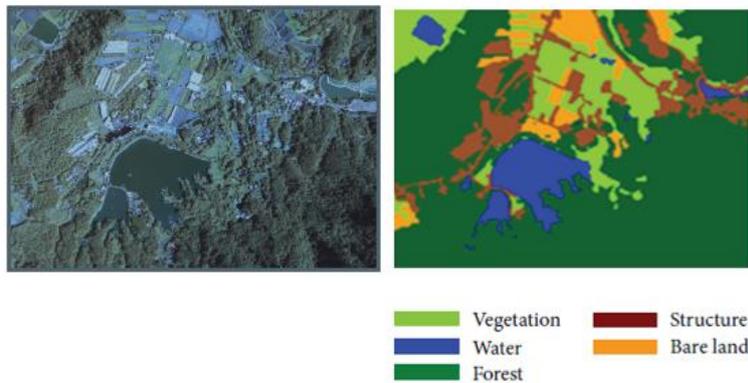


Рис. 8. Аэрофотоснимок местности и результат анализа изображения [23]

Для картирования земной поверхности и оценки экологического состояния часто используется дистанционное зондирование с помощью спутников. С каждым годом качество спутниковых снимков повышается, увеличивается разрешение этих изображений [24]. Более эффективным становится распознавание, классификация и обнаружение объектов на основе метода глубокого обучения. В статье [25] представлен подробный обзор по классификации ландшафта поверхности земли для обнаружения объектов на базе изображений с высоким разрешением. Методы на основе глубокого обучения обеспечивают комплексное решение, используя пространственную и спектральную информацию (рис. 9). Особенно для различной растительности этот метод является более производительным и точным по сравнению с традиционным методом на основе пикселей.

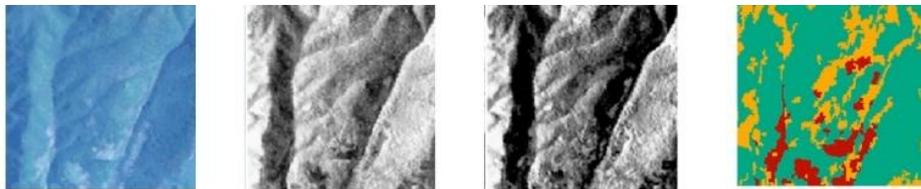


Рис. 9. Ландшафт земной поверхности в различных вариантах для обучения модели: режимы видимый диапазон, красные кромки, ближний инфракрасный и в метках земного покрова [25]

В статье [26] предлагается эффективный метод классификации изображений при мониторинге с использованием беспилотного летательного аппарата. В качестве изображений используются аэрофотоснимки различных ландшафтов с содержанием леса, лугов, рек и зданий. Используется информация по цветовым каналам текстур, содержащих статические и фрактальные характеристики. Обучающая система учитывает различные параметры объектов для классификации текстур поверхности.

Статья [27] посвящена обзору методов дистанционной диагностики поверхности земли, особенно водной части – поверхности океана. На основе дистанционного анализа можно определить состояние водной среды, выявить физические параметры, оценить температуру, на основе цвета определить питательность водных масс, содержание биоресурсов.

8. Распознавание лесных массивов в гиперспектральных изображениях.

Работы [28–31] посвящены алгоритмам распознавания объектов лесного покрова на гиперспектральных аэрокосмических изображениях. При обработке гиперспектральных изображений распознавание природно-техногенных объектов осуществляется по их спектральным и текстурным признакам. Приведены примеры сравнения этих классификаторов, метрического классификатора и классификатора на основе метода «к-взвешенных соседей».

На рис. 10, внизу представлен результат распознавания исходного гиперспектрального изображения разработанным методом, где синий цвет – вода, желтый – песок, черный – дорожное покрытие, темно-зеленый – сосновые древостои, светло-зеленый – березовые древостои, оранжевый – осиновые древостои, красный – травянистая растительность, фиолетовый – прочие объекты.

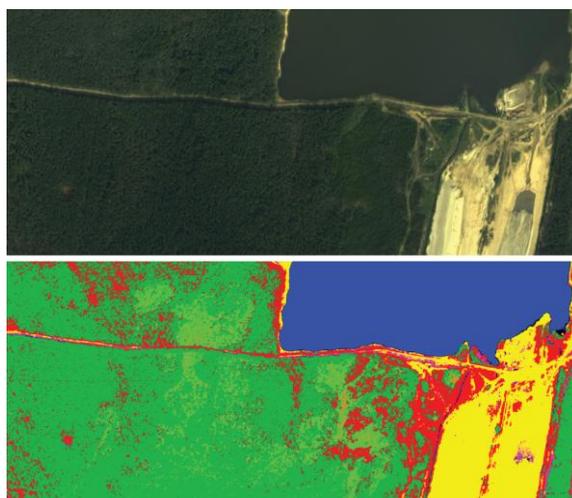


Рис. 10. Исходное гиперспектральное изображение и результат распознавания объектов на нем с помощью метода «к-взвешенных соседей» [28]

Работа [32] посвящена анализу состояния городских лесных зон с целью контроля экосистемы методом дистанционного зондирования [33]. Дистанционное зондирование используется на основе трех способов: разные по источникам, разные по времени, и разные по масштабу. Результаты комбинированных оптических изображений и данных лидаров (LiDAR) являются наиболее перспективными (рис. 11). Методы по удалению тумана позволят повысить качество спутниковых снимков.



