



№6-2021

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Электроника и радиотехника
- Методы, модели и алгоритмы обработки информации
- Моделирование процессов и систем

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

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

Научно-технический и прикладной журнал

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

Подписной индекс 41970

№ 6 (223). 2021 г.

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

Редакционный совет

Каляев И.А. (гл. редактор); Курейчик В.В. (зам. гл. редактора); Курейчик В.М. (зам. гл. редактора); 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.; Фрадков А.Л.; Хашемипур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чердниченко 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.

Дата выхода в свет 03.02.2022 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 17,1. Уч.-изд. л. – 12,7.

Заказ № 8418. Тираж 250 экз.

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

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 247-80-51.

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

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

А.Г. Быков, И.В. Ошкин, В.Б. Профе, С.А. Степаненко, К.В. Троцюк, Е.В. Тяпков МИКРОВОЛНОВЫЕ МАКЕТЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	6
А.О. Касьянов ТРАНСФОРМАТОРЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК.....	17
М.Н. Максимов, С.М. Максимова ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА ПУАНКАРЕ-СТЕКЛОВА ДЛЯ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ.....	34
М.Н. Максимов, С.М. Максимова ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКА ПУАНКАРЕ-СТЕКЛОВА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРФЕЙСА ПРИ ПОЛУНАТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ.....	43
А.М. Пилипенко, А.А. Кольцов АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТ С РАЗЛИЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА В КОНТУРЕ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ.....	52

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В.В. Ковалев, Н.Е. Сергеев РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ВСТРАИВАЕМЫХ УСТРОЙСТВАХ С ОГРАНИЧЕННЫМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ РЕСУРСОМ.....	64
Ф.С. Булыга, В.М. Курейчик АЛГОРИТМЫ АГЛОМЕРАТИВНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ АНАЛИЗА ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	73
Э.В. Кулиев, Д.Ю. Запорожец, Ю.А. Кравченко, М.М. Семенова РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ БИОИНСПИРИРОВАННОГО АЛГОРИТМА	89
А.К. Фархун УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В НЕКАРТОГРАФИРОВАННОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ	99
Е.Е. Полупанова, П.Е. Усов ЭВРИСТИЧЕСКИЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ДИОФАНТОВЫХ УРАВНЕНИЙ.....	115
Х.С. Аламир, Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ТРАФИКА НА ДОРОГАХ.....	124
В.И. Данильченко, Е.В. Данильченко, В.М. Курейчик МЕТАЭВРИСТИКА НА ОСНОВЕ ПОВЕДЕНИЯ КОЛОНИИ БЕЛЫХ КРОТОВ	132

РАЗДЕЛ III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Д.Е. Губарев, Ю.В. Юханов РАЗРАБОТКА ЧЕТЫРЕХСТУПЕНЧАТОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА ДЛЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ	141
З.А. Коков, О.А. Молоканов, Л.О. Карданова, М.Р. Кушхов ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ	150
А.В. Логунов, А.Л. Береснев ВИБРОМОНИТОРИНГ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	160
А.С. Болдырев, Л.С. Вережкина, А.Л. Вережкин МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОТКАЗОБЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ И АГРЕГАТОВ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	170
М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СПЭ КАБЕЛЕЙ	180

CONTENT

SECTION I. ELECTRONICS AND RADIO ENGINEERING

A.G. Bykov, I.V. Oshkin, V.B. Profe, S.A. Stepanenko, C.V. Trotsuk, E.V. Tjapkov	
MICROWAVE MODELS OF INTERFERENCE LOGIC ELEMENTS	6
A.O. Kasyanov	
ELECTROMAGNETIC WAVES POLARIZATION TRANSFORMATION BY PRINTED GRATINGS AT MICROWAVES	17
M.N. Maksimov, S.M. Maksimova	
USING THE FOUR-POLE REPRESENTATION OF THE POINCARÉ-STEKLOV FILTER FOR HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION OF NONLINEAR SYSTEMS.....	35
M.N. Maksimov, S.M. Maksimova	
APPLICATION OF THE FOUR-POLE POINCARÉ-STEKLOV IN INTERFACE CONSTRUCTION FOR HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION.....	43
A.M. Pilipenko, A.A. Koltsov	
ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN PLL FREQUENCY SYNTHESIZERS WITH VARIOUS CHARACTERISTICS OF NONLINEAR LINK .	53

SECTION II. METHODS, MODELS AND ALGORITHMS OF INFORMATION PROCESSING

V.V. Kovalev, N.E. Sergeev	
IMPLEMENTATION OF CONVENTIONAL NEURAL NETWORKS ON EMBEDDED DEVICES WITH A LIMITED COMPUTING RESOURCE.....	64
P.S. Bulyga, V.M. Kureichik	
AGGLOMERATIVE CLUSTERIZATION ALGORITHMS FOR THE PROBLEMS OF ANALYSIS OF LINGUISTIC EXPERT INFORMATION.....	73
E.V. Kuliev, D.Yu. Zaporozhets, Yu.A. Kravchenko, M.M. Semenova	
SOLUTION OF THE PROBLEM OF INTELLECTUAL DATA ANALYSIS BASED ON BIOINSPIRED ALGORITHM	89
A.K. Farhood	
CONTROL OF A MOBILE ROBOT ON BASE OF NEURAL NETWORK FOR THE PATH PLANNING IN UNMAPPED OBSTRUCTED ENVIRONMENT....	100
E.E. Polupanova, P.E. Usov	
HEURISTIC GENETIC ALGORITHM FOR DIOPHANTINE EQUATIONS SOLVING.....	115
H.S. Alamir, E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan	
TRANSPORT FLOW FORECASTING MODEL BASED ON NEURAL NETWORKS FOR TRAFFIC PREDICTION ON ROADS	124
V.I. Danilchenko, Y.V. Danilchenko, V.M. Kureichik	
METAHEURISTICS BASED ON THE BEHAVIOR OF A COLONY OF WHITE MOLES	133

SECTION III. MODELING OF PROCESSES AND SYSTEMS

D.E. Gubarev, Yu.V. Yukhanov	
DEVELOPMENT OF A FOUR-STAGE LUNEBERG LENS FOR ANTENNA ARRAYS OF RADIO DIRECTORS	141
Z.A. Kokov, O.A. Molokanov, L.O. Kardanova, M.R. Kyshkhov	
STUDY OF OPTICAL TRANSMISSION SPECTRA AND SURFACE TREATMENT PARAMETERS OF INTRAOCULAR LENSES.....	151

A.V. Logunov, A.L. Beresnev	
VIBRATION MONITORING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE.....	160
A.S. Boldyrev, L.S. Verevkina, A.L. Verevkin	
METHODOLOGY FOR ANALYZING THE FAULT SAFETY OF SYSTEMS AND AGGREGATES OF A MULTI-AGENT GROUP OF AIRCRAFT.....	171
M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich, D.V. Burkov	
THERMOFLUCTUATION THEORY OF DESTRUCTION AND EVALUATION DURABILITY OF ELECTRICAL INSULATION OF SPE CABLES	181

Раздел I. Электроника и радиотехника

УДК 004.272.44:004.382+535.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-6-16

**А.Г. Быков, И.В. Ошкин, В.Б. Профе, С.А. Степаненко, К.В. Троцюк,
Е.В. Тяпков**

МИКРОВОЛНОВЫЕ МАКЕТЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Интерференционные логические элементы (ИЛЭ) являются неотъемлемой частью вычислительных машин в современном мире. Одной из важнейших задач разработчиков современной вычислительной техники, является уменьшение длительности выполнения логических операций, обеспечивая тем самым быстрдействие различных вычислительных комплексов, применяемых, например, при моделировании крупных объектов с большим количеством деталей в различных отраслях промышленности, а также при обработке большого объема информации. Возможный путь решения данной задачи состоит в использовании ИЛЭ, основанных на элементной базе оптического диапазона длин волн. Цель, для которой разрабатываются данные макеты микроволновых ИЛЭ, состоит в реализации функций ИЛЭ на базе микрополосковой линии в сверхвысокочастотном диапазоне частот (СВЧ). В работе представлены результаты моделирования, разработки конструкции, изготовления и испытаний макетов микроволновых интерференционных логических элементов, образующих полный функциональный базис. Модель микроволнового макета ИЛЭ, реализующего функции «И», «исключающее ИЛИ» и «НЕ», состоит из 4 типов функциональных узлов СВЧ: циркуляторов, одноступенчатых кольцевых сумматоров мощности, двухшлейфового направленного ответвителя и элементов отбора мощности, представляющие собой направленные ответвители с боковой связью, с заданным коэффициентом ответвления. Для подтверждения принципа действия ИЛЭ и их реализуемости использовано численное моделирование системы методом конечного интегрирования во временной области. Макеты ИЛЭ реализуют функции «И», «исключающее ИЛИ» и «НЕ». Соблюдается идентичность значений интенсивности, соответствующих логическим «0» и «1», вырабатываемых различными элементами. Длительность выполнения логических операций определяется длительностью распространения импульса в волноводе. Применение в схеме построения ИЛЭ реактивных элементов позволяет минимизировать потери СВЧ-энергии при распространении электромагнитного импульса.

Микроволновые интерференционные логические элементы; интерференционный логический элемент «И»; интерференционный логический элемент «исключающее ИЛИ»; интерференционный логический элемент «НЕ».

A.G. Bykov, I.V. Oshkin, V.B. Profe, S.A. Stepanenko, C.V. Trotsuk, E.V. Tjapkov

MICROWAVE MODELS OF INTERFERENCE LOGIC ELEMENTS

In the modern world interference logic gates (ILG) are an integral part of computers in the modern world. One of the most important tasks of developers of new computing technology is to reduce the duration of logical operations. This ensures the performance of various computing systems used in large objects modeling with a large number of details in various industries and in processing a large amount of information. A possible way to solve this problem is to use ILGs based on the element base of the optical wavelength range. These models microwave ILG are being developed for implement the functions of ILG based on a microstrip line in the ultra-high frequency (UHF). The paper presents the result of modeling, engineering, manufacturing and testing

models of microwave ILG which form a complete functional basis. A numerical simulation microwave model ILG, which implements the functions "AND", "XOR" and "NOT", has been carried out. The model consists of four types microwave functional units: circulators, single-stage ring power adder and power take-off elements, which are directional couplers, with lateral coupling and with a given branch coefficient. The finite integration method in the time domain for numerical system modelling is used to confirm the operational principle of ILGs and their realizability. ILG mock-ups implement the functions "AND", "XOR" and "NOT". The identity of the intensity values corresponding to the logical "0" and "1", generated by different elements, is observed. The execution duration of logical operations is determined by the duration of the pulse propagation in the waveguide. The use of reactive elements in the design of the ILG makes it possible to minimize the loss of microwave energy during the propagation of an electromagnetic pulse.

Microwave interference logic gates; interference logic gates "AND"; interference logic gates "XOR"; interference logic gates "NOT".

Введение. Параметры современной электронной элементной базы приблизились к физическому пределу технологии. Поэтому актуальны разработки логических элементов на новых физических принципах, в частности, интерференционных логических элементов (ИЛЭ), задействующих эффекты взаимодействия когерентных световых волн. Разработке ИЛЭ посвящено много работ, они рассматриваются в качестве перспективного варианта, позволяющего повысить производительность и энергоэффективность вычислительных машин и других цифровых устройств [1].

Например, известны ИЛЭ, содержащие два волновода на входе и один на выходе [2]. Реализация различных функций достигается посредством создания разницы в длинах волноводов, по которым поступают входные сигналы. Выходной волновод представляет собой резонатор, в котором осуществляется интерференция входных сигналов, передаваемых из входных волноводов в выходной посредством электромагнитного взаимодействия, возникающего в результате определенного расположения волноводов. Недостатком данного ИЛЭ является необходимость использования порогового ограничителя для подавления мощности логического «0» до физического нуля и порогового оптического усилителя, восстанавливающего мощность логической «1» до единичного физического уровня [2, стр. 180]. В обоих случаях задействуются нелинейные эффекты, требующие большей длительности и больших энергетических затрат по сравнению с электронными аналогами.

Известны ИЛЭ на основе плазмонных поларитонов на графеновой поверхности [3]. В логических элементах задействуются четыре входных канала. В зависимости от реализуемой логической функции определенные два из четырех назначаются информационными, а остальные используются для управления. Сигнал на выходном канале получается в результате интерференции входных сигналов, при этом длины входных волноводов изменяются в соответствии с реализуемой логической операцией. К недостаткам этого варианта ОЛЭ относятся необходимость применения низкой температуры около 3° К [3, стр. 186], требуемой для работы элементов на основе графена, а также значительная длительность их релаксации – более $1,5 \cdot 10^{-12}$ с [3, стр. 186].

Известны ИЛЭ на основе интерференционного взаимодействия в метаматериалах [4]. Используются когерентные сигналы, проходящие по пяти каналам с одного входа и по пяти каналам с другого входа. В результате их столкновения образуется стоячая волна. Помещая пластину метаматериала в пучности или в узлы стоячей волны, изменяют интенсивность выходного сигнала и реализуемую элементом логическую функцию. Недостатком данного конструктивного исполнения является отсутствие однозначного соответствия значений интенсивности выходного сигнала значениям логических констант. Например, [4, табл. II] значение выходной интенсивности $0,25I$, где I – значение входной интенсивности, соответ-

стует логической «1» в элементах, реализующих функции «исключающее ИЛИ» и «ИЛИ». Это же значение выходной интенсивности соответствует логическому «0» в элементе «И» [4, табл. II]. Вследствие этого синтез цифровых устройств из данных ОЛЭ невозможен.

Известны ОЛЭ на основе двумерных фотонных кристаллов [5]. Логический элемент содержит оптический волновод, выполненный на основе фотонного кристалла (ФК), имеющий три входа, расположенных с одной стороны волновода, и один выход. Три светоделиителя образованы в ФК равномерно расположенными вдоль заданного направления в кристалле линейными дефектами в виде воздушных стержней. Один из светоделиителей обеспечивает полное отражение, а два других отражают свет частично. Эффекты интерференции и самоколлимации задействованы для управления выходными сигналами. Оно осуществляется настройкой разности фаз сигнальных волн для достижения конструктивной или деструктивной интерференции. Радиус стержней дефекта меняется в зависимости от того, какие функции должен выполнять логический элемент. Эти элементы имеют технологический недостаток-разница в размерах ИЛЭ, реализующих различные функции, составляет лишь 0,4 нм.

В данной работе предлагается структура для реализации ИЛЭ, представленных в [6]. В ней применены функциональные СВЧ узлы (ответвители, сумматоры, циркуляторы) [7–20], которые могут быть разработаны и для оптического диапазона частот. Представлены результаты моделирования и разработки конструкции микроволновых макетов логических элементов, образующих полный функциональный базис. Для подтверждения принципа действия ИЛЭ и их реализуемости использовано численное моделирование системы методом конечного интегрирования во временной области [21]. Показано, что соблюдается идентичность значений интенсивности, соответствующих логическим переменным «0» и «1», вырабатываемых различными элементами.

Описание микроволнового макета ИЛЭ. Структурной основой логического элемента является волноведущая линия на основе несимметричной микрополосковой линии передачи энергии с рабочим диапазоном частот 2,4–2,5 ГГц. Диэлектрическая проницаемость материала подложки несимметричной линии составляет $\epsilon = 7,2$, а толщина металлического покрытия $d = 0,035$ мм. Модель микроволнового макета ИЛЭ (рис. 1) состоит из 4 типов функциональных узлов СВЧ. Этими элементами являются: циркуляторы (поз. 1, 2 на рис. 1), одноступенчатые кольцевые сумматоры мощности (поз. 3–6 на рис. 1), двухшлейфный направленный ответвитель (поз. 7 на рис. 1), элементы отбора мощности (поз. 8–11 на рис. 1) [6]. На рис. 2 изображена схема ИЛЭ в виде условных обозначений элементов.

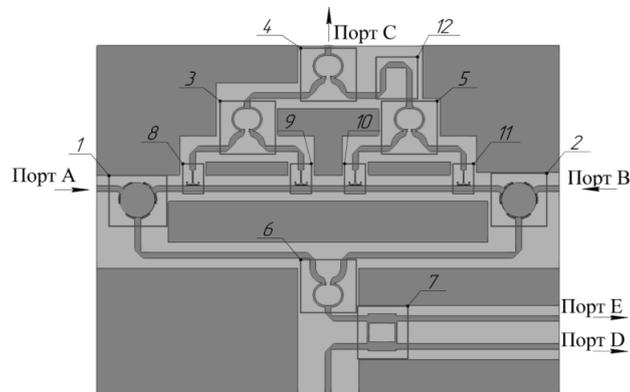


Рис. 1. Модель микроволнового макета ИЛЭ

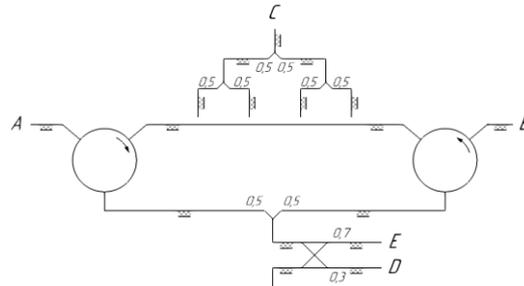


Рис. 2. Схема микроволнового макета ИЛЭ

В микроволновом макете ИЛЭ значение мощности выходного сигнала вырабатывается либо в результате воздействия одного импульса входного сигнала, либо в результате воздействия двух входных импульсов сигнала. В случае одного входного импульса сигнала задействуются интерференционные эффекты, порожденные бегущей волной, в случае двух входных импульсов – порожденные стоячей волной, образованной взаимодействием двух когерентных импульсов между циркуляторами, установленных на входах волноведущей линии. Для выполнения логических операций применяются элементы отбора мощности, представляющие собой направленные ответвители с боковой связью, с заданным коэффициентом ответвления. Для выравнивания уровней логических «0» и «1» в элементах «И» и «исключающее ИЛИ» используется двухшлейфный направленный ответвитель, который отводит необходимое количество мощности. Элемент «НЕ» получается подачей постоянного единичного сигнала на один из входов элемента «исключающее ИЛИ».

Длительность выполнения логических операций определяется длительностью распространения электромагнитного импульса в линии. Применение в схеме построения ИЛЭ реактивных элементов позволяет минимизировать потери СВЧ-энергии при распространении электромагнитного импульса.

Результаты численного моделирования ИЛЭ. В табл. 1 показаны значения функций, реализуемых элементами «И» и «исключающее ИЛИ». Необходимо на выходах элементов «И» и «исключающее ИЛИ» получить значения мощности, соответствующие значениям функций.

Таблица 1

Значения функций, реализуемых элементами «исключающее ИЛИ» и «И»

Вход А	Вход В	«исключающее ИЛИ»	«И»
		Выход С	Выход D
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

На рис. 3 изображен усредненный модуль вектора напряженности электрического поля $\langle |\vec{E}| \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |\vec{E}(\varphi)| d(\varphi)$ в ИЛЭ в случае бегущей волны. Для осуществления режима бегущей волны в ИЛЭ на порт В (см. рис. 1), при отсутствии подачи когерентного импульса в порт А, подается прямоугольный радиоимпульс с частотой заполнения 2,45 ГГц (см. $S_B(t)$ на рис. 5 интервал от 5 нс до 20 нс) мощностью 0,5 Вт. В результате, импульс электромагнитной волны мощностью 0,5 Вт, проходя через волноведущую линию, теряет мощность на каждом элементе отбора

(см. рис. 1 поз. 8-11) и путем суммирования (см. рис. 1 поз. 3-5) от каждого элемента отбора на порт С (выход искл. «ИЛИ») поступает радиоимпульс мощностью 0,19 Вт. Для синфазного суммирования мощности в ИЛЭ используется линия задержки (см. рис. 1 поз. 12). При этом на порт Е через циркулятор (см. рис. 1 поз. 2), сумматор (см. рис. 1 поз. 6) и двухшлейфный направленный ответвитель (см. рис. 1 поз. 7) поступает радиоимпульс мощностью 0,10 Вт и на порт D (выход «И») – 0,06 Вт. Режим бегущей волны может также осуществляться и в случае подачи прямоугольного радиоимпульса на порт А (см. $S_A(t)$ на рис. 5 интервал от 35 нс до 50 нс), в отсутствие подачи когерентного прямоугольного радиоимпульса в порт В. Таким образом, наличие или отсутствие подачи импульсов на порты А и В моделирует логические константы «1» и «0» соответственно.