Рис. 11. Примеры совмещенных спутниковых снимков и данных облака точек LiDAR на районном уровне города [32]

Для мониторинга окружающей среды эффективно использовать системы гиперспектральной визуализации [34, 35]. В статье [36] разрабатывается мобильная система гиперспектральных датчиков наземного применения. Эти устройства становятся все более компактными и мобильными, что повышает их ценность при автономном мониторинге (рис. 12). Они облегчают доступ к технологиям гиперспектрального мониторинга, значительно ускоряя процесс получения данных.

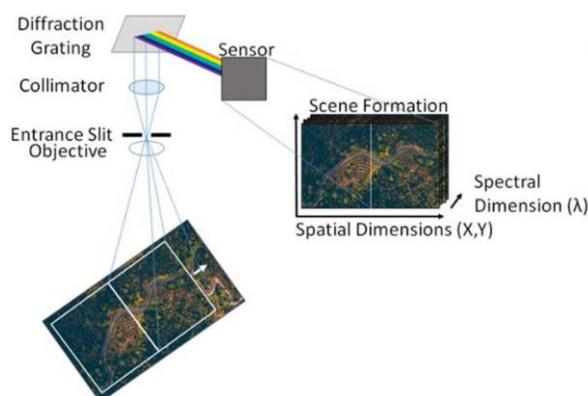


Рис. 12. Схема датчика кадрирования при дистанционном зондировании [36]

9. Анализ исследований. Достаточно часто в задачах распознавания используется метод глубокого обучения, на примере классификации фруктов, объектов ландшафта на спутниковых изображениях. Этот метод становится малоэффективным при повышении плотности классифицируемых объектов, требуется увеличение базы данных для обучения.

Для многих случаев классификации более эффективным становится комбинирование методов предварительной обработки и дальнейшего распознавания на основе нейронных сетей. Для гиперспектральных изображений предварительно проводится классификация по спектральным и текстурным признакам, дальнейшая классификация осуществляется методом «к-взвешенных соседей». В случае дистанционной диагностики состояния растений томата определяется частотный диапазон, характеризующий болезни листьев растения.

Для задач распознавания плодов киви проводится предварительная обработка с использованием цветовых моделей при определении характеристик стволов, в дальнейшем применяется бинокулярная система машинного стереозрения для распознавания плодов киви.

При работе кукурузоуборочного комбайна предварительно осуществляется определение расстояния между рядами на основе данных от цифровой камеры слежения.

Для распознавания цветов и листьев растений в разработанном мобильном приложении используется предварительная обработка и дальнейшее распознавание с помощью нейронных сетей. Мобильное приложение на базе смартфонов по контролю за выращиванием грибов использует интеллектуальную сверточную нейронную сеть.

Поэтому можно отметить, что сегодня нейронные сети являются наиболее перспективным направлением при распознавании образов и компьютерном зрении для решения различного рода задач.

Заключение. В данной работе были рассмотрены некоторые статьи, посвященные вопросам распознавания изображений в аграрной отрасли и мониторинга лесных массивов. Были описаны статьи по разработке методов распознавания сельскохозяйственных сцен с фруктами, плодами и растениями. Отмечены современные системы распознавания на базе мобильных устройств. Также были описаны дистанционные методы мониторинга ландшафта с лесным покровом и водоемами на основе гиперспектрального анализа. В результате анализа и перспектив развития систем распознавания, можно отметить, что они все часто приспособляются к потребностям индивидуальных пользователей, фермеров. Процесс распознавания аграрной продукции происходит в реальном режиме с использованием приложений для мобильных устройств. Появление таких программных разработок позволит увеличить эффективность производства сельскохозяйственной продукции, ускорить процесс управления и внедрения мобильных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang Q., Liu Y., Gong C., Chen Y., Yu H. Applications of Deep Learning for Dense Scenes Analysis in Agriculture: A Review, *Sensors*, 2020, Vol. 20, 1520. 33 p. DOI: 10.3390/s20051520.
2. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations: concepts and components, *Biosyst. Eng.*, 2016, Vol. 149, pp. 94-111. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014.
3. Kelman E.E., Linker R. Vision-based localisation of mature apples in tree images using convexity, *Biosyst. Eng.*, 2014, Vol. 118, pp. 174-185. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2013.11.007.
4. Bresilla K., Perulli G.D., Boini A., Morandi B., Corelli Grappadelli L., Manfrini L. Single-Shot Convolution Neural Networks for Real-Time Fruit Detection Within the Tree//Front, *Plant Sci.*, 2019, No. 10, pp. 611. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00611>.
5. Yongjie C. Recognition and feature extraction of kiwifruit in natural environment based on machine vision, *Trans. Chin. Soc. Agric.*, Mach. 2013, Vol. 44 (5), pp. 247-252.
6. Fu L., Feng Y., Elkamil T. et al. Image recognition method of multi-cluster kiwifruit in field based on convolutional neural networks, *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2018, No. 34 (2), pp. 205-211.
7. Liu D., Shen J., Yang H. et al. Recognition and localization of actinidia arguta based on image recognition, *J Image Video Proc.*, 2019, No. 21 (2019). Available at: <https://doi.org/10.1186/s13640-019-0419-6>.
8. Shimmers K.J., Boettcher G.C., Holfman D.S., et al. Single-pass harvest of corn grain and stover: performance of three harvester configurations[J].*Transactions of the ASABE*, 2009, Vol. 52 (1), pp. 51-60.
9. Song Xiangwen, Cao Shukun, Wang Chong, Xu Xiangqian, Han Tao and Guo Hejia. Automatic 9 Row Corn Harvester Based on Labview Image Recognition IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1098 (2018) 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1098/1/012016.
10. Sun Y., Liu Y., Wan, G., Zhang H. Deep Learning for Plant Identification in Natural Environment, *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2017, Article ID 7361042, 6 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2017/7361042>.
11. Shaikh N.A., Mallah G.A., Karas, I.R., Akay A.E. Using mobile image recognition system for nonwood species identification in the field, *Journal of Innovative Science and Engineering*, 2018. No. 2 (2), pp. 40-50. DOI: 10.38088/jise.498910.
12. Le T., Tran D., Hoang V. Fully automatic leaf-based plant identification, application for Vietnamese medicinal plant search. SoICT '14, December 04-05, 2014, Hanoi, Vietnam. Available at: <https://doi.org/10.1145/2676585.2676592>.
13. Azlah M.A.F., Chua L.S., Rahmad F.R., Abdullah F.I., Wan Alwi S.R. Review on Techniques for Plant Leaf Classification and Recognition, *Computers*, 2019, No. 8, 77, 22 p.
14. Sabu A., Sreekumar K. Literature review of image features and classifiers used in leaf based plant recognition through image analysis approach, *In Proceedings of the 2017 International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT), Coimbatore, India, 10-11 March 2017*, pp. 145-149.

15. Munisami T., Ramsurn M., Kishnah S., Pudaruth S. Plant Leaf Recognition Using Shape Features and Colour Histogram with K-nearest Neighbour Classifiers, *Procedia Comput. Sci.*, 2015, Vol. 58, pp. 740-747.
16. Sapate N.M., Deshmukh R.R. Spectral and Numerical Analysis of Hyper spectral Data using Vegetation Indices, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, August 2019, Vol. 8, Issue-6. DOI: 10.35940/ijeat.F8578.088619.
17. Gaikwad C.M., Kakarwal S.N., Ghule A.N., Deshmukh R.R., Kurmude D.V. Use of spectral reflectance for sensitive waveband determination for soil organic matter, *International Journal of Scientific and Technology Research*, 2019, No. 8 (10), pp. 1071-1075.
18. Wu W.-H., Zhou L., Chen J., Qiu Z., He Y., GainT. A measurement system of thousand kernel weight based on the android platform, *Agronomy*, 2018, No. 8, pp. 178.
19. Lu C.-P., Liaw J.-J., Wu T.-C., Hung T.-F. Development of a Mushroom Growth Measurement System Applying Deep Learning for Image Recognition, *Agronomy*, 2019, No. 9, 32, 21 p. DOI: 10.3390/agronomy9010032.
20. Ulbricht K.A., Heckendorff W.D. Satellite images for recognition of landscape and landuse changes, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, Vol. 53, Issue 4, pp. 235-243, [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(98\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(98)00006-9)
21. Teotia H.S., Ulbricht K.A., Civco D.L. The integration of remote sensing and GIS technologies for land development and irrigation potential in the state of Ceara, Brazil. In: Proceedings of the XVII ISPRS Congress, Washington D.C. Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing. 1992. 29 (B7), pp. 466-472.
22. Bazi Y., Melgani F., Bruzzone L., Vernazza G. A genetic expectation-maximization method for unsupervised change detection inmultitemporal SAR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 2009, Vol. 30, No. 24, pp. 6591-6610.
23. Yang Ming-Der, Yeh-Fen Yang, Tung-Ching Su, and Kai-Siang Huang. Hindawi Publishing Corporation, *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Article ID 264512, 12 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/264512>.
24. Huang B., Zhao B., Song Y. Urban land-use mapping using a deep convolutional neural network with high spatial resolution multispectral remote sensing imagery, *Remote Sens. Environ.*, 2018, Vol. 214, pp. 73-86.
25. Zhang X., Han L., Han L., Zhu L. How Well Do Deep Learning-Based Methods for Land Cover Classification and Object Detection Perform on High Resolution Remote Sensing Imagery? *Remote Sens.*, 2020, No. 12, 417, 29 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12030417>.
26. Popescu D., Ichim L. Image Recognition in UAV Application Based on Texture Analysis. In: Battiato S., Blanc-Talon J., Gallo G., Philips W., Popescu D., Scheunders P. (eds) *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. ACIVS 2015. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9386. Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-25903-1_60.
27. Abbasov I.B., Deshmukh R.R. Methods of remote diagnostic of water surface, *In the Proceeding: "Computer and information technologies in science, engineering and management "ComTech-2019": Materials of the Russian scientific and technical conference with international participation*, 2019, pp. 477-481. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41333265>.
28. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. Comparative analysis of recognition algorithms for forest cover objects on hyperspectral aerospace images, *Earth exploration from space*, 2016, No. 6, pp. 45-55. DOI: 10.7868/S020596141606004X.
29. Kozoderov V.V., Dmitriev E.V. Patterns of recognition and assessment of the state of forest vegetation from hyperspectral data of remote sensing, *Research of the Earth from Space*, 2017, No. 6, pp. 75-88. DOI: 10.7868/S0205961417060070.
30. Kozoderov, V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. Hyperspectral remote sensing imagery processing focused on forest applications, *International Review of Aerospace Engineering*, October 2017, Vol. 10, Issue 5, pp. 267-276.
31. Kozoderov V.V., Egorov V.D. Recognition of types of forest vegetation by hyperspectral aircraft and multi-channel satellite data of high spatial resolution. Comparison of results and assessment of their accuracy, *Research of the Earth from Space*, 2019, No. 6, pp. 89-102 <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019689-102>
32. Li X., Chen W.Y., Sanesi G., Laforteza R. Remote Sensing in Urban Forestry: Recent Applications and Future Directions, *Remote Sens.*, 2019, No. 11 (10), 1144; 20 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs11101144>.