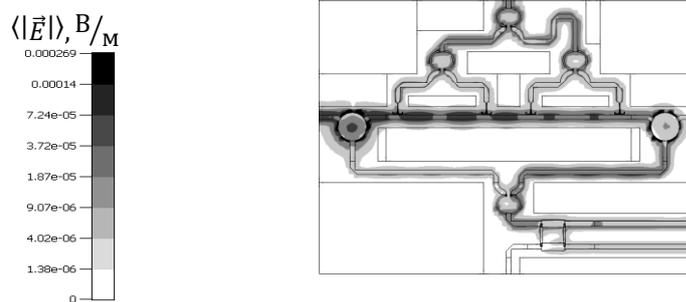


Рис. 3. Распределение усредненного модуля вектора напряженности электрического поля в случае бегущей волны

На рис. 4 изображен усредненный модуль вектора напряженности электрического поля в ИЛЭ в случае стоячей волны. Для осуществления режима стоячей волны в ИЛЭ на порт А и на порт В (см. рис. 1) поступают одновременно прямоугольные радиоимпульсы с частотой заполнения 2,45 ГГц одинаковой мощности 0,5 Вт (см. $S_A(t)$ и $S_B(t)$ на рис. 5 интервал от 20 нс до 35 нс). В результате взаимодействия когерентных радиоимпульсов, между циркуляторами (см. рис. 1 поз. 1, 2), образуется стоячая волна, при этом элементы отбора мощности (см. рис. 1 поз. 8-11) оказываются в узлах стоячей волны и на порт С поступает импульс низкой мощности равной 0,00005 Вт. При этом на порт Е через циркулятор (см. рис. 1 поз. 2), сумматор (см. рис. 1 поз. 6) и двухшлейфный направленный ответвитель (см. рис. 1 поз. 7) поступает радиоимпульс мощностью 0,42 Вт и на порт D – 0,26 Вт. Для логических элементов «исключающее ИЛИ» и «И», выходами являются порты С и D соответственно.

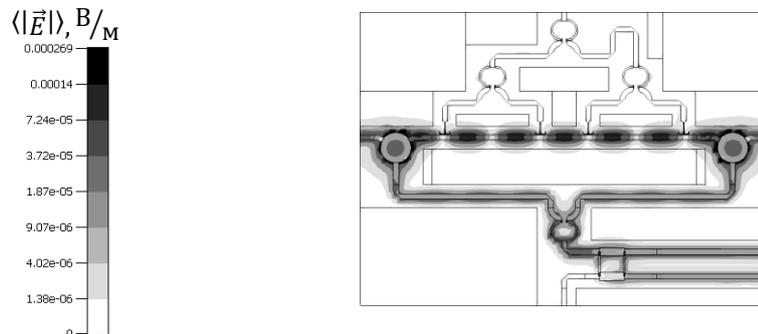


Рис. 4. Распределение усредненного модуля вектора напряженности электрического поля в случае стоячей волны

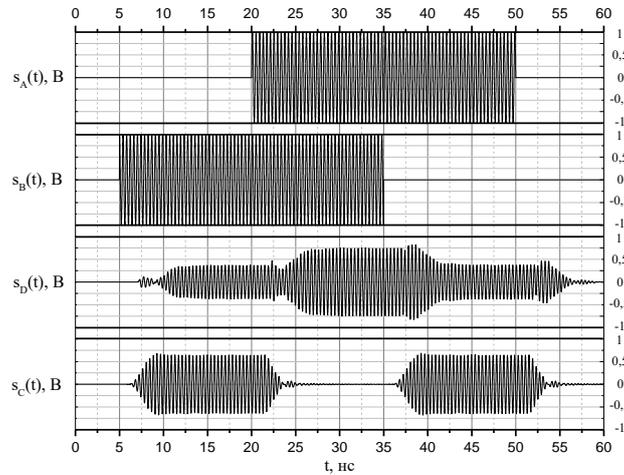


Рис. 5. Временная реализация сигналов в модели ИЛЭ

Длительность переходных процессов в модели ИЛЭ, составляет не более 5 нс для логического элемента «исключающее ИЛИ» и не более 7 нс для элемента «И». Таким образом, уровень логического «0» – в случае осуществления режима бегущей волны на порт С от уровня логической «1» – в случае осуществления режима бегущей волны на порт D отличается в 3,16 раза по мощности, что обеспечивает помехоустойчивость логического элемента.

В режиме стоячей волны (рис. 4) на порт E поступает 0,42 Вт, что близко к значению 0,5 Вт. Эту мощность, в дальнейшем, можно использовать для создания логического отрицания «НЕ». Также данную мощность можно использовать для дополнительного питания других логических элементов входящих в состав цифровых устройств.

Результаты экспериментальных исследований макета ИЛЭ. На основе численной модели ИЛЭ, представленной в предыдущем разделе, реализован макет ИЛЭ «И» и «исключающее ИЛИ» (см. рис. 6). Макет содержит те же элементы, что и численная модель, а также дополнительные элементы, осуществляющие симуляцию подачи или отсутствия сигналов на входах циркуляторов – на портах А и В (см. рис. 1). Симуляция осуществляется делением входной мощности сигнала (см. рис. 6 позиция 1) на два канала, затем сигналы в каждом из каналов коммутируются СВЧ-переключателями (см. рис. 7 поз. 2,3) между согласованными нагрузками (см. рис. 7 поз. 4,5) и входами циркуляторов (см. рис. 7 поз. 8,9) – портами А и В. При этом подача сигнала на порт В с переключателя (см. рис. 7 поз. 3) осуществляется посредством линии задержки – коаксиального кабеля определенной длины (см. рис. 7, между поз. 6 и 7), для обеспечения фазировки сигналов на входах циркуляторов (см. рис. 7 поз. 8,9) – портов А и В. На рис. 7 порт №1 соответствует портам А и В в численной модели (см. рис. 1) после прохождения сигналов через схему коммутации, а порты №2 и №3 соответствуют портам С (выход искл. «ИЛИ») и D (выход «И»).

На рис. 8 изображена блок-схема измерения параметров макета ИЛЭ. На рис. 9,а,в,д,ж изображены графики коэффициента прохождения логического элемента «исключающее ИЛИ» в диапазоне частот 2,4–2,7 ГГц. На рис. 9,б,г,е,з изображены графики коэффициента прохождения логического элемента «И» в диапазоне частот 2,4–2,7 ГГц. Центральная частота рабочего диапазона экспериментального макета составила 2,545 ГГц. На этой частоте наилучшим образом формируется

интерференционная картина поля в линии передачи. Отличие центральной частоты численного моделирования и экспериментального макета обусловлено допусками на диэлектрическую проницаемость подложки и технологии изготовления печатных проводников.



Рис. 6. Макет микроволнового ИЛЭ

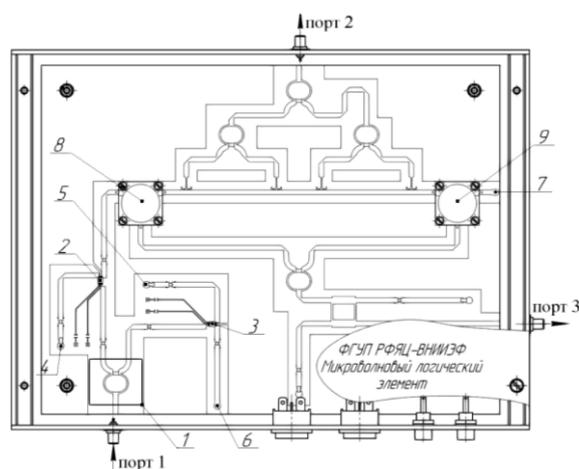


Рис. 7. Чертеж макета ИЛЭ

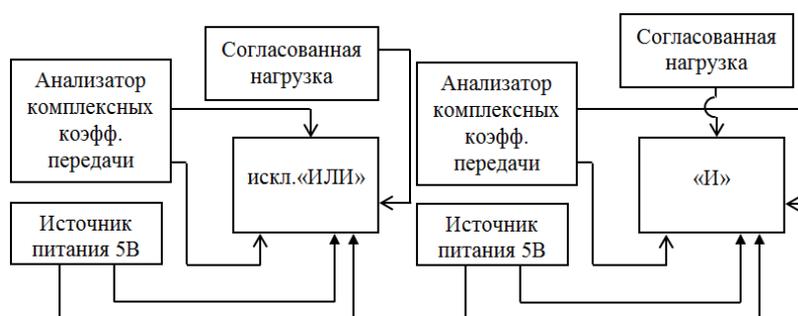


Рис. 8. Блок-схема измерений макета ИЛЭ

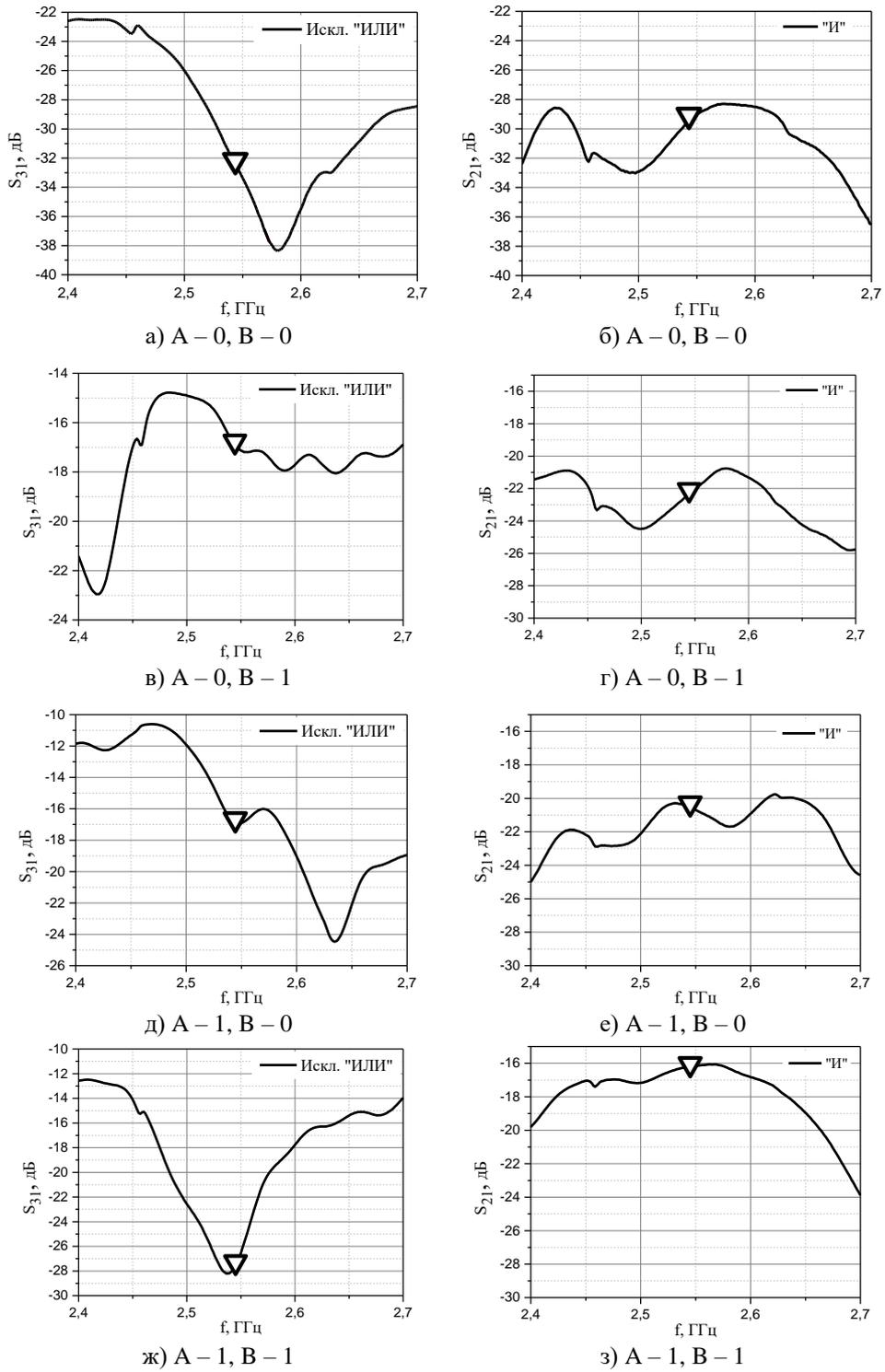


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициентов прохождения в макете ИЛЭ

В табл. 3 представлены уровни мощности сигналов на выходах макета ИЛЭ на частоте 2,545 ГГц. Из табл. 3 видно, что уровни логических единиц «1» в логических элементах «исключающее ИЛИ» и «И» практически равны, разница составляет менее 12%. При этом разница между логическими «0» и «1» составляет 3,5 дБ, что соответствует 2,23 раза по мощности.

Таблица 2

Уровни мощности для логических элементов «И» и «исключающее ИЛИ» в модели ИЛЭ

Вход А, Вт	Вход В, Вт	«исключающее ИЛИ»	«И»
		Выход С, Вт	Выход D, Вт
0	0	0 (0)	0 (0)
0	0,5	0,19 (1)	0,06 (0)
0,5	0	0,19 (1)	0,06 (0)
0,5	0,5	0,00005 (0)	0,26 (1)

Таблица 3

Уровни мощности для логических элементов «исключающее ИЛИ» и «И» в макете ИЛЭ на частоте 2,545 ГГц

А	В	«исключающее ИЛИ»	«И»
		С, дБ	D, дБ
0	0	-32 (0)	-30 (0)
0	1	-17 (1)	-22 (0)
1	0	-17 (1)	-20,5 (0)
1	1	-27,5 (0)	-16,5 (1)

Заключение. Предложена микроволновая реализация макета интерференционных логических элементов ИЛЭ, в основе которой различие значений мощности электромагнитной волны, возникающее в результате отсутствия или наличия интерференции электромагнитных волн и их взаимодействия с волноведущими линиями логических элементов. Элементы образуют полный функциональный базис, с соблюдением требований идентичности значений интенсивности, соответствующих логическим константам «0» и «1», вырабатываемых различными элементами в заданные фиксированные интервалы времени. Экспериментальные оценки параметров интерференционных логических элементов, подтверждают правильность применения физических принципов, определяющих функционирование элементов. Представленный микроволновый макет ИЛЭ функционирует в диапазоне частот 2,4–2,5 ГГц. Переход в оптический диапазон частот при сохранении принципа работы ИЛЭ, улучшит значения параметров ИЛЭ, но потребует высокотехнологичного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степаненко С.А. Фотонная вычислительная машина. Принципы реализации. Оценки параметров // Доклады академии наук. – 2017. – Т. 476, № 4. – С. 389-394.
2. Hussein M.E., Tamer A. Ali, and Rafat Nadia H.. New designs of a complete set of Photonic Crystals logic gates // Optics Communication. – 2018. – Vol. 411. – P. 175-181.
3. Xiaoting Wu, Jinping Tian, Rongcao Yang. A type of all-optical plasmon polaritons // Optics Communications. – 2017. – Vol. 403. – P. 185-192.
4. Papaioannou Maria, Plum Eric, João Valente, Edward T.F. Rogers, and Zheludev Nikolay I. All-optical multichannel logic based on coherent perfect absorption in a plasmonic metamaterial // APL Photonics. – 2016. – Vol. 1. 090801. – DOI: 10.1063/1.4966269.

5. Sun Xiao-Wen, Yang Xiu-Lun, Meng Xiang-Feng, Zhu Ji-Nan, Wang Yu-Rong, Yin Yong-Kai, Dong Guo-Yan. Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect // *Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 48, No. 2. – P. 178-183.
6. Степаненко С.А. Интерференционные логические элементы // Доклады РАН «Математика, информатика, процессы управления». – 2020. – Т. 493. – С. 64-69.
7. Астайкин А.И., Троцюк К.В., Ионова С.П., Профе В.Б. Теория и техника СВЧ: учеб. пособие. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. – 446 с.
8. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1992.
9. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет элементов на полосковых линиях. – М.: Сов. радио, 1972.
10. Фельдштейн Ф.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. – М.: Сов. радио, 1967.
11. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. А.Л. Фельдштейна. – М.: Связь, 1979.
12. Мейнке М., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. Т. 1. – М.: Госэнергоиздат, 1971.
13. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1980.
14. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. – М.: Сов. радио, 1976.
15. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988.
16. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ / под ред. Д.М. Сазонова. – М.: Высшая школа, 1981.
17. Конструирование и расчет полосковых устройств / под ред. И.С. Ковалева. – М.: Сов. радио, 1974.
18. Сосунов В.А., Шибяев А.А. Направленные ответвители сверхвысоких частот. – Саратов, 1964.
19. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1970.
20. Хижа Х.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ – фазовращатели и переключатели. – М.: Радио и связь, 1984.
21. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. – 1966. – Vol. 14, No. 3. – P. 302-307.

REFERENCES

1. Stepanenko S.A. Fotonnaya vychislitel'naya mashina. Printsipy realizatsii. Otsenki parametrov [Photonic computing machine. Principles of implementation. Parameter estimates], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2017, Vol. 476, No. 4, pp. 389-394.
2. Hussein M.E., Tamer A. Ali, and Rafat Nadia H. New designs of a complete set of Photonic Crystals logic gates, *Optics Communication*, 2018, Vol. 411, pp. 175-181.
3. Xiaoting Wu, Jinping Tian, Rongcao Yang. A type of all-optical plasmon polaritons, *Optics Communications*, 2017, Vol. 403, pp. 185-192.
4. Papaioannou Maria, Plum Eric, João Valente, Edward T.F. Rogers, and Zheludev Nikolay I. All-optical multichannel logic based on coherent perfect absorption in a plasmonic metamaterial, *APL Photonics*, 2016, Vol. 1. 090801. DOI: 10.1063/1.4966269.
5. Sun Xiao-Wen, Yang Xiu-Lun, Meng Xiang-Feng, Zhu Ji-Nan, Wang Yu-Rong, Yin Yong-Kai, Dong Guo-Yan. Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect, *Quantum Electronics*, 2018, Vol. 48, No. 2, pp. 178-183.
6. Stepanenko S.A. Interferentsionnye logicheskie elementy [Interference logic elements], *Doklady RAN «Matematika, informatika, protsessy upravleniya»* [Reports of the Russian Academy of Sciences "Mathematics, Computer Science, control processes"], 2020, Vol. 493, pp. 64-69.
7. Astaykin A.I., Trotsyuk K.V., Ionova S.P., Profe V.B. Teoriya i tekhnika SVCH: ucheb. posobie [Theory and technique of microwave: a textbook]. Sarov: FGUP «RFYATS-VNIIEF», 2008, 446 p.
8. Baskakov S.I. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and propagation of radio waves]. Moscow: Vysshaya shkola, 1992.
9. Maloratskiy L.G., Yavich L.R. Proektirovanie i raschet elementov na poloskovykh liniyakh [Design and calculation of elements on strip lines]. Moscow: Sov. radio, 1972.
10. Fel'dshcheyn F.L., Yavich L.R., Smirnov V.P. Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki [Handbook on the elements of waveguide technology]. Moscow: Sov. radio, 1967.

11. Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv [Handbook on the calculation and design of microwave strip devices], ed. by A.L. Fel'dshcheyna. Moscow: Svyaz', 1979.
12. *Meynke M., Gundlakh F.* Radiotekhnicheskiy spravochnik [Radio Engineering Handbook], Vol. 1. Moscow: Gosenergoizdat, 1971.
13. *Milovanov O.S., Sobenin N.P.* Tekhnika sverkhvysokikh chastot [Ultrahigh frequency technology]. Moscow: Atomizdat, 1980.
14. *Maloratskiy L.G.* Mikrominiaturizatsiya elementov i ustroystv SVCh [Microminiaturization of microwave elements and devices]. Moscow: Sov. radio, 1976.
15. *Sazonov D.M.* Antenny i ustroystva SVCh [Antennas and microwave devices]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988.
16. *Sazonov D.M., Gridin A.N., Mishustin B.A.* Ustroystva SVCh [Microwave devices], ed. by D.M. Sazonov. Moscow: Vysshaya shkola, 1981.
17. Konstruirovaniye i raschet poloskovykh ustroystv [Design and calculation of strip devices], ed. by I.S. Kovaleva. Moscow: Sov. radio, 1974.
18. *Sosunov V.A., Shibaev A.A.* Napravlennye otvetviteli sverkhvysokikh chastot [Directional couplers of ultrahigh frequencies]. Saratov, 1964.
19. *Lebedev I.V.* Tekhnika i pribory SVCh [Microwave equipment and devices]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970.
20. *Khizha Kh.S., Vendik I.B., Serebryakova E.A.* SVCh – fazovrashchateli i pereklyuchateli [Microwave phase shifters and switches]. Moscow: Radio i svyaz', 1984.
21. *Kane Yee.* Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1966, Vol. 14, No. 3, pp. 302-307.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Левин.

Быков Александр Геннадьевич – Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»); e-mail: bykov_a_g@mail.ru; г. Саров, Россия; тел.: 88313022131; инженер-исследователь.

Ошкин Игорь Владимирович – e-mail: IVOshkin@vniief.ru; тел.: 88313040896; с.н.с.

Профе Виктор Борисович – e-mail: beavervic@yandex.ru; тел.: 88313041800; начальник научно-исследовательского отдела; к.т.н.