33. Roman L.A., Pearsall H., Eisenman T.S., Conway T.M., Fahey R.T., Landry S., Vogt J., van Doorn N.S., Grove J.M., Locke D.H., et al. Human and biophysical legacies shape contemporary urban forests: A literature synthesis, *Urban For. Urban Green*, 2018, Vol. 31, pp. 157-168.
34. Govender M., Chetty K., Bulcock H. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies, *Water SA*, 2017, Vol. 33, pp. 145-152.
35. Khan M.J., Khan H.S., Yousaf A., Khurshid K., Abbas A. Modern trends in hyperspectral image analysis: A review, *IEEE Access*, 2018, No. 6, pp. 14118014129.
36. Stuart M.B., McGonigle A.J.S., Willmott J.R. Hyperspectral Imaging in Environmental Monitoring: A Review of Recent Developments and Technological Advances in Compact Field Deployable Systems, *Sensors*, 2019, No. 19, 3071, 17 p. DOI: 10.3390/s19143071.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Бутенко.

Аббасов Ифтихар Балакишиевич – Южный федеральный университет; e-mail: iftikhar_abbasov@mail.ru; г. Таганрог, ул. Чехова, 22Б; тел.: +79185115574; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; профессор.

Дешмух Ратнадип Р. – Университет Маратвады им. доктора Бабасахеб Амбедкара; e-mail: rrdeshmukh.csit@bamu.ac.in; Аурангабад, Индия; тел.: 9423147466; кафедра компьютерных наук и информационных технологий; профессор.

Abbasov Iftikhar Balakishievich – Southern Federal University; e-mail: iftikhar_abbasov@mail.ru; phone: +79185115574; the department of engineering graphics and computer design; professor.

Deshmukh Ratnadeep R. – Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University; e-mail: rrdeshmukh.csit@bamu.ac.in; Aurangabad, India; phone: 9423147466; the department. of computer science and IT; professor.

Раздел V. Электроника и нанотехнологии

УДК 666.655

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-213-219

М.А. Мараховский, А.А. Панич, В.А. Мараховский ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДОВ ИНТЕНСИВНОГО СПЕКАНИЯ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Исследована возможность вариации свойств пьезоэлектрических керамик разного типа назначения. Цель исследования заключалась в вариации свойств путём изменения технологических факторов при изготовлении пьезокерамики без модифицирования их химического состава. На важнейшем технологическом этапе – спекании – задаются плотность, твёрдость и прочность пьезокерамики, непосредственно влияющие на её электрофизические параметры, т.к. пьезоэффект – это электромеханическое преобразование. Особенный интерес представляют методы спекания объединяющие процесс консолидации частиц с нагревом – горячее прессование и искровое плазменное спекание. Такие методы, за счёт создаваемого одноосного давления, интенсифицируют диффузионные процессы массопереноса при спекании, способствуя получению пьезокерамики повышенной плотности при одновременном понижении температур спекания. Однако, в отличие от горячего прессования, при искровом плазменном спекании между частицами порошка возникают искровые разряды, что в сочетании со сверхбыстрым нагревом (до 1000 °С/мин), формирует мелкозернистую монофазную структуру керамики. Такая микроструктура способствует повышению механических и электрофизических параметров получаемой керамики. Задача исследования состояла в апробации предлагаемых методов спекания на пьезоэлектрических материалах различных составов с целью управления их свойствами. В качестве объектов исследования использовались пьезокерамические материалы на основе системы цирконат-титаната-свинца и их модификации, в том числе многокомпонентные, имеющие высокий прикладной потенциал, а также бессвинцовый сегнетоэлектрический материал $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$ (BST). Методом растровой электронной микроскопии установлены зависимости формируемой керамической структуры от метода спекания и от температуры процесса. Установлены закономерности «метод спекания – микроструктура – свойства». В результате исследования подтверждена эффективность методов горячего прессования и искрового плазменного спекания в целях вариации свойств пьезокерамики различного типа назначения, что в совокупности с понижением температур спекания, а также сокращением длительности процесса (в 36 раз!) актуально с точки зрения энергосбережения.

Пьезокерамика; горячее прессование; искровое плазменное спекание; микроструктура; электрофизические параметры.

М.А. Marakhovskiy, A.A. Panich, V.A. Marakhovskiy THE PROSPECTS FOR INTENSIFICATION OF SINTERING OF PIEZOCERAMIC MATERIALS

The paper investigates the possibility of changing the properties of piezoelectric ceramics for various purposes. The aim of the study is to correct properties by changing technological factors in the manufacture of piezoceramics without modifying their chemical composition. At the most important technological stage – sintering – the density, hardness and strength of piezoceramics are formed, which directly affect its electrophysical parameters, since the piezoelectric effect is an Electromechanical transformation. Of particular interest are sintering methods that combine the process of compaction of particles with heating - hot pressing and spark plasma sintering. Such methods, due to the created uniaxial pressure, activate the diffusion processes of mass transfer during sintering, contributing to the production of high-density piezoceramics while lowering the sintering tem-

peratures. However, unlike hot pressing, spark plasma sintering generates spark discharges between the powder particles, which, in combination with ultra-fast heating (up to 1000 °C/min), forms a fine-grained monophasic structure of ceramics. This microstructure increases the mechanical and electrophysical parameters of the resulting ceramics. The aim of the study was to test the proposed sintering methods on piezoelectric materials of different compositions in order to control their properties. The objects of research were piezoceramic materials based on the zirconate-titanate-lead system and their modifications, including multicomponent materials with high application potential, as well as lead-free ferroelectric material $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$ (BST). The dependences of the formed ceramic structure on the sintering method and temperature were determined using scanning electron microscopy. The regularities of "sintering method – microstructure – properties" are established. The effectiveness of hot pressing and spark plasma sintering methods for correcting the properties of piezoceramics of various types of applications has been confirmed, which together with a decrease in sintering temperatures, as well as a reduction in the duration of the process (by 36 times!) relevant for energy saving purposes.

Piezoelectric ceramics; hot pressing; spark plasma sintering; microstructure; and electrical properties.

Введение. Большой практический интерес к пьезоэлектрической керамике на основе системы цирконат-титаната свинца (ЦТС) обусловлен экстремумами физических свойств системы вблизи морфотропной области – области структурного тетрагонального ромбоэдрического перехода [1–2]. Твёрдые растворы системы ЦТС, расположенные вблизи морфотропной области послужили основой для большинства пьезокерамических материалов разработанных для самых различных применений. Улучшение электромеханических свойств, изменение температуры Кюри, напряженности коэрцитивного поля и других параметров в связи с конкретными применениями проводится за счёт модифицирования химического состава пьезоэлектрической керамики [2–3]. Но еще в начале 70-х годов стало ясно, что возможности модифицирования системы ЦТС практически исчерпаны, и был сделан новый шаг в разработке пьезоматериалов от двухкомпонентной и трёхкомпонентных систем к многокомпонентным системам на основе ЦТС. Также существует множество перовскитовых пьезоэлектрических составов на основе $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ и $(Na, K)NbO_3$ и других нашедших практическое применение [2, 4]. Но наивысший рейтинг среди пьезоэлектрических керамик, производимых в мире, остаётся за материалами на основе системы ЦТС [5].

Однако изменение электрофизических параметров пьезоэлектрической керамики может быть достигнуто не только созданием новых химических составов, но и путем вариации технологических факторов. Плотность, твёрдость и прочность пьезокерамики формируются когда проводится технологический этап «Спекание». Следовательно, от условий спекания зависят будущие электрофизические параметры пьезокерамики, поскольку, пьезоэффект – электромеханическое явление [2, 6]. Среди множества вариантов особенный интерес представляют методы интенсивного спекания пьезоэлектрической керамики: горячее прессование (ГП) и искровое плазменное спекание (ИПС) [7–11]. Обозначенные методы спекания повышают плотность пьезоэлектрической керамики и снижают температуру её спекания.

Экспериментальная часть. Метод ИПС был успешно опробован на сегнетокерамике системы титаната бария-стронция используемой в качестве переключающих и управляющих элементов техники сверхвысокочастотных (СВЧ) диапазонов 0,7–30 GHz взамен полупроводниковых и ферритовых устройств имеющих существенные недостатки. Однако, использование сегнетокерамики состава $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$ (BST) в ускорительной технике требует подавления гистерезисных явлений и снижения диэлектрических потерь ($tg\delta$). В связи с этим в состав сегнетокерамики BST вводятся различные примеси (Mg, Mn, титанат-магния и др.) [12–14]. Спекание проводилось традиционным способом в камерной печи (АТМ), а также методом ИПС, обеспечивающим мелкозернистую монофазную керамическую структуру, оказывающую непосредственное влияние на диэлектрические характеристики сегнетокерамики BST (рис. 1).

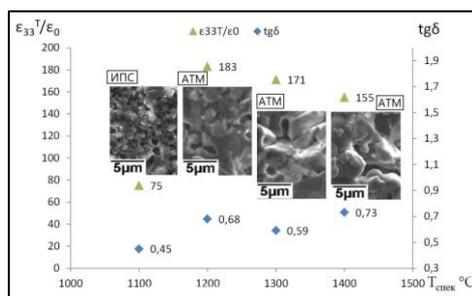


Рис. 1. Диэлектрические характеристики и микроструктура сегнетокерамики BST

Спекание сегнетокерамики BST с добавкой Mg методом ИПС способствовало сокращению диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) на 40%, а диэлектрической проницаемости (ϵ) на 50 % по сравнению с сегнетокерамикой полученной методом АТМ. Такие изменения положительно влияют на эффективность устройств СВЧ техники [13].