Степаненко Сергей Александрович – e-mail: ssakuban@mail.ru; тел.: 88313026289; д.ф.-м.н.; г.н.с.

Троцюк Константин Васильевич – e-mail: KVTrotsuk@vniief.ru; тел.: 88313024230; начальник научно-исследовательской группы; к.т.н.

Тяпков Евгений Владимирович – e-mail: EVTjapkov@vniief.ru; тел.: 88313021869; инженер-исследователь.

Bykov Alexandr Gennadievich – Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics" (FSUE "RFNC-VNIIEF"); e-mail: bykov_a_g@mail.ru; Sarov, Russia; phone: +78313022131; engineer-researcher.

Oshkin Igor Vladimirovich – e-mail: IVOshkin@vniief.ru; phone: 88313040896; senior researcher.

Profe Victor Borisovich – e-mail: beavervic@yandex.ru; phone: 88313041800; head of the Scientific Department; cand. of eng. sc.

Stepanenko Sergey Alexandrovich – e-mail: ssakuban@mail.ru; phone: 88313026289; dr. of phys. and math. sc.; chief scientific officer.

Trotsuk Constantin Vasilievch – e-mail: KVTrotsuk@vniief.ru; phone: 88313024230; head of the Scientific Group; cand. of eng. sc.

Tjapkov Evgeny Vladimirovich – e-mail: EVTjapkov@vniief.ru; phone: 88313021869; engineer-researcher.

А.О. Касьянов**ТРАНСФОРМАТОРЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНЫХ
ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

Статья посвящена анализу результатов численного исследования характеристик рассеяния печатных поляризаторов на основе электродинамического моделирования микроволновых дифракционных решеток. Задачи моделирования решены методом интегрального уравнения. С помощью разработанной математической модели выполнено всестороннее численное исследование микроволновых трансформаторов поляризации поля возбуждающей поляризаторы электромагнитных волн, выполненных в виде многоэлементных мультипланарных печатных отражательных антенных решеток. На основе проведенных исследований найдены конструктивные решения для поляризаторов в интегральном исполнении, реализующих функции трансформаторов поляризации волн микроволнового диапазона. Рассмотрены вопросы конструктивного синтеза планарных поляризаторов для создания устройств трансформации поляризации, интегрируемых в излучающие и распределительные системы современных многоэлементных фазированных антенных решеток в печатном исполнении. Получены численные результаты электродинамического моделирования трансформаторов поляризации волн микроволнового диапазона на основе печатных дифракционных решеток, которые могут быть использованы для выбора наиболее рациональных вариантов топологий поляризаторов при разработке многофункциональных обтекателей в антеннах СВЧ. На основе полученных численных данных рассматриваются возможности применения ряда вариантов плоских дифракционных решеток в качестве поляризаторов проходного и отражательного типа в составе антенных обтекателей. Предложенные в работе трансформаторы поляризации электромагнитного поля в виде мультипланарных печатных решеток, входящих в состав антенных обтекателей, предназначены для обеспечения расширения функциональных возможностей перспективных радиоэлектронных средств, содержащих сканирующие антенные решетки, устанавливаемые под антенными обтекателями. Кроме того, применение предложенных в работе твист-рефлекторов и пространственных поляризаторов в составе интеллектуальных радиоэлектронных покрытий открывает дополнительные возможности по цифровому управлению полями рассеяния различных объектов радиолокационного наблюдения, позволяя создавать желаемые радиолокационные образы защищаемых объектов.

Трансформатор поляризации; поляризатор; оптически активная среда; печатная антенная решетка; дифракционная решетка; математическое моделирование; переизлучатель; поляризационная матрица рассеяния; твист-поляризатор.

А.О. Kasyanov**ELECTROMAGNETIC WAVES POLARIZATION TRANSFORMATION
BY PRINTED GRATINGS AT MICROWAVES**

The problem of printed gratings application is considered as converters of electromagnetic waves polarization and polarizing modulators. Two directions in development of antenna engineering are considered in this paper. In each of them the scattering fields control of an antenna arrays allows essentially to expand functionalities of radio engineering sets. The first direction is the creation of auxiliary depolarizing reflectors for two-mirror reflector antennas and folded lenses. In addition, in twist-reflectors based on printed gratings, it is possible to constructively realize the necessary phase distributions of the field on their surfaces. Thus, it becomes possible to use such twist-reflectors to create phase-correcting twist-reflectors. The second direction is connected to application of antenna arrays for a reduction of a radar cross section of the radar-tracking targets. Transformation of a field polarization by an antenna array allows to achieve both these purposes. In an aspect of high cost and complexity of arrays experimental researches as a

method of the analysis the mathematical simulation is selected. Besides, it is shown that introduction of impedance loads in the construction of the re-radiating elements of the printed grating opens additional possibilities for controlling the field scattered by it. Thus, twist reflectors with improved characteristics can be realized on the basis of microstrip-pin gratings. The given results can be used for choosing the most of rational electrodynamic structure geometry variant at decision of particular problems by antennas engineering. The possible flat arrays based on printed complicated shape elements application area is also discussed and it's shown these arrays are the very attractive type for controllable radioelectronic covers designing at microwaves. Some numerical results presented prove the possibility of a printed reflectarrays application as smart covers microwave modules.

Polarization transformation; polarizer; electromagnetic activity; grating; printed array; diffraction grating; mathematical simulation; re-radiator; scattering matrix; twist-reflector.

Введение. В монографии автора [1] показано, что усложнение топологии печатных элементов микрополосковых дифракционных решеток (МДР), применяемых для построения частотно-избирательных поверхностей, открывает дополнительные возможности при построении дифракционных структур с заданными частотными характеристиками. Покажем, что усложнение топологии печатного элемента МДР также позволяет создавать и поляризационно-активные устройства на основе таких электродинамических структур. Исследованы тонкие плоские поляризаторы, выполненные в виде дифракционных решеток печатных элементов, как на диэлектрических подложках с примыкающими к ним экранами, так и на неэкранированных диэлектрических подложках.

Печатные элементы имеют специфическую форму и располагаются периодически в узлах сетки с прямоугольной формой единичной ячейки. Значительное распространение получили такие электродинамические структуры (ЭДС), форма печатных элементов которых подобна заглавной букве омега греческого алфавита (Ω) [2]. Вид печатного элемента такой формы показан на рис. 1.

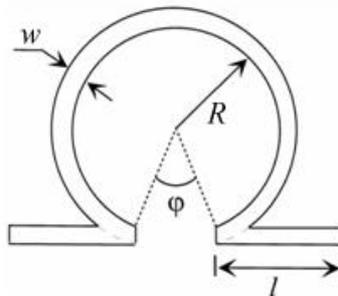


Рис. 1. Схематическое изображение Ω -элемента дифракционной решетки

Как видно из рисунка, такой переизлучатель является составным. В его состав входят симметричный печатный вибратор, каждое из плеч которого имеет длину l и рамочный переизлучатель радиусом R . При этом и вибратор и рамка имеют общий возбуждающий зазор.

Для того, чтобы решетки, составленные из Ω -элементов, обладали оптической активностью требуется высокая степень симметрии печатных переизлучателей. Данного недостатка лишены печатные решетки, составленные из асимметричных элементов. В качестве модели оптически активных ЭДС, выполненных на основе таких решеток, может быть использована обобщенная неаксиальная бианизотропная среда.

Известные применения подобных моделей в виде бесконечных двояко-периодических решеток отражательного и проходного типа:

- ◆ микроволновые фильтры [6];
- ◆ искусственные диэлектрики [7];
- ◆ поляризаторы волн [8–16];
- ◆ антенные рефлекторы [17];
- ◆ частотно-избирательные поверхности [18–19].

Таким образом, исследование характеристик рассеяния печатных дифракционных решеток – трансформаторов поляризации полей падающих на них волн представляет несомненный практический интерес.

Результаты численного моделирования поляризаторов на основе дифракционных решеток печатных TFH-элементов. Приведенные ниже результаты в виде рассеянных полей получены для случая дальней зоны. Рассматривается случай возбуждения нормально падающими плоскими волнами каждой из исследованных ниже печатных решеток. В качестве элементов печатных решеток использованы переизлучатели по форме напоминающие ладонь с двумя пальцами «two-finger hand» (TFH) [3]. Вид печатного элемента такой формы показан на рис. 2.

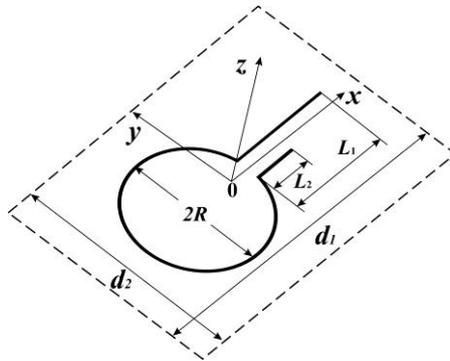


Рис. 2. Схематическое изображение единичной ячейки решетки

Данный печатный переизлучатель может быть получен путем такого преобразования топологии Ω -элемента, при которой симметричный электрический вибратор заменяется на несимметричный, одно из плеч которого длиной L_1 разворачивается на угол 270° , а другое длиной L_2 – на угол 90° . Таким образом формируется свернутый вибратор с сонаправленными плечами. Как и в случае Ω -элемента, рамочная и вибраторная части данного составного TFH-элемента имеют общий возбуждающий зазор.

При проведении расчетов предполагалось, что дифракционная решетка является двоякопериодической и бесконечно протяженной. Как показано на рис. 2, шаг решетки вдоль оси Ox равен d_1 , а шаг решетки вдоль оси Oy – d_2 . При этом предполагается, что печатные рассеиватели являются идеально проводящими. Дифракционная решетка возбуждается линейно-поляризованной плоской волной. При этом рассматриваются два случая:

1) вектор напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны (ЭМВ) $\vec{E}_1^{\text{пад}}$ параллелен плечам свернутого несимметричного печатного вибратора из состава TFH-элемента;

2) вектор напряженности электрического поля падающей ЭМВ $\vec{E}_2^{\text{пад}}$ перпендикулярен вектору $\vec{E}_1^{\text{пад}}$.

Прежде всего, рассмотрим случай решетки из свободно установленных элементов. На рис. 3–8 показаны частотные зависимости характеристик рассеяния такой решетки. Параметры решетки: $R = 3$ мм, $L_1 = 5$ мм, $L_2 = 2$ мм, $d_1 = 15$ мм, $d_2 = 10$ мм, $\varphi \approx 19,1^\circ$. На рис. 3 показаны частотные характеристики (ЧХ) коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ отраженной волны [5] для случая, когда решетка возбуждается нормально падающей волной, вектор напряженности электрического поля которой $\vec{E}^{\text{пад}} = \vec{E}_1^{\text{пад}}$.

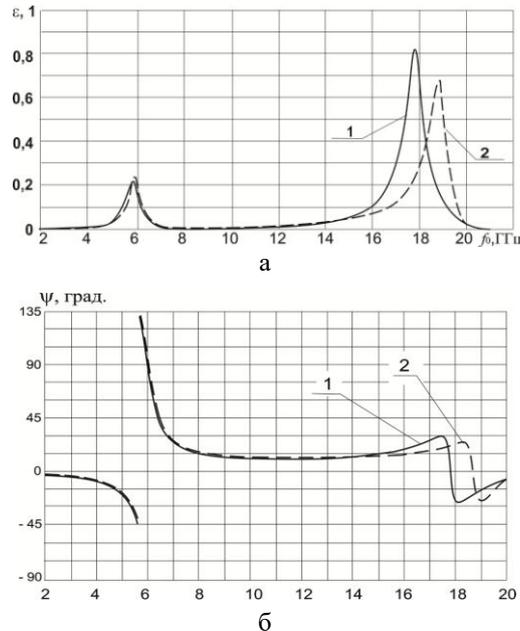


Рис. 3. ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ отраженной волны для случая нормального возбуждения решетки x -поляризованной ЭМВ: 1 – результаты расчета, проведенного с помощью авторского программного обеспечения (ПО) [4], 2 – результаты, независимо полученные в работе [3].

Как видно из сравнения графиков расчетных зависимостей $\varepsilon(f)$ и $\psi(f)$, показанных на рис. 3, в случаях использования, как авторского ПО, разработанного с помощью математической модели многослойной мультипланарной печатной дифракционной решетки, описанной в [4], так и на основе данных, приведенных в [3], эти численные результаты находятся в соответствии между собой.

Как видно из графиков, в окрестности двух резонансных частот $f_1 \approx 6$ ГГц и $f_2 \approx 18$ ГГц при отражении наблюдается преобразование поляризации падающей на описанную решетку волны. Максимальные значения коэффициентов эллиптичности наблюдаются в окрестностях резонансных частот, на первой из которых f_1 длина ТФН-элемента решетки L^I равна половине резонансной длины волны λ_1 , а на второй – f_2 – длина печатной рамки L^{II} примерно равна резонансной длине волны λ_2 . Здесь приняты следующие обозначения:

$$L^I = L_1 + L_2 + L^{II},$$

где $L^{II} = 2\pi R - \Delta$ – длина печатной рамки из состава ТФН-элемента решетки. При этом

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0},$$

где c – скорость света в вакууме.

На рис. 4 показаны частотные характеристики (ЧХ) модулей коэффициентов отражения на согласованной $|R_{11}|$ и кроссовой поляризациях $|R_{21}|$, где $R_{ij} = S_{11, ij}$, $i = 1, 2; j = 1$ – элементы поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) решетки [S]. При этом $j = 1$ – случай нормального возбуждения решетки x -поляризованной падающей плоской волной, $j = 2$ – то же для случая y -поляризованной волны.

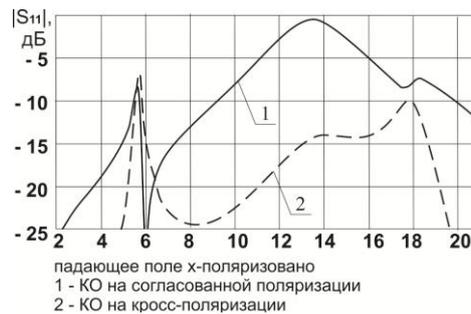


Рис. 4. ЧХ коэффициентов отражения (КО) решетки свободно установленных TFH-элементов (случай x -поляризации)

Как видно из графиков, показанных на рис. 4, в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц зависимость $|S_{11}(f)|$ имеет экстремумы типа максимум: в окрестностях частот f_1 и f_2 , а также $f_3 \approx 13,5$ ГГц. При этом на двух резонансных частотах f_1 и f_2 наблюдается частичное отражение падающей на решетку волны, а на третьей резонансной частоте f_3 наблюдается её полное отражение. Кроме того, на резонансных частотах f_1 и f_2 происходит трансформация поляризации падающей линейно-поляризованной волны в отраженную волну вращающейся эллиптической поляризации, что указывает на то, что на x -поляризации данная дифракционная решетка обладает свойством оптической активности [3]. При этом на частоте f_3 рассматриваемая решетка становится полностью непроницаемой для линейно-поляризованных по x волн, что подтверждается показанными на рис. 5 ЧХ коэффициентов прохождения сквозь неё падающей x -поляризованной волны на согласованной $|T_{11}|$ и кроссовой поляризациях $|T_{21}|$, где $T_{ij} = S_{21, ij}$, $i = 1, 2; j = 1$.



Рис. 5. ЧХ коэффициентов прохождения (КП) решетки свободно установленных TFH-элементов (случай x -поляризации)

На рис. 6 показаны ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ отраженной волны для случая, когда решетка возбуждается нормально падающей волной. При этом сплошными линиями показаны ЧХ $\varepsilon(f)$ и $\psi(f)$ для случая, когда решетка возбуждается x -поляризованной волной, а пунктиром – в случае возбуждения решетки y -поляризованной волной.

Как видно из графиков зависимостей $\varepsilon(f)$ и $\psi(f)$, в случае падения на решетку y -поляризованной волны максимальные значения коэффициента эллиптичности ε наблюдаются в окрестностях частот $f_4 \approx 7$ ГГц, $f_5 \approx 14$ ГГц, где угол наклона главной оси эллипса поляризации ψ близок к нулю.

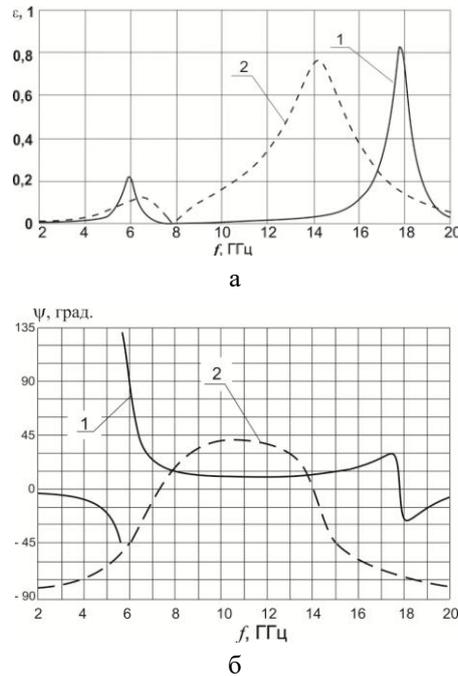


Рис. 6. ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ отраженной волны для случая нормального возбуждения решетки: 1 – x -поляризованной волной (сплошная), 2 – y -поляризованной волной (пунктир).

На рис. 7 показаны ЧХ модулей коэффициентов отражения на согласованной $|R_{22}|$ и кроссовой поляризациях $|R_{12}|$, где $R_{ij} = S_{11, ij}$, $i = 1, 2; j = 2$.

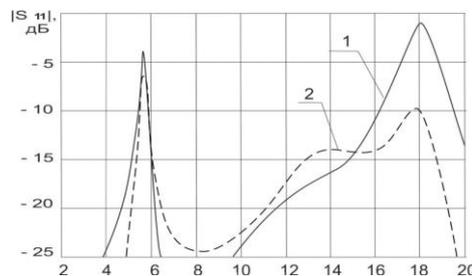


Рис. 7. ЧХ коэффициентов отражения (КО) решетки свободно установленных ТФН-элементов (случай y -поляризации): 1 – на согласованной поляризации (сплошная), 2 – на кросс-поляризации (пунктир).

Как видно из графиков, показанных на рис. 7, в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц зависимость $|S_{11}(f)|$ имеет экстремумы типа максимум: в окрестностях частот f_1 и f_2 . При этом на обеих резонансных частотах f_1 и f_2 наблюдается частичное отражение падающей на решетку волны. Кроме того, на резонансных частотах f_1 и f_2 происходит трансформация поляризации падающей линейно-поляризованной волны в отраженную волну вращающейся эллиптической поляризации, что указывает на то, что данная решетка и на у-поляризации обладает свойством оптической активности.

В то же время, как показано на рис. 8, где представлены ЧХ коэффициентов прохождения сквозь решетку у-поляризованной волны на согласованной $|T_{22}|$ и крессовой $|T_{12}|$ поляризациях, на частотах f_1 и f_2 рассматриваемая решетка имеет наименьший значение $|T_{22}|$ на согласованной поляризации и наибольшее значение $|T_{12}|$ – на крессовой поляризации.

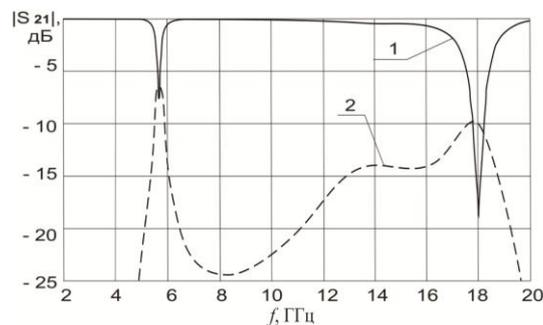


Рис. 8. ЧХ коэффициентов прохождения (КП) решетки свободно установленных ТФН-элементов (случай у-поляризации)

На рис. 9 показаны пунктиром ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ прошедшей сквозь решетку волны для случая, когда она возбуждается нормально падающей волной.

Как видно из графиков, показанных на рис. 9,а, на частотах f_1 , f_2 и f_3 коэффициент эллиптичности прошедшей сквозь решетку обращается нуль. При этом в окрестности каждой из частот f_1 , f_2 и f_3 коэффициент эллиптичности дважды максимизируется. Такой характер зависимости $\varepsilon(f)$ связан с поворотом главной оси эллипса поляризации прошедшей волны в каждой из окрестностей указанных выше частот (см. рис. 9,б). Так, в окрестности частоты f_1 этот поворот происходит независимо от поляризации падающей волны (х- или у-поляризация).