Наряду с общеизвестными пьезоэлектрическими материалами системы ЦТС в последнее время представляют высокий интерес сегнетомягкие пьезоматериалы системы $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT), которые характеризуются высокими значениями электрофизических параметров и находят применение в многослойных конденсаторах с повышенными значениями диэлектрической проницаемости, актуаторах прецизионного перемещения, а также высокочувствительных преобразователях. Однако материалы этой системы имеют проблемы, возникающие в процессе изготовления (появление кристаллической структуры пирохлора при синтезе материала и др.) [15–17]. С целью ликвидации указанных проблем при изготовлении, а также повышения механических и электрофизических характеристик, было проведено спекание методами ГП и ИПС (рис. 2).

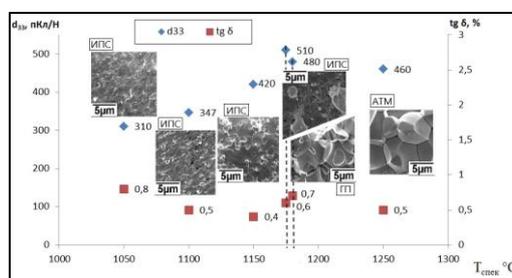


Рис. 2. Основные характеристики и микроструктура пьезоэлектрической керамики PMN-PT

Пьезокерамические образцы системы PMN-PT, полученные методом ИПС, имели повышенные значения электрофизических параметров по сравнению с керамикой того же состава спеченной при атмосферном давлении в обычной камерной печи и керамикой полученной методом ГП. Такое поведение пьезокерамического материала можно объяснить формированием однородной мелкозернистой микроструктуры керамики в процессе спекания, поскольку в методе ИПС сильно подавляется процесс роста зёрен. Метод ГП также обеспечивает повышенные значения пьезоэлектрического модуля d_{33} по сравнению со спеканием в атмосферном давлении, но ниже, чем при методе ИПС [18].

Преобразователи, работающие в режиме излучения, пьезотрансформаторы и устройства силового ультразвука основываются на сегнетожестких пьезокерамических материалах [19]. В зависимости от условий использования требуются опре-

деленные наборы электрофизических параметров пьезокерамических материалов. Была исследована возможность управления свойствами сегнетожесткой пьезоэлектрической керамики многокомпонентного состава $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ - $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ за счёт корректировки процесса формирования микроструктуры на этапе спекания. Использован метод ГП и современный перспективный метод ИПС при изготовлении пьезоэлектрической керамики, способствовавшие повышению как механических, так и электрофизических параметров, наряду со снижением температуры процесса на 200°C (рис. 3).

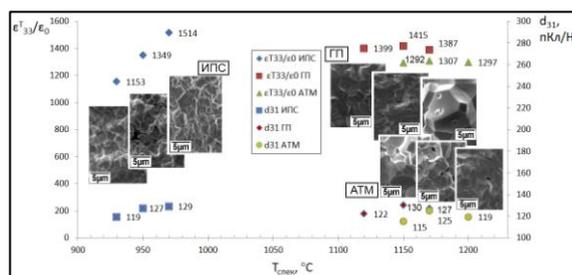


Рис. 3. Основные характеристики и микроструктура пьезоэлектрической керамики $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ - $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$

Сегнетожесткая пьезоэлектрическая керамика полученная методом ГП и ИПС обладала повышенными значениями относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ на 8 и 16 %, соответственно, пьезоэлектрического модуля d_{31} на 4 %, относительно значений полученных традиционным спеканием в камерной печи [20].

В последнее время большое внимание уделяется новому поколению пьезокерамических материалов – многокомпонентным системам, характеризующимся повышенными электрофизическими характеристиками и предназначенным для изготовления многослойных актюаторов. С целью повышения технологичности пьезокерамического многокомпонентного материала $PbTiO_3$ – $PbZrO_3$ – $Pb(Ni_{1/2}W_{1/2})O_3$ – $Pb(Cd_{1/2}W_{1/2})O_3$ – $Pb(Bi_{2/3}W_{1/3})O_3$ – $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ – $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, с температурой спекания ниже 1000°C , были использованы методы ГП и ИПС (рис. 4). Микроструктура пьезоэлектрической керамики полученной методами АТМ, ГП и ИПС подтверждает возможность управления процессом формирования мелкозернистой структуры керамики. Плотная керамическая структура формируется уже при температуре спекания 850°C .

В результате исследования установлено, что предпочтительным методом спекания пьезокерамики является ИПС. При таком способе температура спекания керамических образцов может быть снижена до 900°C , с сохранением, а иногда и превышением основных характеристик пьезоэлектрической керамики в сравнении с методом АТМ [21].

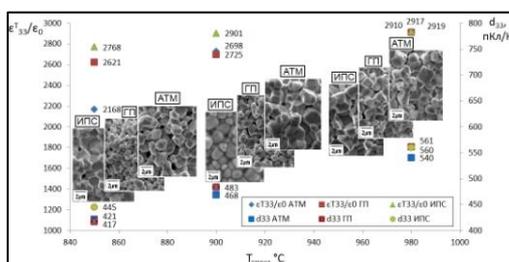


Рис. 4. Основные характеристики и микроструктура пьезоэлектрической многокомпонентной керамики