В то же время в окрестности частоты f_3 поворот главной оси эллипса поляризации происходит в полосе частот $f_3 \pm 0,037f_3$ примерно равной 6,5% от f_3 только в случае возбуждения решетки нормально падающей х-поляризованной волной. И, наконец, в окрестности частоты f_2 наблюдается аналогичное поведение, но только для случая, когда падающая волна имеет у-поляризацию. Следовательно, рассмотренная выше решетка из свободно установленных ТФН-элементов трансформирует поляризацию не только отраженных, но и прошедших сквозь неё волн. Таким образом, данная электродинамическая структура обладает оптической активностью.

Помимо решеток из свободно установленных элементов, представляет интерес исследование поляризационных характеристик печатных решеток с переизлучателями сложной формы, выполненных на диэлектрических подложках в присутствии проводящего экрана, примыкающего к теневой стороне подложки. В качестве примера рассмотрим печатную решетку из ТФН-элементов. Схематическое изображение единичной ячейки такой решетки показано на рис. 10.

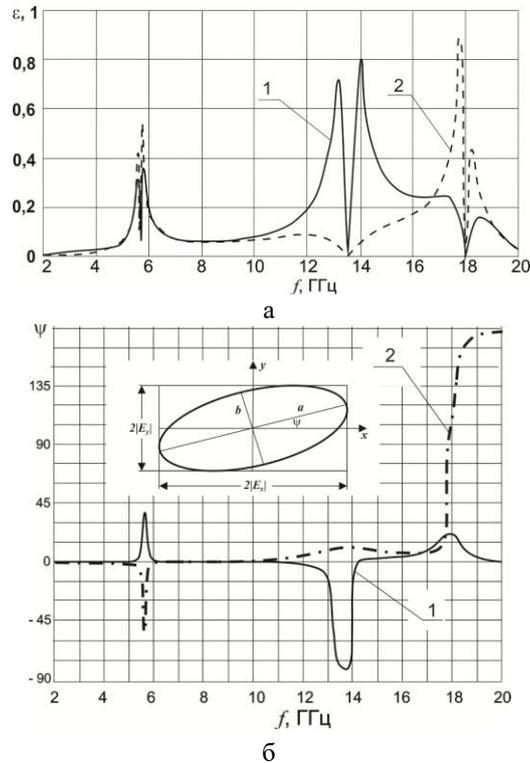


Рис. 9. ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ прошедшей волны для случая нормального возбуждения решетки: 1 – x -поляризованной волной (сплошная), 2 – y -поляризованной волной (пунктир).



Рис. 10. Единичная ячейка печатной решетки ТФН-элементов

Параметры печатной решетки: $2R = 2,195$ мм – диаметр кольцевой рамки ТФН-элемента; $w = 0,15$ мм ширина полоскового проводника; $L_1 = 2,025$ мм – длина первого плеча несимметричного печатного вибратора; $L_2 = 0,6$ мм – длина его второго плеча; $d_1 = 4,5$ мм – шаг решетки вдоль оси Ox ; $d_2 = 2,475$ мм – шаг решетки вдоль оси Oy ; $\Delta = 0,3$ мм – зазор, выполненный в рамочном переизлучающем элементе решетки для включения свернутого несимметричного печатного вибратора; $\varepsilon_R = 4,55$ – относительная диэлектрическая проницаемость подложки; $d = 1,54$ мм – её толщина.

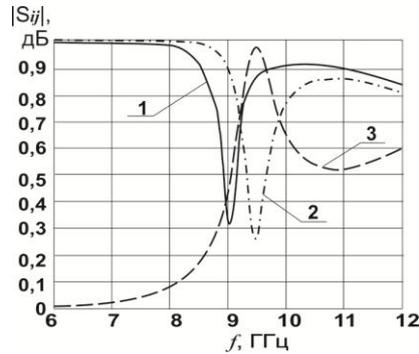


Рис. 11. ЧХ модулей элементов ПМР печатной решетки TFH-элементов:
 1 – КО на основной поляризации, рассчитанный с помощью авторского ПО;
 2 – то же, приведенное в [2]; 3 – КО на кроссовой поляризации из [2].

На рис. 11 показаны частотные характеристики (ЧХ) модулей коэффициентов отражения описанной решетки для случая её нормального возбуждения плоской линейно поляризованной волной, вектор поляризации которой ориентирован вдоль оси Ox , т.е. $\vec{E}^{\text{пад}} = \vec{E}_1^{\text{пад}}$. Как видно из сравнения графиков расчетных зависимостей, показанных на рис. 11, в случаях использования авторского программного обеспечения, разработанного на основе математической модели отражательной антенной решеткой (ОАР) в печатном исполнении, описанной в [4], и на основе данных, приведенных в [3], эти численные результаты находятся в соответствии между собой.

Как видно из графиков, как в случае наличия, так и при отсутствии проводящего экрана, вблизи резонансной частоты $f_0' \approx 9$ ГГц при отражении наблюдается преобразование поляризации падающей на описанную решетку волны. Максимальное значение коэффициента отражения для волны кроссовой поляризации $|R_{21}|$ наблюдается в окрестности резонансной частоты, на которой длина TFH-элемента решетки L' равна половине резонансной длины волны λ_e . При этом

$$\lambda_e = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}},$$

где $\varepsilon_{\text{эфф}}$ – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Значение частоты f_0' и уровень максимальной трансформации поляризации $|R_{21}|$ изменяются, как при реконfigurировании топологии печатного TFH-элемента, так и изменении параметров заземленной диэлектрической подложки. Действительно, как показано на рис. 12, где приведены ЧХ $|R_{11}(f)|$ (рис. 12,а) и $|R_{21}(f)|$ (рис. 12,б) для различных значений R , при увеличении R значение f_0' снижается со скоростью примерно равной 2,95 ГГц/мм. При этом увеличение R ведет к росту максимального значения коэффициента отражения для волны кроссовой поляризации $|R_{21}|$ со скоростью 2,3 дБ/мм.

При этом следует заметить, что возможности по увеличению R ограничены шагом решетки вдоль оси Oy – $d_2 = 2,475$ мм. На рис. 13 показаны ЧХ модулей (рис. 13,а) и фаз (рис. 13,б) КО решетки печатных TFH-элементов для значения R , при котором величина зазора δ между TFH-элементами соседних ячеек вдоль оси Oy равна $\delta = \delta_1 = 40$ нм.

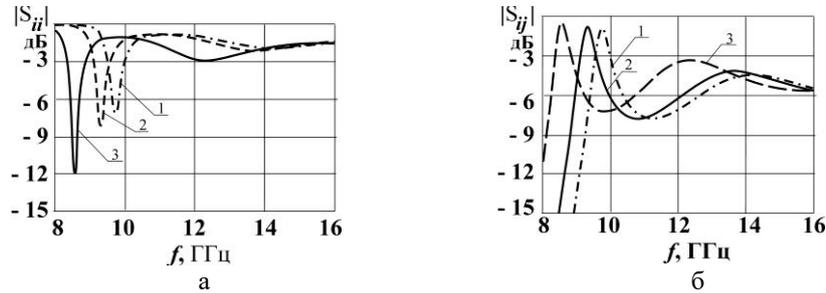


Рис. 12. ЧХ модулей элементов ПМР печатной решетки TFH-элементов: 1 – $R = 2,1$ мм; 2 – $R \approx 2,2$ мм; 3 – $R = 2,4$ мм

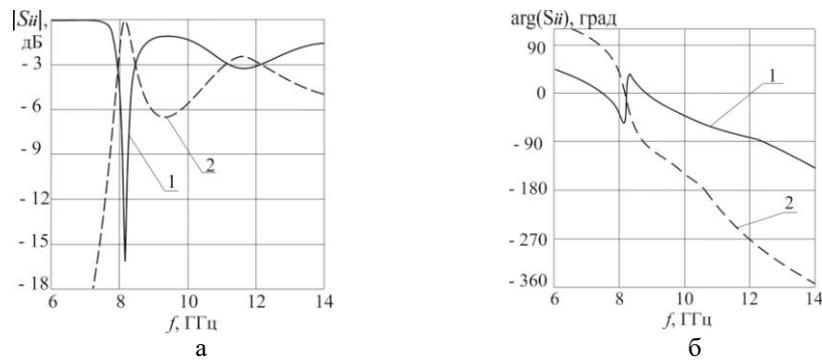


Рис. 13. ЧХ элементов ПМР решетки TFH-элементов при $\delta = \delta_1$:
а – модули КО ($1 - |R_{11}(f)|$; 2 – $|R_{21}(f)|$); б – фазы КО ($1 - \arg R_{11}(f)$; 2 – $\arg R_{21}(f)$)

Как видно из графиков, в этом случае значение резонансной частоты f_0^I примерно равно 8,21 ГГц, при этом величина $|R_{21}|$ достигает значения минус 0,14 дБ, а ЧХ фазы КО на согласованной поляризации – $\varphi_{11}(f) = \arg R_{11}(f)$ при $f \rightarrow f_0^I$ претерпевает разрыв, величина которого равна 90° .

В том случае когда $\delta = \delta_2 = 0$, ЧХ модулей и фаз КО решетки принимает вид, показанный на рис. 14. Как видно из графиков, в этом случае преобразование поляризации поля падающей на решетку волны происходит на частоте $f_0^{II} \approx 15,6$ ГГц, которая почти в два раза выше, чем f_0^I .

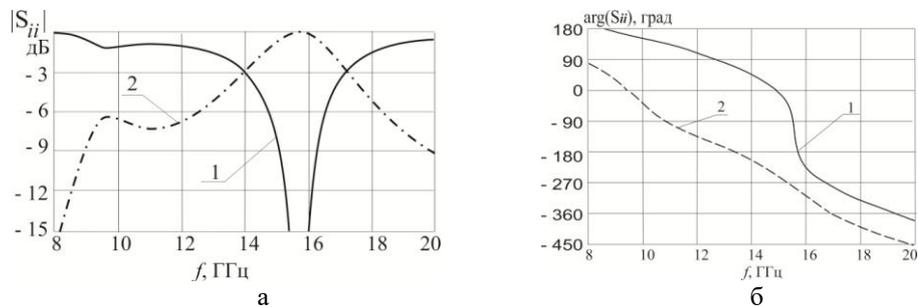


Рис. 14. ЧХ элементов ПМР решетки TFH-элементов при $\delta = \delta_2$:
а – модули КО ($1 - |R_{11}(f)|$; 2 – $|R_{21}(f)|$); б – фазы КО ($1 - \arg R_{11}(f)$; 2 – $\arg R_{21}(f)$)

Таким образом, если между элементами соседних ячеек решетки возникает гальванический контакт, происходит скачкообразное почти двукратное увеличение частоты трансформации поляризации поля. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что введение в состав описанной решетки управляющих элементов (УЭ) микроволнового диапазона позволит построить на ее основе поляризационный манипулятор, подобный ранее описанному автором, например, в монографии [20]. Схематическое изображение фрагмента такого поляризационного манипулятора, в качестве УЭ которого выступают переключаемые диоды СВЧ (*p-i-n* – диоды) показано на рис. 15.

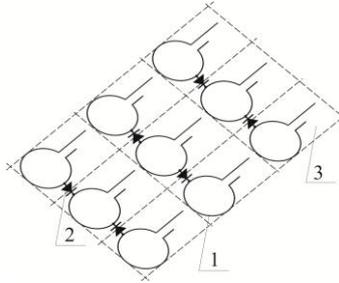


Рис. 15. Схематическое изображение фрагмента такого поляризационного манипулятора: 1 – печатный TFH-элемент; 2 – *p-i-n* – диод; единичная ячейка решетки

Наряду с изменением резонансной частоты, при $\delta = 0$ наблюдается практически трехкратное снижение добротности резонансной кривой Q (со значения $Q_1 \approx 16$ при $\delta = \delta_1$ до значения $Q_2 \approx 5,3$ при $\delta = \delta_1$), сопровождающееся весьма незначительным ростом (на 0,12 дБ) максимума величины $|R_{21}|$ в полосе частот преобразования поляризации поля.

В том случае, когда $\delta = 0$, также имеется возможность изменения частоты преобразования поляризации поля. Для этого можно варьировать толщину заземленной диэлектрической подложки d или значение диэлектрической проницаемости материала подложки – ϵ . В качестве примера рассмотрим ЧХ модулей КО на согласованной и кроссовой поляризациях при различных значениях d .

На рис. 16 показаны ЧХ модулей КО на согласованной и кроссовой поляризациях решетки при $\delta = 0$ для различных значений d . При этом на рис. 16,а показаны ЧХ для КО на согласованной поляризации, а на рис. 16,б – ЧХ для КО на кроссовой поляризации.

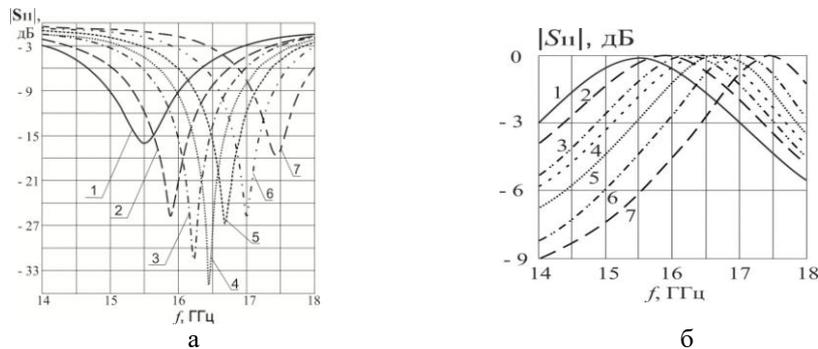


Рис. 16. ЧХ модулей элементов ПМР печатной решетки TFH-элементов: 1 – $d = 1,7$ мм; 2 – $d = 1,54$ мм; 3 – $d = 1,4$ мм; 4 – $d = 1,32$ мм; 5 – $d = 1,24$ мм; 6 – $d = 1,1$ мм; 7 – $d = 1$ мм

Как видно из графиков, с ростом толщины подложки d снижается частота f_0'' со скоростью примерно равной 2714,3 МГц/мм. При этом минимальное значение $|R_{11}|$ в полосе частот с увеличением толщины подложки изменяется немонотонно, сначала падая при увеличении толщины d от d_{\min} до $d_{\text{ср}}$ со скоростью примерно 58 дБ/мм, а затем возрастая со скоростью 50 дБ/мм на участке от $d_{\text{ср}}$ до d_{\max} . Здесь обозначено: $d_{\min} = 1$ мм, $d_{\max} = 1,7$ мм, $d_{\text{ср}} = (d_{\min} + d_{\max})/2$ – среднее арифметическое.

Поляризационно-активные устройства отражательного и проходного типа на основе микрополосковых дифракционных решеток с S- и Z-образными элементами. Представляет интерес исследование поляризационных свойств микрополосково-щелевой ОАР с S-образными элементами, расположенных в узлах сетки с прямоугольной формой ячейки. Топология щелевых переизлучателей печатной ОАР показана на рис. 17,а. Решетка возбуждается нормально падающей линейно-поляризованной плоской волной. Поляризационный базис выбран таким образом, что $\mathbf{i}_1 = \mathbf{i}_x$, $\mathbf{i}_2 = \mathbf{i}_y$. ЧХ элементов ПМР S_{pq} отражательной решетки с шагом $d_1 = d_2 = d = 10$ мм (квадратная единичная ячейка) и $\varphi = 120^\circ$ показаны на рис. 17,б. На отдельных частотах f_{Dep} такая ОАР представляет собой твист-рефлектор. Как видно из рисунка, описанная решетка является деполаризующей на 2-х частотах в одноволновой области периодичности $f < f_{\text{WA}}$: $f_{\text{Dep}}^{(1)}$ и $f_{\text{Dep}}^{(2)}$. При этом на нижней деполаризация падающей волны является частичной. Помимо решеток с S-образными элементами, поляризационной активностью обладают и печатные ОАР с Z-образными элементами.

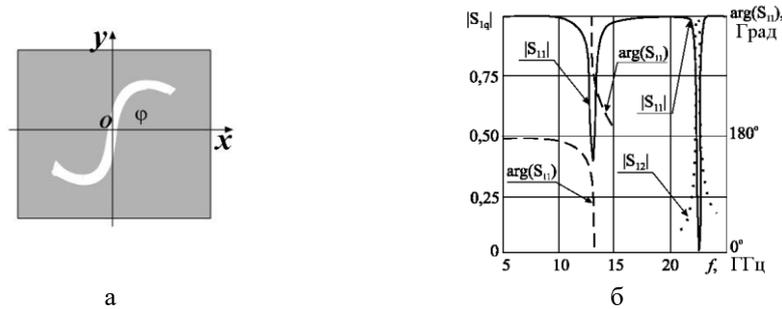


Рис. 17. Печатная ОАР как поляризационно-активная ЭДС

На рис. 18 представлены результаты численного исследования полосковых решеток из Z-образных щелевых элементов. Параметры решеток из S-образных и Z-образных элементов совпадают. Отличие состоит лишь в форме щелевого переизлучателя.

В качестве изменяемого параметра на рис. 18 выступают длины L горизонтальных участков Z-образной щели. Как видно из графиков, показанных на рис. 18,а в одноволновой области периодичности такая решетка имеет три частоты, на которых происходит деполаризация (каждой из них соответствует свой график, обозначенный одной из цифр от 1 до 3). Зависимости уровней деполаризации $|S_{12}|$ от относительных длин горизонтальных участков щелей – L/d на частотах деполаризации $f_{\text{Dep}}^{(i)}$, $i = \overline{1,3}$ показаны на рис. 18,б.

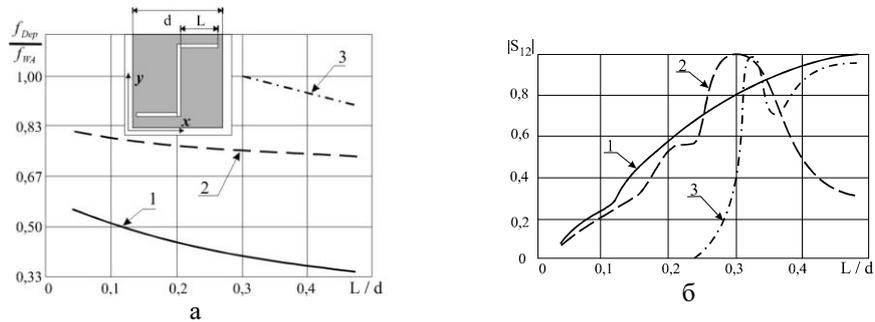


Рис. 18. Рассчитанные зависимости параметров МДР на основе Z-образных целевых элементов от длины L горизонтальных участков Z-образной цели: а – частоты деполаризации; б – недиагональные элементы ПМР печатной решетки

Весьма интересен анализ наклонного падения на решетку плоской волны. Результаты такого анализа приведены на рис. 19, где представлены ЧХ коэффициентов передачи периодической плоской решетки из Z-образных пластин. Единичный элемент такой решетки показан на врезке рис. 19. Размеры единичной ячейки этой решетки совпадают с размерами двух предыдущих. Однако, в отличие от них, здесь нет экрана, а в качестве переизлучающего элемента выступает не щелевой, а пластинчатый вибратор. При этом проекция плоскости падения возбуждающей решетку плоской волны параллельна горизонтальным плечам Z-образного ленточного вибратора. Поведение элементов поляризационной матрицы рассеяния плоской решетки из таких киральных элементов [21–22] в случае наклонного падения плоской волны (см. рис. 19) качественно повторяет аналогичные характеристики широкополосного микрополоскового твист-рефлектора, рассмотренного, например, в таких автора как [23–24].

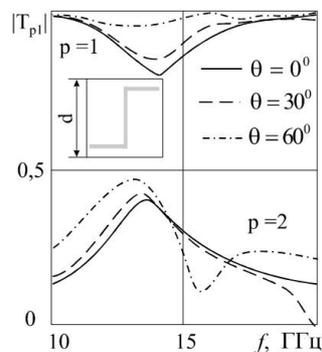


Рис. 19. ЧХ коэффициентов прохождения волн сквозь печатную решетку

Для целей преобразования поляризации поля из линейной во вращающуюся удобно использовать отражательную решетку из спиральных элементов. Воспользовавшись математической моделью микрополосковой ОАР, разработанной автором и описанной в монографии [25], исследуем применение решетки из спиральных излучателей для преобразования падающей линейно-поляризованной волны в отраженную волну с круговой поляризацией. В качестве элементов этой решетки выступают излучатели круговой поляризации, представляющие собой печатные двухзаходные спирали Архимеда. Структура спирали выбрана самодополнитель-

ной, то есть ширина щели равна промежутку между ветвями. Ширина щели составляет $1/15$ от шага решетки d . Форма единичной ячейки – квадрат, то есть $d_1 = d_2 = d$. Величина d выбрана таким образом, чтобы длина наибольшего витка спирали была равна λ_0 , где $\lambda_0 = 3,33$ см. Тогда $d = 0,47 \lambda_0$. При этом в одном плече спирали укладывается $7/4$ витка. Печатные спирали нанесены на фторопласт с $\varepsilon = 2,05$. Толщина подложки $h = 0,15 \lambda_0$. К теневой стороне подложки примыкает проводящий плоский экран. На рис. 20 представлены ЧХ модулей и фаз элементов поляризационной матрицы рассеяния S_{22} и S_{12} для случая нормального падения возбуждающей волны, поляризованной либо вдоль оси Ox , либо вдоль оси Oy декартовой системы координат (поляризации 1 и 2, соответственно).

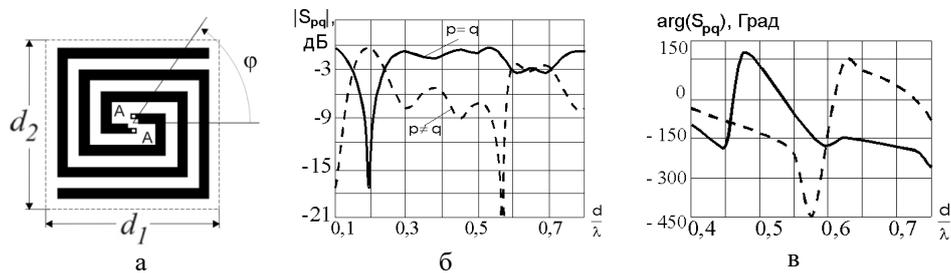


Рис. 20. Микрополосковая отражательная решетка из спиральных элементов: а – топология ячейки; б – ЧХ модулей элементов ПМР; б – ЧХ фаз элементов ПМР.

Как видно из графиков, исследуемая структура не только трансформирует линейную поляризацию в круговую при значениях d/λ от 0,6 до 0,75, в ней также при $d/\lambda = 0,2$ наблюдается твист-эффект. Действительно, описанная микрополосковая дифракционная решетка в диапазоне изменения относительной длины витка l/λ от 0,58 до 0,72 при отражении трансформирует линейно поляризованную волну в волну круговой поляризации. В указанном диапазоне значения модулей S_{22} и S_{12} очень близки, разность фаз приближается к 270° (или -90°).

Заключение. На основе проведенных в настоящей работе численных исследований:

- ♦ проанализированы характеристики рассеяния многослойных мультирешеточных печатных поляризационно-избирательных поверхностей, используемых для построения антенных обтекателей СВЧ-диапазона;

- ♦ показана возможность эффективного использования при проектировании твист-поляризаторов, разработанной математической модели периодической решетки печатных и/или щелевых элементов. Благодаря достаточной универсальности модели удалось исследовать твист-поляризаторы не только в виде однослойных решеток с элементами простой формы, но и в виде совмещенных и многослойных решеток. Применение последних позволяет строить твист-поляризаторы, не только улучшенными диапазонными характеристиками, но и создавать многофункциональные устройства;

- ♦ проведенные численные исследования позволяют утверждать, что использование микрополосковых отражательных антенных решеток с печатными элементами, имеющими сложную топологию, открывает дополнительные возможности по поляризационной фильтрации и трансформации поляризации полей, отраженных от и/или прошедших сквозь такие решетки электромагнитных волн. В частно-

сти, показано, что с помощью решеток печатных и апертурных элементов сложной топологии (Ω - и ТФН-типа, S - и Z-образных, а также спиральных элементов) реализуются не только твист-поляризаторы, но и дифракционные структуры, преобразующие вид поляризации поля (линейно поляризованное поле в поле круговой поляризации и наоборот).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Касьянов А.О.* Частотно-избирательные поверхности. Методы проектирования и области применения: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 150 с.
2. *Yatsenko V.V., Maslovski S.I., Tretyakov S.A., Prosvirnin S.L., Zouhdi S.* Plane-wave reflection from double arrays of small magnetoelectric scatterers // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. – January 2003. – Vol. 51, No. 1. – P. 2-11.
3. *Zouhdi S., Couenon G.E., Fourier-Lamer A.* Scattering from a periodic array of thin planar chiral structures – calculation and measurements // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. – January 2003. – Vol. 47, No. 1. – P. 1061-1065.
4. *Касьянов А.О.* Математическое моделирование и расчет характеристик рассеяния печатного частотно-избирательного антенного обтекателя // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 6 (216). – С. 129-139.
5. *Бакланов Е.В.* Комплексная форма записи эллиптически поляризованной волны // *Вестник НГУ. Серия Физика*. – 2008. – Т. 3. – Вып. 2. – С. 118-122.
6. *Касьянов А.О.* Антенный обтекатель с угловой фильтрацией на основе металлодиэлектрических дифракционных решеток // *Радиотехника*. – 2021. – Т. 85, № 7. – С. 70-79.
7. *Касьянов А.О. и др.* Разработка и применение композитных материалов с требуемыми свойствами: монография / под ред. М.Ю. Звездиной. – Новосибирск: Изд-во АНС «СибБАН», 2016. – 198 с.
8. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Отражательные антенные решетки как микроволновые компоненты интеллектуальных покрытий // *Антенны*. – 2001. – Вып. 4 (50). – С. 12-16.
9. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Численное исследование многофункциональных обтекателей антенн судовых РЛС // *Матер. 3-й МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» – (ПТСПИ'99)*. – Владимир, 1999. – С. 160-166.
10. *Касьянов А.О., Кошкидько В.Г.* Применение электродинамических методов анализа при разработке антенных систем судовых РЛС // *Известия ТРТУ. Спец. Выпуск: Матер. 45-й НТК ППС ТРТУ*. – 2000. – № 1. – С. 19.
11. *Касьянов А.О.* Обтекатель антенны судовой радиолокационной станции // *Тр. Международной научной конференции "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" ИРЭМВ-2003, 16-20 июня 2003 г.* – Таганрог: ТРТУ. – С. 96-99.
12. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Дифракционные решетки как устройства пространственно-частотной и поляризационной селекции // *Сб. трудов III Международного симпозиума «Конверсия науки – международному сотрудничеству» (Сибконверс'99)*. – Томск, 1999. – С. 406-408.
13. *Kasyanov A.O., Obukhovets V.A.* Polarizing filters, converters and modulators based on controllable microstrip diffraction arrays // *Proceedings of III International Seminar/Workshop on DIPED'98, 2-5 November 1998, Tbilisi*. – P. 46-49.
14. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Поляризационные фильтры, преобразователи и модуляторы на основе управляемых микрополосковых дифракционных решеток // *Всероссийская конференция «Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности»: Сб. тр. Ч. 2.* Таганрог, 1999. – С. 121-126.
15. *Касьянов А.О., Суматохин К.В., Ильин И.В.* Реконфигурируемый микроволновый модуль цифрового управляемого радиоэлектронного покрытия с пространственно-временной адресацией на основе микрополосковой отражательной антенной решетки // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2013. – № 8. – С. 101-109.
16. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Суматохин К.В.* Управляемые твист-рефлекторы на основе реконфигурируемых микрополосковых решеток // *Антенны*. – 2013. – Вып. 10 (197). – С. 29-36.
17. *Касьянов А.О.* Апертурные антенны в печатном исполнении. Методы проектирования и области применения. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 203 с.

18. Касьянов А.О. Результаты численного исследования характеристик рассеяния антенных обтекателей на основе металлodieлектрических дифракционных решеток // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2 (219). – С. 91-105.
19. Касьянов А.О. Частотно-избирательный антенный обтекатель на основе металлodieлектрических дифракционных решеток и перфорированных экранов // Антенны. – 2021. – № 3. – С. 39-49.
20. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование. – М.: Радиотехника. 2006. – 240 с.
21. Kas'yanov A.O. The polarizing Properties of Periodic Printed Reflectarrays from the Elements of The Complicated Shape // Proceedings of the 24-th ESA Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas, 30 May-1 June 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
22. Осипов О.В., Почепцов А.О., Антипова Т.А. Электродинамика планарных отражающих структур с киральными слоями на основе тонкопроволочных спиральных элементов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 59-65.
23. Касьянов А.О. Конструктивный синтез печатного фазокорректирующего твист-рефлектора с улучшенными характеристиками // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 30-38.
24. Касьянов А.О. Твист-поляризаторы на основе микрополосковых дифракционных решеток // Антенны. – 2002. – Вып. 5 (60). – С. 34-39.
25. Касьянов А.О., Касьянова А.Н. Электродинамический анализ и разработка САПР-ориентированных математических моделей печатных антенных решеток: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 300 с.

REFERENCES

1. Kas'yanov A.O. Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya: monografiya [Frequency-selective surfaces. Design methods and applications: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 150 p.
2. Yatsenko V.V., Maslovski S.I., Tretyakov S.A., Prosvirnin S.L., Zouhdi S. Plane-wave reflection from double arrays of small magnetoelectric scatterers, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, January 2003, Vol. 51, No. 1, pp. 2-11.
3. Zouhdi S., Couenon G.E., Fourier-Lamer A. Scattering from a periodic array of thin planar chiral structures – calculation and measurements, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, January 2003, Vol. 47, No. 1, pp. 1061-1065.
4. Kas'yanov A.O. Matematicheskoe modelirovanie i raschet kharakteristik rasseyaniya pechatnogo chastotno-izbiratel'nogo antennoogo obtekatel'ya [Mathematical modeling and calculation of scattering characteristics of a printed frequency-selective antenna fairing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6 (216), pp. 129-139.
5. Baklanov E.V. Kompleksnaya forma zapisi ellipticheskoi polarizovannoy volny [Complex form of elliptically polarized wave recording], *Vestnik NGU. Seriya Fizika* [Bulletin of the NSU. Physics series], 2008, Vol. 3, Issue 2, pp. 118-122.
6. Kas'yanov A.O. Antennnyy obtekatel' s uglovoy fil'tratsiey na osnove metallo-dielektricheskikh difraktsionnykh reshetok [Antenna fairing with angular filtration based on metal-dielectric diffraction gratings], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2021, Vol. 85, No. 7, pp. 70-79.
7. Kas'yanov A.O. i dr. Razrabotka i primeneniye kompozitnykh materialov s trebuemyimi svoystvami: monografiya [Development and application of composite materials with the required properties: monograph], ed. by M. Yu. Zvezdinoy. Novosibirsk: Izd-vo ANS «SibAK», 2016, 198 p.
8. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Otrazhatel'nye antennnye reshetki kak mikrovolnovye komponenty intellektual'nykh pokrytiy [Reflective antenna arrays as microwave components of intelligent coatings], *Antenny* [Antennas], 2001, Issue 4 (50), pp. 12-16.
9. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Chislennoe issledovanie mnogofunktsional'nykh obtekatel'ey anten sudovykh RLS [Numerical study of multifunctional fairings of ship radar antennas], *Mater. 3-y MNTK «Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii» – (PTSPI'99)* [Materials of the 3rd ISTC "Promising technologies in the media of information transmission" – (PTSPI'99)]. Vladimir, 1999, pp. 160-166.
10. Kas'yanov A.O., Koshkid'ko V.G. Primeneniye elektrodinamicheskikh metodov analiza pri razrabotke antennykh sistem sudovykh RLS [Application of electrodynamic analysis methods in the development of antenna systems of ship radars], *Izvestiya TRTU. Spets. Vypusk: Mater. 45-y NTK PPS TRTU* [Izvestia TRTU. Special Issue: Materials of the 45th STC of the TRTU Teaching Staff], 2000, No. 1, pp. 19.

11. Kas'yanov A.O. Obtekatel' anteny sudovoy radiolokatsionnoy stantsii [The fairing of the antenna of the ship's radar station], *Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln" IREMV-2003, 16-20 iyunya 2003 g.* [Proceedings of the International Scientific Conference "Radiation and Scattering of electromagnetic waves" IREMV-2003, June 16-20, 2003]. Taganrog: TRTU, pp. 96-99.
12. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Difraktsionnye reshetki kak ustroystva prostranstvenno-chastotnoy i polarizatsionnoy selektsii [Diffraction gratings as devices of spatial-frequency and polarization selection], *Sb. trudov III Mezhdunarodnogo simpoziuma «Konversiya nauki – mezhdunarodnomu sotrudnichestvu» (Sibkonvers'99). Tomsk, 1999* [Proceedings of the III International Symposium "Conversion of Science to International cooperation" (Sibconverse'99). Tomsk, 1999], pp. 406-408.
13. Kasyanov A.O., Obukhovets V.A. Polarizing filters, converters and modulators based on controllable microstrip diffraction arrays, *Proceedings of III International Seminar/Workshop on DIPED'98, 2-5 November 1998, Tbilisi*, pp. 46-49.
14. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Polarizatsionnye fil'try, preobrazovateli i modulyatory na osnove upravlyaemykh mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Polarizing filters, converters and modulators on the basis of controlled microstrip diffraction gratings], *Vserossiyskaya konferentsiya «Komp'yuternye tekhnologii v inzhenernoy i upravlencheskoy deyatel'nosti»: Sb. tr. Ch. 2. Taganrog, 1999* [All-Russian Conference "Computer Technologies in engineering and Management activities": Collection of works Part 2. Taganrog, 1999], pp. 121-126.
15. Kas'yanov A.O., Sumatokhin K.V., Il'in I.V. Rekonfiguriruemyy mikrovolnovyy modul' tsifrovogo upravlyaemogo radioelektronnoy pokrytiya s prostranstvenno-vremennoy adresatsiey na osnove mikropoloskovoy otrazhatel'noy antennoy reshetki [Reconfigurable microwave module of a digital controlled radioelectronic coating with spatio-temporal addressing based on a microstrip reflective antenna array], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [The successes of modern radio electronics], 2013, No. 8, pp. 101-109.
16. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Sumatokhin K.V. Upravlyaemye tvist-reflektory na osnove rekonfiguriruemykh mikropoloskovykh reshetok [Controlled twist reflectors based on reconfigurable microstrip arrays], *Antenny* [Antennas], 2013, Issue 10 (197), pp. 29-36.
17. Kas'yanov A.O. Aperturnye anteny v pechatnom ispolnenii. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya [Aperture antennas in printed form. Design methods and applications]. Rostov-on-Donu; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, 203 p.
18. Kas'yanov A.O. Rezul'taty chislennogo issledovaniya kharakteristik rasseyaniya antennoy obtekatel'nykh na osnove metallodielektricheskikh difraktsionnykh reshetok [Results of a numerical study of the scattering characteristics of antenna fairings based on metal-dielectric diffraction gratings], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2 (219), pp. 91-105.
19. Kas'yanov A.O. chastotno-izbiratel'nyy antennoy obtekatel' na osnove metallodielektricheskikh difraktsionnykh reshetok i perforirovannykh ekranov [Frequency-selective antenna fairing based on metal-dielectric diffraction gratings and perforated screens], *Antenny* [Antennas], 2021, No. 3, pp. 39-49.
20. Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O. Mikropoloskovyye otrazhatel'nye antennoy reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovanie [Microstrip reflective antenna arrays. Design methods and numerical modeling]. Moscow: Radiotekhnika. 2006, 240 p.
21. Kasyanov A.O. The polarizing Properties of Periodic Printed Reflectarrays from the Elements of The Complicated Shape, *Proceedings of the 24-th ESA Antenna Workshop on Innovate Periodic Antennas, 30 May-1 June 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*.
22. Osipov O.V., Pocheptsov A.O., Antipova T.A. Elektrodinamika planarnykh otrazhayushchikh struktur s kiral'nymi sloyami na osnove tonkoprovolochnykh spiral'nykh elementov [Electrodynamics of planar reflecting structures with chiral layers based on thin-wire spiral elements], *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems], 2018, Vol. 21, No. 3, pp. 59-65.
23. Kas'yanov A.O. Konstruktivnyy sintez pechatnogo fazokorrektiruyushchego tvist-reflektora s uluchshennymi kharakteristikami [Constructive synthesis of a printed phase-correcting twist reflector with improved characteristics], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2011, No. 9, pp. 30-38.

24. Kas'yanov A.O. Twist-polyarizatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Twist polarizers based on microstrip diffraction gratings], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 5 (60), pp. 34-39.
25. Kas'yanov A.O., Kas'yanova A.N. Elektrodinamicheskii analiz i razrabotka SAPR-orientirovannykh matematicheskikh modeley pechatnykh antennykh reshetok: monografiya [Electrodynamic analysis and development of CAD-oriented mathematical models of printed antenna arrays: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 300 p.

Статью рекомендовал к опубликованию: д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Касьянов Александр Олегович – Южный федеральный университет, e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор.

Kasyanov Alexander Olegovich – Southern Federal University; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio engineering and telecommunication systems; dr. of eng. sc.; professor

УДК 621.372.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-34-42

М.Н. Максимов, С.М. Максимова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА ПУАНКАРЕ-СТЕКЛОВА ДЛЯ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

В статье показана возможность использования фильтра Пуанкаре-Стеклова для обеспечения устойчивости полунатурного моделирования нелинейных систем. Полунатурное моделирование (НПМ) предполагает разбиение исходной системы на части, причём одна часть моделируется численно на компьютере, а вторая часть представлена реальным физическим объектом. Части системы обмениваются данными друг с другом через программно-аппаратный интерфейс, который может быть реализован по-разному и должен обеспечивать устойчивость, а также сходимость результатов полунатурного моделирования к результатам моделирования исходной системы. Варианты построения программно-аппаратных интерфейсов ИТМ, ТЛМ, ТФА, РСД, ДИМ, ГСД и фильтр Пуанкаре-Стеклова описаны в соответствующих литературных источниках. В статье показано, как исходная нелинейная система с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова была разбита на части, что соответственно привело к разбиению на части системы уравнений, описывающей поведение исходной системы. Далее были вычислены значения стабилизирующих параметров фильтра Пуанкаре-Стеклова и в соответствии с полученными значениями скорректированы системы уравнений разбитой на части системы. На следующем этапе в статье приводятся результаты численного моделирования исходной и разбитой на части системы в MATLAB. При моделировании по частям части системы обменивались данными друг с другом на каждом шаге моделирования только один раз с задержкой h . Такой способ численного моделирования разбитой на части системы максимально приближен к процессам, происходящим при полунатурном моделировании систем. Сравнение полученных результатов моделирования исходной и разбитой на части системы позволил сделать вывод, что фильтр Пуанкаре-Стеклова при правильном выборе значений стабилизирующих параметров позволяет обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования как линейных, так и нелинейных систем.

Полунатурное моделирование; устойчивость моделирования по частям; фильтр Пуанкаре-Стеклова.

M.N. Maksimov, S.M. Maksimova

**USING THE FOUR-POLE REPRESENTATION
OF THE POINCARÉ-STEKLOV FILTER FOR HARDWARE IN THE LOOP
SIMULATION OF NONLINEAR SYSTEMS**

The article shows the possibility of using the Poincaré-Steklov filter to ensure the stability of hardware in the loop (HIL) simulation of nonlinear systems. HIL simulation involves splitting the initial system into parts, with one part being modeled numerically on a computer, and the second part is represented by a real physical object. The parts of the system exchange data with each other through a hardware-software interface, which can be implemented in different ways and should ensure stability, as well as convergence of the results of HIL simulation to the results of modeling the original system. The variants of constructing software and hardware interfaces ITM, TLM, TFA, PCD, DIM, GCS and the Poincaré-Steklov filter are described in the relevant literature sources. The article shows how the original nonlinear system was divided into parts using the Poincaré-Steklov filter, which, accordingly, led to the splitting into parts of the system of equations describing the behavior of the original system. Next, it was shown how the values of the stabilizing parameters of the Poincaré-Steklov filter were calculated and the systems of equations of the system divided into parts were corrected in accordance with the obtained values. At the next stage, the article presents the results of numerical modeling of the initial and partitioned system in MATLAB. When modeling in parts, the parts of the system exchanged data with each other at each step of the simulation only once with a delay of h . This method of numerical modeling of a system divided into parts is as close as possible to the processes occurring during semi-natural modeling of systems. A comparison of the obtained simulation results of the initial and the system divided into parts allowed us to conclude that the Poincaré-Steklov filter, with the correct choice of the values of the stabilizing parameters, allows for the stability and convergence of the results of semi-natural modeling of both linear and nonlinear systems.

Hardware in the loop simulation; stability of hardware in the loop simulation; Poincaré-Steklov filter.

Введение. За последнее десятилетие у различных моделирующих сред появилось ещё одно измерение – это возможность осуществить полунатурное моделирование (HIL) исследуемой системы.

Полунатурное моделирование предполагает, что система разбивается на части и одна часть системы моделируется численно, а другая часть системы представлена реальным физическим объектом. При этом на каждом шаге части системы через программно-аппаратный интерфейс обмениваются между собой данными (рассчитанными и измеренными значениями величин) с некоторой задержкой τ .

В литературе описаны различные варианты построения программно-аппаратных интерфейсов ITM, TLM, TFA, PCD, DIM [1–5], GCS [6–15], фильтр Пуанкаре-Стеклова [16, 17], которые должны обеспечивать устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования к результатам моделирования исходной системы.

В статье показано, что фильтра Пуанкаре–Стеклова при правильном выборе параметров может обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования как линейных, так и нелинейных систем.