Заключение. Использование методов ГП и ИПС при получении пьезоэлектрической керамики способствует формированию плотной микроструктуры, положительно влияющей на основные электрофизические и диэлектрические характеристики. При этом, температуры спекания снижаются. Большим потенциалом обладает метод ИПС, не только понижающий температуру процесса спекания на 200 °С, но и сокращающий продолжительность изотермической выдержки (в 36 раз!). Это не только положительно сказывается на энергосбережении, но и повышает эффективность пьезоэлектрической керамики различного типа назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кутриянов М.Ф., Константинов Г.М., Панич А.Е.* Сегнетоэлектрические морфотропные переходы. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1991.
2. *Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н.* Новые пьезокерамические материалы. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1983.
3. *Тололов В.Ю., Панич А.Е.* Электромеханические свойства сегнетопьезокерамик на основе оксидов семейства перовскита // Исследовано в России. – 2008. – Рег. N 002. – С. 8-26.
4. *Keramik/Hrsq. H. Schaumburg. – Stuttgart: B.G. Tenbner, 1994.*
5. *Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В.* Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (доступ свободный).
6. *Поплавко Ю.М. [и др.].* Физика активных диэлектриков. – Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 2009. – 480 с.
7. *Marder R., Caim R., Estournès C., Chevallier G.* Plasma in spark plasma sintering of ceramic particle compacts // Scripta materialia. – 2014. – Vol. 82. – P. 57-60.
8. *Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M.* The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method // Journal of Materials Science. – 2006. – Vol. 41. – P. 763-777.
9. *Пыина А.М., Александрова Е.В., Григорьев Е.Г., Олевский Е.А.* Influence of the electric current on the spark-plasma sintering processing // Journal of Vector Science. – 2013. – No. 3 (25). – P. 185-187.
10. *Анненков Ю.М., Акарачкин С.А., Иващутенко А.С.* Механизм искрового плазменного спекания керамики // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т. 30 (4). – С. 74-78.
11. *Токита М.* Тенденции в развитии систем искрового плазменного спекания и технологии // Журнал общества специалистов порошковых технологий. – 1993. – № 30 (11). – С. 790-804.
12. *Вендик О.Г., Дедык А.И., Дмитриева Р.В. и др.* Гистерезис диэлектрической проницаемости титаната стронция при 4,2 К // ФТТ. – 1984. – Т. 26. – Вып. 3. – С. 684-689;
13. *Мараховский М.А., Панич А.А., Мараховский В.А.* Исследование характеристик сегнето-керамики титаната бария-стронция, полученной методом искрового плазменного спекания // INTERMATIC-2018. Ч. 2. – М., 2018. – 430 с.
14. *Ненашева Е.А., Канарейкин А.Д., Дедык А.И., Павлова Ю.В.* Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST – Mg для применения в ускорительной технике // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – Вып. 8. – С. 1468-1472.
15. *Yamada H.* Pressureless sintering of PMN-PT ceramics // Journal of the european ceramic society. – 1999. – Vol. 19 (6-7). – P. 1053-1056.
16. *Lente M.H., Zanin A.L., Assis S.B., Santos I.A., Garcia D., Eiras J.A.* Ferroelectric domain dynamics in PMN-PT ceramics // Ferroelectrics. Gordon and Breach Science Publishers. – 2003. – Vol. 296. – P. 149-155.
17. *Liou Y.C.* Stoichiometric perovskite PMN-PT ceramics produced by reaction-sintering process // Materials science and engineering: B. – 2003. – Vol. 103 (3). – P. 281-284.
18. *Мараховский М.А., Панич А.А.* Получение пьезокерамики системы PMN-PT методом искрового спекания // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 6 (191). – С. 242-249.
19. *Шарапов В.М., Минаев В.Г., Сотула Ж.В., Куницкая Л.Г.* Электроакустические преобразователи. – М.: Техносфера, 2013. – 296 с.
20. *Мараховский М.А., Панич А.Е., Марахоаский В.А.* Влияние технологии спекания на свойства сегнетожесткой керамики системы ЦТС. Технологии и материалы для экстремальных условий. – Агой, 2019. – 343 с.

21. *Мараховский М.А., Мараховский В.А., Мирющенко Э.А., Панич Е.А.* Исследование возможности создания новых полифазных пьезоматериалов для гидроакустических преобразователей. ГА-2018. – СПб., 2018. – 616 с.