Постановка задачи. Необходимо используя фильтр Пуанкаре-Стеклова провести моделирование нелинейной системы по частям и продемонстрировать, что при правильном выборе параметров фильтра, он обеспечит устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования такой системы.

Фильтр Пуанкаре-Стеклова, изображённый на рис. 1. Свойства фильтра/четырёхполюсника подробно описаны в [16, 17].

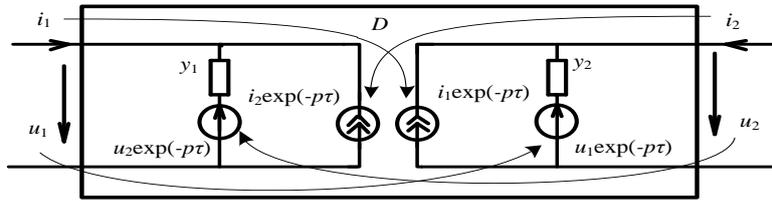


Рис. 1. Четырёхполюсник Пуанкаре-Стеклова

Как видно из рис. 1 фильтр D состоит из управляемых источников тока и напряжения, значения которых равны значениям соответствующих токов и напряжений на входах четырёхполюсника, задержанных на величину τ . Проводимости y_1 и y_2 называются стабилизирующими элементами/параметрами, значения которых существенно влияют на устойчивость процесса моделирования системы по частям.

Y-параметры четырёхполюсника имеют вид:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{y_1+y_2 e^{-2p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} & \frac{-(y_1+y_2)e^{-p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} \\ \frac{-(y_1+y_2)e^{-p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} & \frac{y_2+y_1 e^{-2p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} \end{bmatrix},$$

или можно воспользоваться соотношениями между первичными параметрами проходных четырёхполюсников [18] и найти эквивалентные им Z-параметры в виде:

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{z_1+z_2 e^{-2p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} & \frac{(z_1+z_2)e^{-p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} \\ \frac{(z_1+z_2)e^{-p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} & \frac{z_2+z_1 e^{-2p\tau}}{1-e^{-2p\tau}} \end{bmatrix}.$$

где $z_1 = 1/y_1$, $z_2 = 1/y_2$.

Рассмотрим исходную нелинейную систему, изображённую на рис. 2. На вход системы подаётся синусоидальное напряжение, индуктивность $L_1=L_2=1\text{мГн}$, $Y_3 = 100\text{См}$, работу ключей будем моделировать с помощью изменения проводимостей Y_1 и Y_2 ($1e-12\text{См}$ - ключ открыт, $1e+3\text{См}$ - ключ закрыт).

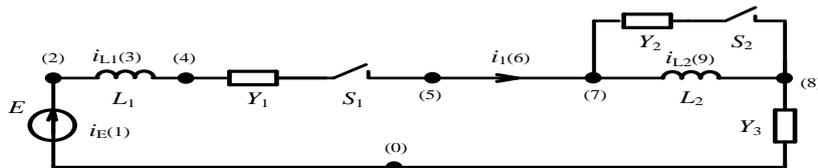


Рис. 2. Исходная система

Интерес к исследованию таких систем возникает при использовании НЛ технологии для моделировании работы трёхфазных инверторов, так как возникают проблемы с обеспечением устойчивости результатов полунатурного моделирования таких систем.

Разбиение исходной системы на части. Разобьём исходную систему на две части как показано на рис. 3. Как описано в [16,17] для обеспечения устойчивости и сходимости моделирования по частям необходимо, чтобы выполнялось условие $y_1 = Y_{\text{вх}}$ и $y_2 = Y_{\text{вых}}$ или $z_1 = Z_{\text{вх}}$ и $z_2 = Z_{\text{вых}}$, где $Y_{\text{вых}}$ и $Y_{\text{вх}}$ или $Z_{\text{вых}}$ и $Z_{\text{вх}}$ это выходная и входная проводимость или сопротивление первой и второй части исходной системы.

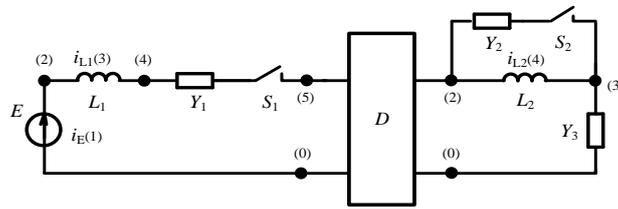


Рис. 3. Разбитая на части исходная система

Если бы исходная система была линейной, то найти значение $Y_{\text{вых}}$ и $Y_{\text{вх}}$ и соответствующим образом установить значения y_1 и y_2 не было бы трудной задачей. Проблема возникает из-за нелинейности исходной системы. Тем не менее, в статье будет продемонстрировано, что фильтр Пуанкаре-Стеклова обеспечивает устойчивость и сходимость моделирования по частям и нелинейной системы.

Систему уравнений, описывающих поведение системы, можно записать используя преобразование Лапласа в виде $(G+pC)X = W$ или после перехода во временную область как $Gx+Cx' = w$ [19]. Если воспользоваться обратной формулой Эйлера, т.е. методом численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, то систему $Gx+Cx' = w$ можно записать в виде:

$$(C+hG)x_{n+1}=Cx_n+hw_{n+1}, \quad (1)$$

где h – шаг по времени (1мс).

Составим систему уравнений по форме (1) для цепи, изображённой на рис. 2. На этом рисунке в скобках указаны номера строк матриц G и C , которые соответствуют или токам ветвей, или напряжениям в узлах. Сами матрицы будут иметь вид:

$$x_n^t = [i_E, u_2, i_{L1}, u_4, u_5, i_1, u_7, u_8, i_{L2}];$$

$$G = \begin{bmatrix} 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 1, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 0, & -1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & -1, & Y_1, & -Y_1, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & -Y_1, & Y_1, & 1, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & 0, & -1, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -1, & Y_2, & -Y_2, & 1 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -Y_2, Y_2+Y_3, & -1 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & -1, & 0 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & -L_1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -L_2 \end{bmatrix};$$

Получим аналогичный результат для системы разбитой на части (см. рис. 3). Матрицы двух фрагментов системы будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 x1_h^T &= [i_E, u_2, i_{L1}, u_4, u_5, i_{z1}] \\
 G1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & Y_1 & Y_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_1 & Y_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & z_1 \end{bmatrix}; \\
 C1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
 x2_h^T &= [i_{z2}, u_3, u_4, i_{L2}]; \\
 G2 &= \begin{bmatrix} z_2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & Y_2 & -Y_2 & 1 \\ 0 & -Y_2 & Y_2+Y_3 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}; \\
 C2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L2 \end{bmatrix};
 \end{aligned}$$

Найдём дополнение Шура [20] для матрицы $Sys1 = C1+h*G1$ относительно коэффициента $Sys1[6][6]$, т.е. $Z_{вых}$, и дополнение Шура для матрицы $Sys2 = C2+h*G2$ относительно коэффициента $Sys2[1][1]$, т.е. $Z_{вх}$, при условии, что ключи замкнуты ($Y_1 = Y_2 = 1e+3\text{См}$ и $z_1 = z_2 = 0$). Далее скорректируем $z_1 = Z_{вх}$ и $z_2 = Z_{вых}$ и подставим их новые значения в матрицы $Sys1$ и $Sys2$.

Как исходная, так и разбитая на части система может при разных положениях ключей S_1 и S_2 находится в четырёх разных состояниях, но дополнение Шура мы вычисляем только для одного состояния (S_1 и S_2 закрыты). Тем не менее, разбитая на части система по-прежнему остаётся устойчивой, что можно продемонстрировать с помощью результатов численного моделирования.

Результаты моделирования системы по частям. Промоделируем исходную и разбитую на части систему в MATLAB [21], при этом части системы будут обмениваться данными друг с другом на каждом шаге моделирования только один раз с задержкой h . Такой способ численного моделирования разбитой на части системы максимально приближен к процессам, происходящим при полунатурном моделировании систем.

Ниже на рис. 4 представлены графики включения/выключения ключей S_1 и S_2 . Если проводимость ключа равна $1e+3$, то ключ закрыт, если $1e-12$, то ключ открыт.

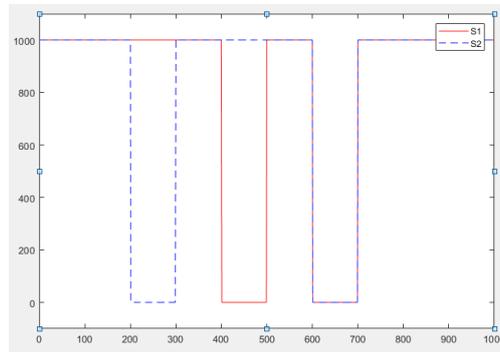


Рис. 4. Графики включения/выключения ключей S1 и S2

На рис. 5 изображены графики изменения напряжения в пятом узле исходной системы (U5) и разбитой на части (UP5) при однократном обмене данными между частями системы на каждом шаге моделирования.

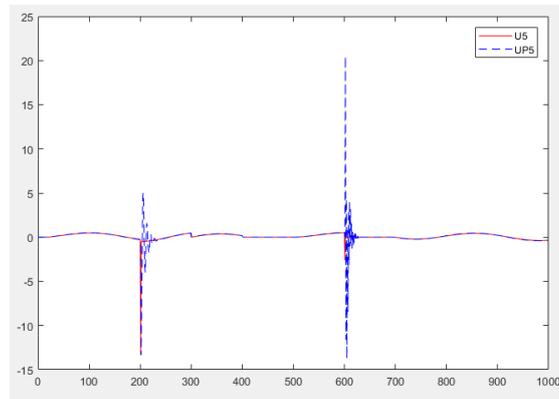


Рис. 5 Графики изменения напряжения в пятом узле исходной системы (U5) и разбитой на части (UP5)

На рис. 6 показаны графики изменения тока через индуктивность L_2 у исходной системы (CurL2) и системы разбитой на части (CurPL2) при однократном обмене данными между частями системы на каждом шаге моделирования.

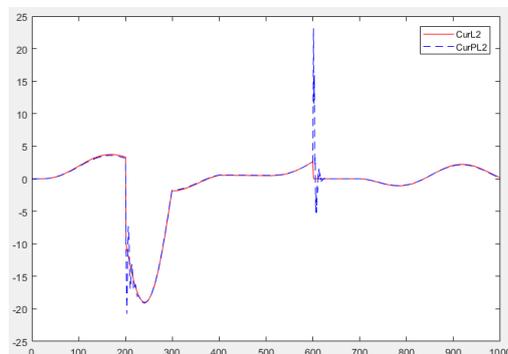


Рис. 6. Графики изменения тока через индуктивность L_2 у исходной системы (CurL2) и системы разбитой на части (CurPL2)

Как видно из рисунков результаты моделирования системы по частям устойчивы и совпадают с результатами моделирования исходной системы. Если на каждом временном шаге можно было бы выполнять несколько итераций, то результаты совпали бы полностью.

Заключение. В статье была поставлена задача, используя фильтр Пуанкаре-Стеклова, провести моделирование нелинейной системы по частям и продемонстрировать, что при правильном выборе параметров фильтра, он обеспечит устойчивость и сходимости результатов полунатурного моделирования такой системы.

На первом этапе используя четырёхполосник Пуанкаре-Стеклова было выполнено разбиение системы на части. Далее, используя обратную формулу Эйлера был осуществлён переход от системы дифференциальных уравнений частей системы к СЛАУ. После чего для проверки полученных результатов были проведены численные эксперименты в среде MATLAB по исследованию устойчивости результатов полунатурного моделирования выбранной системы.

Исследования показали, что при правильном выборе значений стабилизирующих параметров можно добиться устойчивости результатов полунатурного моделирования выбранной нелинейной системы.

Таким образом, поставленная в статье задача была выполнена. Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что правильно подобрав значения стабилизирующих параметров фильтра Пуанкаре-Стеклова можно попытаться обеспечить устойчивость результатов полунатурного моделирования даже в случае, если исходная система нелинейная.

Оценка значений стабилизирующих параметров фильтра Пуанкаре-Стеклова при различных состояниях нелинейной системы позволяет сузить диапазон значений, при которых они могут обеспечить устойчивость результатов полунатурного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ren W., Steurer M., Baldwin T.L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms // IEEE Transactions on Industry Applications. – Jul/Aug 2008. – Vol. 44, No. 4. – P. 1286-1294.
2. Santi E., Siegers J. Improved power hardware-in-the-loop interface algorithm using wideband system identification // Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2014. – P. 1198-1204.
3. Tucker J. Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Considerations and Implementation Methods for Electrically Coupled Systems // MS Thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011.
4. Mersenski R. Evaluation of a New Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Interface Algorithm for Current Controlled Amplifiers // M.S. thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011.
5. Paran S., Edrington C.S. Improved power hardware in the loop interface methods via impedance matching // Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium. – April 2013. – P. 342-346.
6. Дмитриев-Здоров В.Б., Ляшев В.А., Максимов М.Н. Реализация распределенного моделирования электрических цепей в локальных вычислительных сетях // Теле-коммуникации. – 2001. – № 11. – С. 15-19.
7. Dmitriev-Zdorov V., Dougle R., Lyashev V., Maksimov M., Popov V., Solodovnik E. Distributed Simulation of the Electromechanical System in the VTB // Fifth IASTED International Conference Power and Energy Systems (PES 2001) in Tampa, FL, November 19-22, 2001.
8. Dmitriev-Zdorov V.B., Ljashev V.A., Maksimov M.N. Modified concurrent relaxation method and improving the stability of numerical analysis by partitioning // Conf. IT-2002, part#3. – Taganrog: TSURE, 2002. – P. 5-37.
9. Дмитриев-Здоров В.Б., Максимов М.Н. Моделирование по частям // Матер. международной научной конференции «Динамика процессов в природе, обществе и технике; информационные аспекты». – Ч. 2. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – 108 с.
10. Максимов М.Н. Распределенное моделирование системы разбитой на три части // Матер. международной научной конференции «Системный подход в науках о природе, человеке и технике». – Ч. 5. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – С. 32-37.

11. Попов В.П., Максимов М.Н., Мерёжин Н.И. Об устойчивости и сходимости моделирования по частям. Российская Академия наук // Вестник южного научного центра. – 2005. – Т. 1. – Вып. 3. – С. 11-21.
12. Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N., Popov V.P., Bastos J., Monti A., Dougal R. Generalized Coupling Scheme for Distributed Simulations of Power Systems // Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, March 2006.
13. Максимов М.Н. Технология моделирования систем по частям // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): Тр. международной научной конференции (Москва, 28 марта – 1 апреля 2011 г.). – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – 705 с. – ISBN 978-5-696-04090-5.
14. Lyashev V. Stability of Concurrent Relaxation Algorithm // Izvestia SFedU. Engineering Science. – 2010. – No. 2. – P. 39-45.
15. Lyashev V. Accuracy issue in delayed feed-back decomposition systems // Izvestia SFedU. Engineering Science. – 2010. – No. 1. – P. 201-204.
16. Максимов М.Н., Мерёжин Н.И., Федосов В.П., Лабынцев А.В., Максимов А.А. Эквивалентная схема швивающего четырехполюсника // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 162-169. – ISSN 1064 2269. – <http://elibrary.ru/item.asp?id=25069547>.
17. Mikhail Maksimov, Llyashev Vladimir, Merezhin Nikolay, Sinyutin Sergey. Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2017. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. Popov V. Fundamentals of Circuit Theory. – Moscow: YuRight Publishing, 2013. – 285 p.
19. Влах И., Синьхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
20. The Schur Complement and Its Applications / ed. by Fuzhen Zhang. Series: Numerical Methods and Algorithms. – Springer Verlag, 2005. – Vol. 4. – 295 p.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021668540 «Программа для полунатурного моделирования нелинейной системы с использованием четырёхполюсного представления фильтра Пуанкаре-Стеклова».

REFERENCES

1. Ren W., Steurer M., Baldwin T.L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jul/Aug 2008, Vol. 44, No. 4, pp. 1286-1294.
2. Santi E., Siegers J. Improved power hardware-in-the-loop interface algorithm using wideband system identification, *Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2014, pp. 1198-1204.
3. Tucker J. Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Considerations and Implementation Methods for Electrically Coupled Systems, *MS Thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011*.
4. Mersenski R. Evaluation of a New Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Interface Algorithm for Current Controlled Amplifiers, *M.S. thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011*.
5. Paran S., Edrington C.S. Improved power hardware in the loop interface methods via impedance matching, *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, April 2013, pp. 342-346.
6. Dmitriev-Zdorov V.B., Lyashev V.A., Maksimov M.N. Realizatsiya raspredelennoogo modelirovaniya elektricheskikh tsepey v lokal'nykh vychislitel'nykh setyakh [Implementation of distributed modeling of electrical circuits in local area networks], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2001, No. 11, pp. 15-19.
7. Dmitriev-Zdorov V., Dougle R., Lyashev V., Maksimov M., Popov V., Solodovnik E. Distributed Simulation of the Electromechanical System in the VTB, *Fifth IASTED International Conference Power and Energy Systems (PES 2001) in Tampa, FL, November 19-22, 2001*.
8. Dmitriev-Zdorov V.B., Ljashev V.A., Maksimov M.N. Modified concurrent relaxation method and improving the stability of numerical analysis by partitioning, *Int. Conf. IT-2002, part#3*. – Taganrog: TSURE, 2002, pp. 5-37.
9. Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N. Modelirovanie po chastyam [Modeling in parts], *Material. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Dinamika protsessov v prirode, obschestve i tekhnike; informatsionnye aspekty»* [Materials of the international scientific conference "Dynamics of processes in nature, society and technology; information aspects"]. Part 2. Taganrog: TRTU, 2003, 108 p.

10. *Maksimov M.N.* Raspredelennoe modelirovanie sistemy razbitoy na tri chasti [Distributed modeling of a system divided into three parts], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy podkhod v naukakh o prirode, cheloveke i tekhnike»* [Materials of the international scientific conference "A systematic approach in the sciences of nature, man and technology"]. Part 5. Taganrog: TRTU, 2004, pp. 32-37.
11. *Popov V.P., Maksimov M.N., Merezhin N.I.* Ob ustoychivosti i skhodimosti modelirovaniya po chastyam. Rossiyskaya Akademiya nauk [On the stability and convergence of modeling in parts. Russian Academy of Sciences], *Vestnik yuzhnogo nauchnogo tsentra* [Bulletin of the Southern Scientific Center], 2005, Vol. 1, Issue 3, pp. 11-21.
12. *Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N., Popov V.P., Bastos J., Monti A., Dougal R.* Generalized Coupling Scheme for Distributed Simulations of Power Systems, *Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, March 2006.
13. *Maksimov M.N.* Tekhnologiya modelirovaniya sistem po chastyam [Technology of systems modeling in parts], *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2011): Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Moskva, 28 marta – 1 aprelya 2011 g.)* [Parallel computing technologies (PaVT'2011): Proceedings of the International Scientific Conference (Moscow, March 28 - April 1, 2011)]. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2011, 705 p. ISBN 978-5-696-04090-5.
14. *Lyashev V.* Stability of Concurrent Relaxation Algorithm, *Izvestia SFedU. Engineering Science*, 2010, No. 2, pp. 39-45.
15. *Lyashev V.* Accuracy issue in delayed feed-back decomposition systems, *Izvestia SFedU. Engineering Science*, 2010, No. 1, pp. 201-204.
16. *Maksimov M.N., Merezhin N.I., Fedosov V.P., Labyntsev A.V., Maksimov A.A.* Ekvivalentnaya skhema sshivayushchego chetyrekhpolusnika [Equivalent scheme of a crosslinking four-pole], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2016, Vol. 61, No. 2, pp. 162-169. ISSN 1064 2269. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25069547>.
17. *Mikhail Maksimov, Llyashev Vladimir, Merezhin Nikolay, Sinyutin Sergey.* Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2017. pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. *Popov V.* Fundamentals of Circuit Theory. Moscow: YuRight Publishing, 2013, 285 p.
19. *Vlakh I., Singkhal K.* Mashinnye metody analiza i proektirovaniya elektronnykh skhem [Machine methods of analysis and design of electronic circuits]: trans. from English. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 560 p.
20. The Schur Complement and Its Applications, ed. by Fuzhen Zhang. Series: Numerical Methods and Algorithms. Springer Verlag, 2005, Vol. 4, 295 p.
21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2021668540 «Programma dlya polunaturalnogo modelirovaniya nelineynoy sistemy s ispol'zovaniem chetyrekhpolusnogo predstavleniya fil'tra Puankare-Steklova» [Certificate of state registration of the computer program No. 2021668540 "Program for semi-natural modeling of a non-linear system using a four-pole representation of the Poincare-Steklov filter"].

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Р.Г.Шаповалов.

Максимов Михаил Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: maksimovm@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

Максимова София Михайловна – Политехнический институт филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет»; e-mail: sofiamaksimova.2003@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634623414; учебная часть; студентка.