REFERENCES

1. *Kupriyanov M.F., Konstantinov G.M., Panich A.E.* Segnetoelektricheskie morfotropnye perekhody [Ferroelectric morphotropic transitions]. Rostov-on-Don: Izd-vo Rostov. un-ta, 1991.
2. *Fesenko E.G., Dantsiger A.Ya., Razumovskaya O.N.* Novye p'ezokeramicheskie materialy [New piezoceramic materials]. Rostov-on-Don: Izd-vo Rostov. un-ta, 1983.
3. *Topolov V.Yu., Panich A.E.* Elektromekhanicheskie svoystva segnetop'ezokeramik na osnove oksidov semeystva perovskita [Electromechanical properties segnetoelectric on the basis of oxides of the perovskite family], *Issledovano v Rossii* [Studied in Russia], 2008, Reg. N 002, pp. 8-26.
4. *Keramik/Hrsq. H. Schaumburq. Stuttgart: B.G. Tenbner, 1994.*
5. *Panich A.A., Marakhovskiy M.A., Motin D.V.* Kristallicheskie i keramicheskie p'ezoelektriki [Crystal and ceramic piezoelectrics], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2011, No. 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (access is free).
6. *Poplavko Yu.M. [i dr.].* Fizika aktivnykh dielektrikov [Physics of active dielectrics]. Rostov-on-Don: Izd. YuFU, 2009, 480 p.
7. *Marder R., Caim R., Estournès C., Chevallier G.* Plasma in spark plasma sintering of ceramic particle compacts, *Scripta materialia*, 2014, Vol. 82, pp. 57-60.
8. *Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M.* The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method, *Journal of Materials Science*, 2006, Vol. 41, pp. 763-777.
9. *Ilyina A.M., Aleksandrova E.V., Grigoryev E.G., Olevsky E.A.* Influence of the electric current on the spark-plasma sintering processing, *Journal of Vector Science*, 2013, No. 3 (25), pp. 185-187.
10. *Annenkov Yu.M., Akarachkin S.A., Ivashutenko A.S.* Mekhanizm iskrovogo plazmennogo spevaniya keramiki [Mechanism of spark plasma sintering of ceramics], *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerovskie messages], 2012, Vol. 30 (4), pp. 74-78.
11. *Tokita M.* Tendentsii v razvitii sistem iskrovogo plazmennogo spevaniya i tekhnologii [Trends in the development of spark plasma sintering systems and technologies], *Zhurnal obshchestva spetsialistov poroshkovykh tekhnologiy* [Journal of the society of powder technology specialists], 1993, No. 30 (11), pp. 790-804.
12. *Vendik O.G., Dedyk A.I., Dmitrieva R.V. i dr.* Gisterezis dielektricheskoy pronitsaemosti titanata strontsiya pri 4,2 K [Hysteresis of the dielectric constant of strontium titanate at 4.2 K], *FTT* [Solid State Physics], 1984, Vol. 26, Issue 3, pp. 684-689;
13. *Marakhovskiy M.A., Panich A.A., Marakhovskiy V.A.* Issledovanie kharakteristik segnetokeramiki titanata bariya-strontsiya, poluchennoy metodom iskrovogo plazmennogo spevaniya [Investigation of the characteristics of barium-strontium titanate ferroceramics obtained by spark plasma sintering], *INTERMATIC-2018. Part 2. Moscow, 2018*, 430 p.
14. *Nenasheva E.A., Kanareykin A.D., Dedyk A.I., Pavlova Yu.V.* Elektricheski upravlyaemye komponenty na osnove keramiki BST – Mg dlya primeneniya v uskoritel'noy tekhnike [Electrically controlled components based on BST – Mg ceramics for use in accelerator technology], *FTT* [Solid State Physics], 2009, Vol. 51, Issue. 8, pp. 1468-1472.
15. *Yamada H.* Pressureless sintering of PMN-PT ceramics, *Journal of the european ceramic society*, 1999, Vol. 19 (6-7), pp. 1053-1056.
16. *Lente M.H., Zanin A.L., Assis S.B., Santos I.A., Garcia D., Eiras J.A.* Ferroelectric domain dynamics in PMN-PT ceramics, *Ferroelectrics. Gordon and Breach Science Publishers*, 2003, Vol. 296, pp. 149-155.
17. *Liou Y.C.* Stoichiometric perovskite PMN-PT ceramics produced by reaction-sintering process, *Materials science and engineering: B*, 2003, Vol. 103 (3), pp. 281-284.
18. *Marakhovskiy M.A., Panich A.A.* Poluchenie p'ezokeramiki sistema PMN-PT metodom iskrovogo spevaniya [Obtaining piezoceramics of PMN-PT system by spark sintering], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 6 (191), pp. 242-249.
19. *Sharapov V.M., Minaev V.G., Sotula Zh.V., Kunitzkaya L.G.* Elektroakusticheskie preobrazovateli [Electroacoustic converters]. Moscow: Tekhnosfera, 2013, 296 p.

20. *Marakhovskiy M.A., Panich, A.E., Marakhoaskiy V.A.* Vliyanie tekhnologii spekaniya na svoystva segnetozhestkoy keramiki sistemy TSTS. Tekhnologii i materialy dlya ekstremal'nykh usloviy [Influence of sintering technology on the properties of Ferroalloy ceramics of the CTS system. Technologies and materials for extreme conditions]. Agoy, 2019, 343 p.
21. *Marakhovskiy M.A., Marakhovskiy V.A., Miryushchenko E.A., Panich E.A.* Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya novykh polifaznykh p'ezomaterialov dlya gidroakusticheskikh preobrazovateley. GA-2018 [Investigation of the possibility of creating new polyphase piezomaterials for hydroacoustic transducers. GA-2018]. Saint Petersburg, 2018, 616 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.И. Юрасов.

Мараховский Михаил Алексеевич – Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» Южного федерального университета; e-mail: marmisha@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10; тел.: +79045015431; к.т.н.; начальник сектора.

Мараховский Владимир Алексеевич – e-mail: demuer@mail.ru; тел.: +79508578801; инженер.

Панич Александр Анатольевич – Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета; e-mail: rctt.rctt@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10; тел.: +79034888887; д.т.н.; директор.

Marakhovskiy Mikhail Alekseevich – Scientific Design and Technological Bureau "Piezopribor" Southern Federal University; e-mail: marmisha@mail.ru; 10, Milchakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79045015431; cand. of eng. sc.; team leader.

Marakhovskiy Vladimir Alekseevich – e-mail: demuer@mail.ru; phone: +79508578801; engineer.

Panich Alexander Anatolievich – Institute of high technologies and piezotechnics Southern Federal University; e-mail: rctt.rctt@mail.ru; 10, Milchakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79034888887; dr. of eng. sc.; director.

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/>.