Maksimov Mikhail Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: maksimovm@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamental of radioengineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Maksimova Sofia Mikhailovna – Polytechnic Institute branch of the Don State Technical University in Taganrog; e-mail: sofiamaksimova.2003@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634623414; academic unit; student.

М.Н. Максимов, С.М. Максимова

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКА ПУАНКАРЕ-СТЕКЛОВА
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРФЕЙСА ПРИ ПОЛУНАТУРНОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ**

В статье рассматривается возможность применения фильтра Пуанкаре–Стеклова для построения интерфейса при полунатурном моделировании системы. Приводится Z и Y – форма представления четырёхполосника. Полунатурное моделирование (HIL) предполагает разбиение исходной системы на части, причём одна часть моделируется численно на компьютере, а вторая часть представлена реальным физическим объектом. Части системы обмениваются данными друг с другом через программно-аппаратный интерфейс, который может быть реализован по-разному и должен обеспечивать устойчивость, а также сходимость результатов полунатурного моделирования к результатам моделирования исходной системы. Варианты построения программно-аппаратных интерфейсов ITM, TLM, TFA, PCD, DIM, GCS и фильтр Пуанкаре-Стеклова описаны в соответствующих литературных источниках. В статье показано, как исходная система с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова была разбита на части, что соответственно привело к разбиению на части системы уравнений, описывающей поведение исходной системы. Далее были вычислены значения стабилизирующих параметров фильтра Пуанкаре-Стеклова и в соответствии с полученными значениями скорректированы системы уравнений разбитой на части системы. На следующем этапе в статье приводятся результаты численного моделирования исходной и разбитой на части системы в MATLAB. При моделировании по частям части системы обменивались данными друг с другом на каждом шаге моделирования только один раз с задержкой τ равной шагу моделирования. Такой способ численного моделирования разбитой на части системы максимально приближен к процессам, происходящим при полунатурном моделировании систем. Сравнение полученных результатов моделирования исходной и разбитой на части системы позволило сделать вывод, что фильтр Пуанкаре-Стеклова при правильном выборе значений стабилизирующих параметров позволяет обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования систем.

Полунатурное моделирование; устойчивость моделирования по частям; фильтр Пуанкаре-Стеклова.

M.N. Maksimov, S.M. Maksimova

**APPLICATION OF THE FOUR-POLE POINCARÉ-STEKLOV IN INTERFACE
CONSTRUCTION FOR HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION**

The article considers the possibility of using the Poincaré-Steklov filter to build an interface for hardware in the loop (HIL) simulation of system. The Z and Y forms of the filter representation are given. HIL simulation involves splitting the initial system into parts, with one part being modeled numerically on a computer, and the second part is represented by a real physical object. The parts of the system exchange data with each other through a hardware-software interface, which can be implemented in different ways and should ensure stability, as well as convergence of the results of HIL simulation to the results of modeling the original system. The variants of constructing software and hardware interfaces ITM, TLM, TFA, PCD, DIM, GCS and the Poincaré-Steklov filter are described in the relevant literature sources. The article shows how the original nonlinear system was divided into parts using the Poincaré-Steklov filter, which, accordingly, led to the splitting into parts of the system of equations describing the behavior of the original system. Next, it was shown how the values of the stabilizing parameters of the Poincaré-Steklov filter were calculated and the systems of equations of the system divided into parts were corrected in accordance with the obtained values. At the next stage, the article presents the results of numerical modeling of the initial and partitioned system in MATLAB. When modeling in parts, the parts of the system exchanged data with each other at each step of the simulation only once with a delay of h . This meth-

od of numerical modeling of a system divided into parts is as close as possible to the processes occurring during semi-natural modeling of systems. A comparison of the obtained simulation results of the initial and the system divided into parts allowed us to conclude that the Poincare-Steklov filter, with the correct choice of the values of the stabilizing parameters, allows for the stability and convergence of the results of semi-natural modeling of both linear and nonlinear systems.

Hardware in the loop simulation; stability of hardware in the loop simulation; Poincare-Steklov filter.

Введение. В статье рассматривается возможность применения фильтра Пуанкаре–Стеклова для построения интерфейса при полунатурном моделировании системы.

Полунатурное моделирование предполагает, что система разбивается на части и одна часть системы моделируется численно, а другая часть системы представлена реальным физическим объектом. При этом на каждом шаге части системы через программно-аппаратный интерфейс обмениваются между собой данными (рассчитанными и измеренными значениями величин) с некоторой задержкой τ .

В литературе описаны различные варианты построения программно-аппаратных интерфейсов ITM, TLM, TFA, PCD, DIM [1–5], GCS [6–15], фильтр Пуанкаре–Стеклова [16, 17], которые должны обеспечивать устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования к результатам моделирования исходной системы.

В статье показано, что фильтра Пуанкаре–Стеклова при правильном выборе параметров может обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования систем.

Постановка задачи. В статье необходимо рассмотреть возможность применения четырёхполосника Пуанкаре–Стеклова для построения интерфейса при полунатурном моделировании систем, а также исследовать устойчивость и сходимость результатов моделирования системы по частям при использовании этого интерфейса.

Фильтр Пуанкаре–Стеклова в его Z и Y-форме изображены на рис. 1 и 2. Свойства фильтра/четырёхполосника подробно описаны в [16, 17].

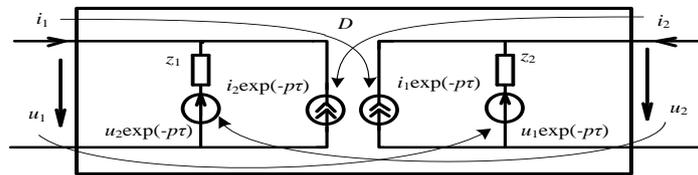


Рис. 1. Z-форма четырёхполосника Пуанкаре–Стеклова

Z-параметры четырёхполосника Пуанкаре–Стеклова для данного представления приведены ниже:

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{z_1 + z_2 e^{-2p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} & \frac{(z_1 + z_2) e^{-p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} \\ \frac{(z_1 + z_2) e^{-p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} & \frac{z_2 + z_1 e^{-2p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} \end{bmatrix}$$

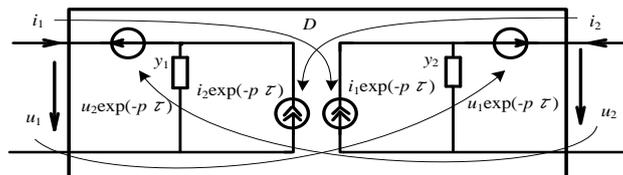


Рис. 2. Y-форма четырёхполосника Пуанкаре–Стеклова

Y-параметры четырёхполюсника Пуанкаре-Стеклова для данного представления приведены ниже:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{y_1 + y_2 e^{-2p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} & \frac{-(y_1 + y_2) e^{-p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} \\ \frac{-(y_1 + y_2) e^{-p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} & \frac{y_2 + y_1 e^{-2p\tau}}{1 - e^{-2p\tau}} \end{bmatrix},$$

Как видно из рис. 1 и 2 фильтр Пуанкаре-Стеклова (D) состоит из управляемых источников тока и напряжения, значения которых равны значениям соответствующих токов и напряжений на входах четырёхполюсника, задержанных на величину τ . Проводимости/сопротивления y_1/z_1 и y_2/z_2 называются стабилизирующими элементами (параметрами). Значения стабилизирующих элементов *всегда являются действительными числами* (отсутствует реактивная составляющая) и существенно влияют на устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования.

Предположим, что исходная система представлена двумя частями A и B, поведение каждой из которых описывается матрицами 2-го порядка (порядок матрицы не имеет значения главное то, что они имеют один «общий» узел, т.е. «пересекаются» одним коэффициентом)

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}.$$

При этом предполагаем, что поведение исходной (не разбитой на части) системы описывается системой уравнений, приведенной ниже:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} + B_{11} & B_{12} \\ 0 & B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}.$$

Будем считать, что эта система уравнений была составлена с помощью модифицированного метода узловых потенциалов [19].

Разобьём эту систему на части с помощью Y-формы фильтра Пуанкаре-Стеклова, причём это можно сделать двумя способами: непосредственно по принципиальной схеме четырёхполюсника или с помощью Y-параметров данного четырёхполюсника.

Продemonстрируем первый способ разбиение системы на части (непосредственно по принципиальной схеме четырёхполюсника):

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ I_{e_1^{-1}} \\ U_{y_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_{21} \\ e_1^{-1} \\ j_1^{-1} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y_2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & B_{11} & B_{12} \\ 0 & 0 & B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{y_2} \\ I_{e_2^{-1}} \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_2^{-1} \\ e_2^{-1} \\ J_{22} \\ J_3 \end{bmatrix},$$

где $e_1^{-1} = u_2 \exp(-p\tau)$, $j_1^{-1} = i_2 \exp(-p\tau)$, $e_2^{-1} = u_1 \exp(-p\tau)$, $j_2^{-1} = i_1 \exp(-p\tau)$ это управляемые источники четырёхполюсника (с помощью верхнего индекса -1 подчёркивается, что значение взято с предыдущего шага); $I_{e_1^{-1}}$ и $I_{e_2^{-1}}$ это ток, протекающий через источники e_1^{-1} и e_2^{-1} соответственно; J_{21} и J_{22} – это независимые источники тока подключённые к общему узлу со стороны части A и B соответственно (т.е. $J_2 = J_{21} + J_{22}$).

Продemonстрируем второй способ разбиение системы на части (с помощью Y-параметров четырёхполюсника):

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} + \frac{y_1+y_2e^{-2p\tau}}{(1-e^{-2p\tau})} & -\frac{(y_2+y_1)e^{-p\tau}}{(1-e^{-2p\tau})} & 0 \\ 0 & -\frac{(y_2+y_1)e^{-p\tau}}{(1-e^{-2p\tau})} & B_{11} + \frac{y_2+y_1e^{-2p\tau}}{(1-e^{-2p\tau})} & B_{12} \\ 0 & 0 & B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_{21} \\ J_{22} \\ J_3 \end{bmatrix},$$

после преобразований получим:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} + y_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{11} + y_2 & B_{12} \\ 0 & 0 & B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_{21} - J_{21-2} + A_{21}U_{1-2} + A_{22} * U_{2-2} - y_2U_{2-2} + (y_1 + y_2)U_{3-1} \\ J_{22} - J_{22-2} + B_{11}U_{3-2} + B_{12} * U_{4-2} - y_1U_{3-2} + (y_1 + y_2)U_{2-1} \\ J_3 \end{bmatrix}$$

где с помощью отрицательного верхнего индекса -1 и -2, показывается, что значение берётся с задержкой на τ и 2τ соответственно; $J_{21-1} = A_{21}U_{1-2} + A_{22} * U_{2-2}$, $J_{22-1} = B_{11}U_{3-2} + B_{12} * U_{4-2}$.

Таким образом, использование Y-параметров четырёхполюсника позволило избавиться от управляемых источников напряжения e_1 и e_2 в четырёхполюснике, но усложнило управление источниками тока j_1 и j_2 .

Аналогичный (дуальный) результат можно получить, используя метод контурных токов для составления системы уравнений, описывающих исходную систему и Z-форму фильтра Пуанкаре-Стеклова, чтобы разбить её на части.

Разбиение исходной системы на части. Рассмотрим исходную систему, изображённую на рис. 3. На вход системы подаётся напряжение в виде меандра, индуктивность $L_1 = L_2 = 1\text{мГн}$, $Y_1 = Y_2 = Y_4 = 1000\text{См}$, $Y_3 = 0.5\text{См}$, $C_1 = 3\text{е-}3$.

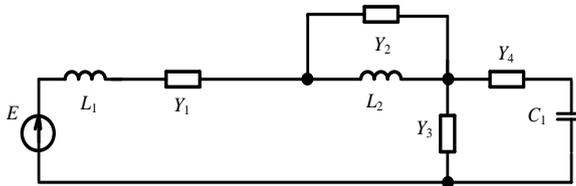


Рис. 3. Исходная система

Интерес к исследованию таких систем возникает при использовании ПИД технологии для моделирования работы трёхфазных инверторов.

Разобьём исходную систему на части с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова как показано на рис. 4.

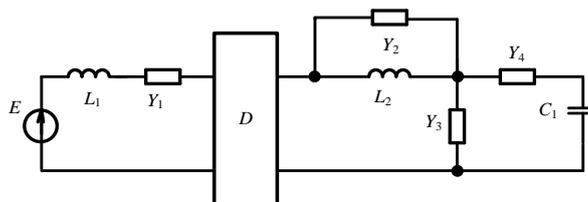


Рис. 4. Разбитая на части система

Аналогично описанному выше, составим с помощью модифицированного метода узловых потенциалов и Y-формы фильтра Пуанкаре Стеклова систему уравнений описывающих поведение исходной системы и разбитой на части. Причём при составлении уравнений системы разбитой на части применим оба способа, описанных выше, чтобы убедиться, что они дают эквивалентные результаты.

Кроме того, промоделируем и сопоставим решения исходной системы и разбитой на части при использовании двух разных методов численного решения системы дифференциальных уравнений: обратной формулы Эйлера и метода трапеции.

Результаты моделирования системы по частям. Промоделируем с шагом $h = 1\text{ мс}$ исходную и разбитую на части систему в MATLAB [21], при этом части системы будут обмениваться данными друг с другом на каждом шаге моделирования только один раз, т.е. задержка $\tau = h = 1\text{ мс}$. Такой способ численного моделирования разбитой на части системы максимально приближен к процессам, происходящим при полунатурном моделировании систем.

Результатом моделирования будет сопоставление тока через L_1 и напряжения на C_1 у исходной системы и системы разбитой на части.

Ниже на рис. 5 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании *обратной формулы Эйлера* и первого способа разбиения системы на части. Перед моделированием с помощью дополнения Шура [20] были вычислены значения стабилизирующих элементов $y_2 = 0.999$, $y_1 = 3.4789$.

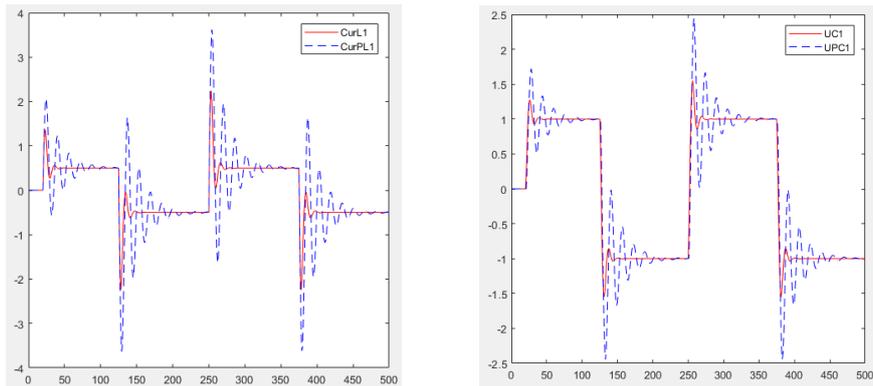


Рис. 5. Графики изменения тока через $L1$ и напряжения на $C1$ у исходной системы ($CurL1$, $UC1$) и разбитой на части ($CurPL1$, $UPC1$) при $y_2 = 0.999$, $y_1 = 3.4789$

Как видно из рис. 5 процесс полунатурного моделирования устойчив, но медленно сходится к результатам моделирования исходной системы.

Ниже на рис. 6 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании обратной формулы Эйлера, но значения стабилизирующих элементов были выбраны равными, т.е. $y_1 = y$; $y_2 = y$; где $y = (0.999 + 3.4789) / 2 = 2.2389$ – среднее значение.

Как видно из рис. 6 процесс полунатурного моделирования устойчив и по сравнению с результатами эксперимента, изображёнными на рис. 5, сходится быстрее.

Результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании *обратной формулы Эйлера* и *второго способа разбиения системы на части* полностью совпадают с результатами первого способа, поэтому здесь не приводятся.

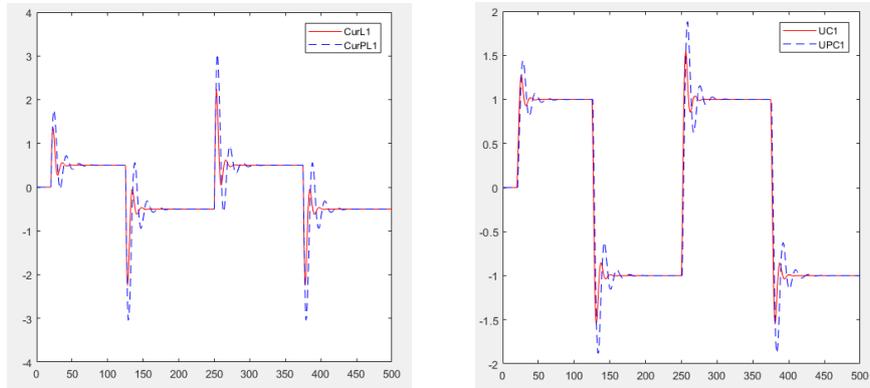


Рис. 6. Графики изменения тока через L_1 и напряжения на C_1 у исходной системы ($CurL1$, $UC1$) и разбитой на части ($CurPL1$, $UPC1$) при $y_1 = y_2 = 2.2389$

На рис. 7 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании метода трапеции и первого способа разбиения системы на части. Перед моделированием с помощью дополнения Шура были вычислены значения стабилизирующих элементов $y_2 = 0.49975$, $y_1 = 6.4227$.

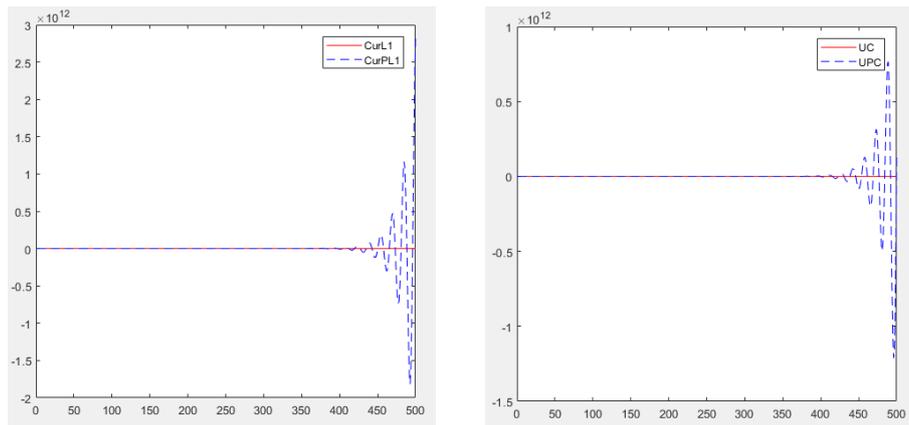


Рис. 7. Графики изменения тока через L_1 и напряжения на C_1 у исходной системы ($CurL1$, $UC1$) и разбитой на части ($CurPL1$, $UPC1$) при $y_2 = 0.49975$, $y_1 = 6.4227$

Как видно из рис. 7 процесс полунатурного моделирования системы становится неустойчивым.

Ниже на рис. 8 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании метода трапеции, но значения стабилизирующих элементов были выбраны равными, т.е. $y_1 = y$; $y_2 = y$; где $y = (0.49975 + 6.4227)/2 = 3.4612$ – среднее значение.

Как видно из рис. 8 при выборе $y_1 = y_2 = 3.4612$ процесс полунатурного моделирования становится устойчивым. Кроме того, видно отличие результатов моделирования исходной системы при использовании обратной формулы Эйлера и метода трапеций. Метод трапеции точнее, но менее устойчив.

Результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании метода трапеции и второго способа разбиения системы на части полностью совпадают с результатами первого способа, поэтому здесь не приводятся.

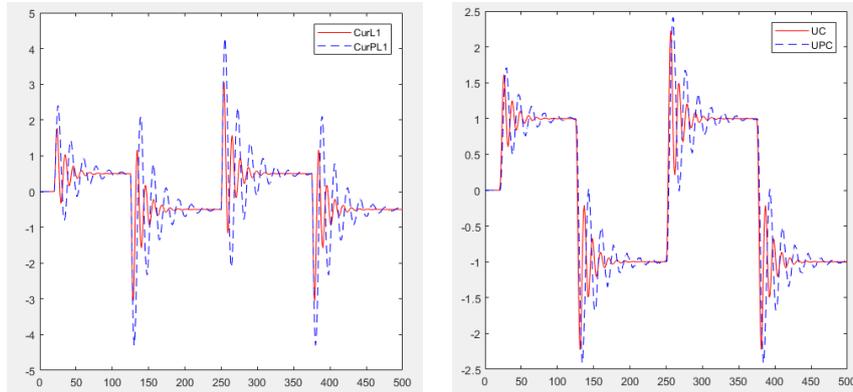


Рис. 8. Графики изменения тока через L_1 и напряжения на C_1 у исходной системы ($CurL1$, $UC1$) и разбитой на части ($CurPL1$, $UPC1$) при $y_1 = y_2 = 3.4612$

На рис. 9 представлены результаты моделирования исходной системы и разбитой на части при использовании метода трапеции и выполнения не одной, а *двух итераций* на каждом шаге. Перед моделированием с помощью дополнения Шура были вычислены значения стабилизирующих элементов $y_2=0.49975$, $y_1 = 6.4227$.

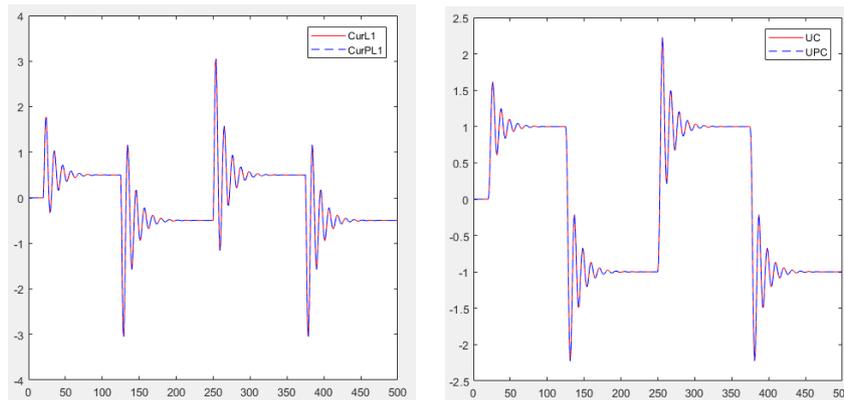


Рис. 9. Графики изменения тока через L_1 и напряжения на C_1 у исходной системы ($CurL1$, $UC1$) и разбитой на части ($CurPL1$, $UPC1$) при $y_2 = 0.49975$, $y_1 = 6.4227$ и выполнении *двух итераций* на каждом шаге

Как видно из графиков при выполнении двух итераций на каждом временном шаге результаты моделирования исходной системы и разбитой на части совпали. Это подтверждает ранее полученные теоретические результаты, но при полунатурном моделировании возможна только одна итерация.

Заключение. Таким образом, анализируя полученные результаты, можно прийти к следующим выводам:

- ◆ устойчивость результатов полунатурного моделирования зависит от порядка метода интегрирования (при использовании обратной формулы Эйлера добиться устойчивости проще, но точность их хуже);
- ◆ предыдущие теоретические результаты по анализу устойчивости процесса моделирования системы по частям с использованием фильтра Пуанкаре-Стеклова, предполагают наличие трёх или хотя бы двух итераций на каждом шаге моделирования, но при полунатурном моделировании есть только *одна итерация*, поэтому практические результаты могут не совпадать с теоретическими;

◆ при полунатурном моделировании значение стабилизирующих элементов лучше задавать равными, выбрав их из диапазона $[y_1, y_2]$.

Следовательно, четырёхполюсник Пуанкаре-Стеклова можно применять для построения интерфейсов взаимодействия частей системы при полунатурном моделировании, но с учётом выше приведённых выводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ren W., Steurer M., Baldwin T.L.* Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – Jul/Aug 2008. – Vol. 44, No. 4. – P. 1286-1294.
2. *Santi E., Siegers J.* Improved power hardware-in-the-loop interface algorithm using wideband system identification // *Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. – 2014. – P. 1198-1204.
3. *Tucker J.* Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Considerations and Implementation Methods for Electrically Coupled Systems // *MS Thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina*, 2011.
4. *Mersenski R.* Evaluation of a New Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Interface Algorithm for Current Controlled Amplifiers // *M.S. thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina*, 2011.
5. *Paran S., Edrington C.S.* Improved power hardware in the loop interface methods via impedance matching // *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. – April 2013. – P. 342-346.
6. *Дмитриев-Здоров В.Б., Ляшев В.А., Максимов М.Н.* Реализация распределенного моделирования электрических цепей в локальных вычислительных сетях // *Телекоммуникации*. – 2001. – № 11. – С. 15-19.
7. *Dmitriev-Zdorov V., Dougle R., Lyashev V., Maksimov M., Popov V., Solodovnik E.* Distributed Simulation of the Electromechanical System in the VTB // *Fifth IASTED International Conference Power and Energy Systems (PES 2001) in Tampa, FL, November 19-22, 2001*.
8. *Dmitriev-Zdorov V.B., Ljashev V.A., Maksimov M.N.* Modified concurrent relaxation method and improving the stability of numerical analysis by partitioning // *Conf. IT-2002, part#3*. – Taganrog: TSURE, 2002. – P. 5-37.
9. *Дмитриев-Здоров В.Б., Максимов М.Н.* Моделирование по частям // *Матер. международной научной конференции «Динамика процессов в природе, обществе и технике; информационные аспекты»*. – Ч. 2. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – 108 с.
10. *Максимов М.Н.* Распределенное моделирование системы разбитой на три части // *Матер. международной научной конференции «Системный подход в науках о природе, человеке и технике»*. – Ч. 5. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – С. 32-37.
11. *Попов В.П., Максимов М.Н., Мерёжин Н.И.* Об устойчивости и сходимости моделирования по частям. *Российская Академия наук // Вестник южного научного центра*. – 2005. – Т. 1. – Вып. 3. – С. 11-21.
12. *Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N., Popov V.P., Bastos J., Monti A., Dougal R.* Generalized Coupling Scheme for Distributed Simulations of Power Systems // *Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, March 2006.
13. *Максимов М.Н.* Технология моделирования систем по частям // *Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): Тр. международной научной конференции (Москва, 28 марта – 1 апреля 2011 г.)*. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – 705 с. – ISBN 978-5-696-04090-5.
14. *Lyashev V.* Stability of Concurrent Relaxation Algorithm // *Izvestia SFedU. Engineering Science*. – 2010. – No. 2. – P. 39-45.
15. *Lyashev V.* Accuracy issue in delayed feed-back decomposition systems // *Izvestia SFedU. Engineering Science*. – 2010. – No. 1. – P. 201-204.
16. *Максимов М.Н., Мерёжин Н.И., Федосов В.П., Лабынцев А.В., Максимов А.А.* Эквивалентная схема шивающего четырехполюсника // *Радиотехника и электроника*. – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 162-169. – ISSN 1064 2269. – <http://elibrary.ru/item.asp?id=25069547>.
17. *Mikhail Maksimov, Llyashev Vladimir, Merezhin Nikolay, Sinyutin Sergey.* Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling // *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. – 2017. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. *Popov V.* *Fundamentals of Circuit Theory*. – Moscow: YuRight Publishing, 2013. – 285 p.

19. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
20. The Schur Complement and Its Applications / ed. by Fuzhen Zhang. Series: Numerical Methods and Algorithms. – Springer Verlag, 2005. – Vol. 4. – 295 p.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021668540 «Программа для полунатурного моделирования нелинейной системы с использованием четырехполосного представления фильтра Пуанкаре-Стеклова».

REFERENCES

1. Ren W., Steurer M., Baldwin T.L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jul/Aug 2008, Vol. 44, No. 4, pp. 1286-1294.
2. Santi E., Siegers J. Improved power hardware-in-the-loop interface algorithm using wideband system identification, *Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2014, pp. 1198-1204.
3. Tucker J. Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Considerations and Implementation Methods for Electrically Coupled Systems, *MS Thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011*.
4. Mersenski R. Evaluation of a New Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) Interface Algorithm for Current Controlled Amplifiers, *M.S. thesis, Dept. of Elect. Eng., Univ. of South Carolina, 2011*.
5. Paran S., Edrington C.S. Improved power hardware in the loop interface methods via impedance matching, *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, April 2013, pp. 342-346.
6. Dmitriev-Zdorov V.B., Lyashev V.A., Maksimov M.N. Realizatsiya raspredelennoy modelirovaniya elektricheskikh tsepey v lokal'nykh vychislitel'nykh setyakh [Implementation of distributed modeling of electrical circuits in local area networks], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2001, No. 11, pp. 15-19.
7. Dmitriev-Zdorov V., Dougle R., Lyashev V., Maksimov M., Popov V., Solodovnik E. Distributed Simulation of the Electromechanical System in the VTB, *Fifth IASTED International Conference Power and Energy Systems (PES 2001) in Tampa, FL, November 19-22, 2001*.
8. Dmitriev-Zdorov V.B., Ljashev V.A., Maksimov M.N. Modified concurrent relaxation method and improving the stability of numerical analysis by partitioning, *Int. Conf. IT-2002, part#3*. – Taganrog: TSURE, 2002, pp. 5-37.
9. Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N. Modelirovanie po chastyam [Modeling in parts], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Dinamika protsessov v prirode, obshchestve i tekhnike; informatsionnye aspekty»* [Materials of the international scientific conference "Dynamics of processes in nature, society and technology; information aspects"]. Part 2. Taganrog: TRTU, 2003, 108 p.
10. Maksimov M.N. Raspredelennoe modelirovanie sistemy razbitoy na tri chasti [Distributed modeling of a system divided into three parts], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy podkhod v nauках o prirode, cheloveke i tekhnike»* [Materials of the international scientific conference "A systematic approach in the sciences of nature, man and technology"]. Part 5. Taganrog: TRTU, 2004, pp. 32-37.
11. Popov V.P., Maksimov M.N., Merezhin N.I. Ob ustoychivosti i skhodimosti modelirovaniya po chastyam. Rossiyskaya Akademiya nauk [On the stability and convergence of modeling in parts. Russian Academy of Sciences], *Vestnik yuzhnogo nauchnogo tsentra* [Bulletin of the Southern Scientific Center], 2005, Vol. 1, Issue 3, pp. 11-21.
12. Dmitriev-Zdorov V.B., Maksimov M.N., Popov V.P., Bastos J., Monti A., Dougal R. Generalized Coupling Scheme for Distributed Simulations of Power Systems, *Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, March 2006*.
13. Maksimov M.N. Tekhnologiya modelirovaniya sistem po chastyam [Technology of systems modeling in parts], *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2011): Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Moskva, 28 marta – 1 aprelya 2011 g.)* [Parallel computing technologies (PaVT'2011): Proceedings of the International Scientific Conference (Moscow, March 28 - April 1, 2011)]. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2011, 705 p. ISBN 978-5-696-04090-5.
14. Lyashev V. Stability of Concurrent Relaxation Algorithm, *Izvestia SFedU. Engineering Science*, 2010, No. 2, pp. 39-45.

15. *Lyashev V.* Accuracy issue in delayed feed-back decomposition systems, *Izvestia SFedU. Engineering Science*, 2010, No. 1, pp. 201-204.
16. *Maksimov M.N., Merezhin N.I., Fedosov V.P., Labyntsev A.V., Maksimov A.A.* Ekvivalentnaya skhema sshivayushchego chetyrekhpolysnika [Equivalent scheme of a crosslinking four-pole], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2016, Vol. 61, No. 2, pp. 162-169. ISSN 1064 2269. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25069547>.
17. *Mikhail Maksimov, Llyashev Vladimir, Merezhin Nikolay, Sinyutin Sergey.* Poincare-Steklov filter in hardware-in-the-loop modeling, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2017. pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.
18. *Popov V.* Fundamentals of Circuit Theory. Moscow: YuRight Publishing, 2013, 285 p.
19. *Vlakh I., Singkhal K.* Mashinnye metody analiza i proektirovaniya elektronnykh skhem [Machine methods of analysis and design of electronic circuits]: trans. from English. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 560 p.
20. The Schur Complement and Its Applications, ed. by Fuzhen Zhang. Series: Numerical Methods and Algorithms. Springer Verlag, 2005, Vol. 4, 295 p.
21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2021668540 «Programma dlya polunaturalnogo modelirovaniya nelineynoy sistemy s ispol'zovaniem chetyrekhpolysnogo predstavleniya fil'tra Puankare-Steklova» [Certificate of state registration of the computer program No. 2021668540 "Program for semi-natural modeling of a non-linear system using a four-pole representation of the Poincare-Steklov filter"].

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Р.Г. Шаповалов.

Максимов Михаил Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: maksimovm@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

Максимова София Михайловна – Политехнический институт филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет»; e-mail: sofiamaksimova.2003@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634623414; учебная часть; студентка.

Maksimov Mikhail Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: maksimovm@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamental of radioengineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Maksimova Sofia Mikhailovna – Polytechnic Institute branch of the Don State Technical University in Taganrog; e-mail: sofiamaksimova.2003@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634623414; academic unit; student.

УДК 621.372.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-52-63

А.М. Пилипенко, А.А. Кольцов

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТ С РАЗЛИЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА В КОНТУРЕ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

Рассмотрены синтезаторы частот на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), в которых используются фазовые детекторы (ФД) с различными нелинейными передаточными характеристиками. Целью данной работы является оценка быстродействия синтезаторов частот в зависимости от вида нелинейности ФД и математическое описание нелинейной характеристики ФД, обеспечивающей максимальное быстродействие синтезатора частот. В соответствии с поставленной целью в статье были решены следующие задачи: разработана обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ; описаны математические модели статических характеристик нелинейного звена системы ФАПЧ при использовании различных видов известных ФД и модифицированного

ФД с апериодической характеристикой; выполнен анализ динамики системы ФАПЧ при изменении статической характеристики нелинейного звена. Модифицированный ФД обеспечивает релейное управление процессами установления заданной частоты в синтезаторе при возникновении большого фазового рассогласования. Получены численные оценки быстродействия синтезатора частот в зависимости от начального отклонения частоты при использовании известных ФД и модифицированного ФД. Показано, что применение модифицированного ФД позволяет уменьшить время установления частоты примерно в 1,5 раза по сравнению с наилучшим по быстродействию известным ФД. Определены оптимальные значения управляющего сигнала, обеспечивающие максимальное быстродействие синтезатора частот с модифицированным ФД при заданных отклонениях частоты в режиме больших возмущений. Результаты данной работы справедливы для синтезаторов частот на основе ФАПЧ UHF, L, S и C-диапазонов (от 300 МГц до 8 ГГц), используемых в беспроводных системах связи четвертого поколения (4G) и пятого поколения (5G).

Синтезатор частот; фазовая автоподстройка частоты; ФАПЧ; модель; переходный процесс; быстродействие.

A.M. Pilipenko, A.A. Koltsov

ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN PLL FREQUENCY SYNTHESIZERS WITH VARIOUS CHARACTERISTICS OF NONLINEAR LINK

Phase-locked loop (PLL) frequency synthesizers that use phase detectors (PD) with various nonlinear transfer characteristics have been considered. The goal of this work is comparative analysis of the frequency synthesizers operation speed depending on the type of the PD nonlinearity and mathematical description of the PD nonlinear characteristic which ensure the maximum operation speed of the frequency synthesizer. In accordance with the present goal, the following problems are solved in this work: the generalized model of the PLL frequency synthesizer is developed; mathematical models of static characteristics of the PLL system nonlinear link are described when using various types of known PDs and a modified PD with aperiodic characteristic; the analysis of the PLL system dynamics when changing the static characteristic of the nonlinear link is carried out. The modified PD provides relay control of transient processes when a large phase difference occurs. Numerical evaluation of the PLL synthesizers operation speed depending on the initial frequency deviation have been obtained when using known PDs and the modified PD. It is shown that the use of the modified PD allows to reduce frequency settling time about 1.5 times in comparison with the best in operation speed conventional PD. Optimal values of the control signal ensuring the maximum operation speed of the PLL synthesizer with the modified PD have been obtained for the specified frequency deviations in the large disturbance mode. The results of this work are valid for PLL frequency synthesizers of the UHF, L, S and C-bands (from 300 MHz to 8 GHz) which are used in wireless communication systems of the fourth generation (4G) and the fifth generation (5G).

Frequency synthesizer; phase-locked loop; PLL; model; transient process; operation speed.

Введение. Синтезаторы частот на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) широко используются в беспроводных системах связи различных диапазонов частот, включая системы связи четвертого поколения (4G) и пятого поколения (5G) [1]. Основное достоинство синтезаторов с ФАПЧ – это широкий диапазон рабочих частот (максимальная частота выходного сигнала может достигать 32 ГГц) [2].

Высокое быстродействие синтезатора частот необходимо для обеспечения перестройки системы связи на новую несущую частоту за минимальный интервал времени. Быстрая перестройка несущей частоты обеспечивает возможность задействовать максимальное число элементов частотно-временной матрицы (ресурсных блоков), выделенных системе связи и, соответственно, повысить скорость передачи данных. Кроме того, высокое быстродействие синтезатора частот позволяет реализовать скачкообразную перестройку рабочей частоты, которая повышает безопасность передачи информации и помехоустойчивость системы связи [3].

Повышение быстродействия синтезатора частот возможно за счет расширения полосы пропускания системы ФАПЧ, но при этом возрастает уровень паразитных составляющих спектра и высокочастотных шумов в выходном сигнале. В этой связи для уменьшения времени перестройки частоты широко применяются методы нелинейной коррекции статической характеристики фазового детектора (нелинейного звена) в контуре ФАПЧ [4].

Целью данной работы является оценка быстродействия синтезаторов частот в зависимости от вида характеристики детектирования и математическое описание нелинейной характеристики детектирования, обеспечивающей максимальное быстродействие синтезатора частот.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **задачи**:

- ◆ описание математических моделей статических характеристик нелинейного звена системы ФАПЧ при использовании различных видов фазовых детекторов (ФД);
- ◆ разработка обобщенной модели синтезатора частот с ФАПЧ;
- ◆ анализ динамики системы ФАПЧ при изменении статической характеристики нелинейного звена.

1. Структура синтезатора частот с ФАПЧ. Синтезатор частот с ФАПЧ состоит из следующих функциональных узлов (рис. 1) [5]: опорный генератор (ОГ); делитель частоты с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД); фазовый детектор (ФД); фильтр нижних частот (ФНЧ); генератор управляемый напряжением (ГУН); делитель частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД).

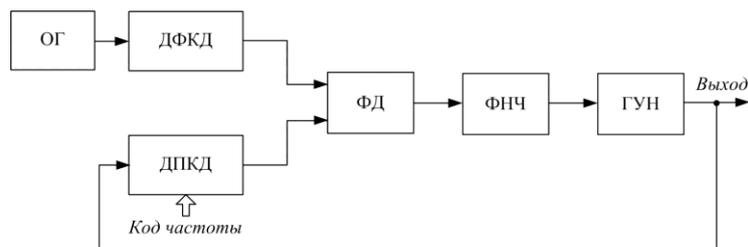


Рис. 1. Структурная схема синтезатора частот с ФАПЧ

Опорный генератор формирует сигнал с фиксированной частотой f_0 , который поступает на опорный делитель частоты. Фазовый детектор формирует управляющий сигнал пропорциональный разности фаз сигналов на его входах. Управляющий сигнал проходит через петлевой фильтр, который подавляет паразитные составляющие спектра и обеспечивает формирование напряжения для автоматической подстройки выходной частоты ГУН.

Выходная частота ГУН f_{VCO} изменяется пропорционально уровню напряжения на его входе и определяется через опорную частоту f_0 с помощью следующего выражения:

$$f_{VCO} = \frac{N}{R} f_0 \quad (1)$$

2. Математические модели фазовых детекторов. В настоящее время известны четыре основных типа ФД, применяющихся в синтезаторах частот с ФАПЧ [5–8]:

- ◆ фазовый детектор на основе аналогового перемножителя (АФД);
- ◆ импульсный фазовый детектор на основе элемента «Исключающее ИЛИ – XOR» (ИФД-XOR);
- ◆ импульсный фазовый детектор на основе JK-триггера (ИФД-JK);

♦ частотно-фазовый детектор (ЧФД), состоящий из двух D-триггеров и элемента «И».

Статическая характеристика детектирования ФД представляет собой зависимость уровня сигнала на выходе ФД от разности фаз сигналов на его входах. В случае малого фазового рассогласования сигналов на входах ФД $\varphi \ll \pi/2$ для всех рассмотренных выше видов ФД можно полагать, что характеристика детектирования является линейной и описывается следующей функцией:

$$F_0(\varphi) = K_D \varphi, \quad (2)$$

где K_D – крутизна характеристики детектирования.

Следует отметить, что для аналогового фазового детектора и импульсных фазовых детекторов выходным сигналом является напряжение. В современных частотно-фазовых детекторах на выходе включается зарядно-разрядное устройство (пара переключаемых источников тока с общей нагрузкой) выходным сигналом которого является ток I_{cp} . Однако, для разработки обобщенной модели синтезатора частот с ФАПЧ в качестве выходного сигнала ЧФД удобнее рассматривать вспомогательное напряжение [9]:

$$U_D = I_{cp} R_D,$$

где R_D – эквивалентное сопротивление зарядно-разрядного устройства (от 1,5 до 15 кОм).

На рис. 2 приведены характеристики детектирования перечисленных выше ФД, имеющие крутизну K_D [5].

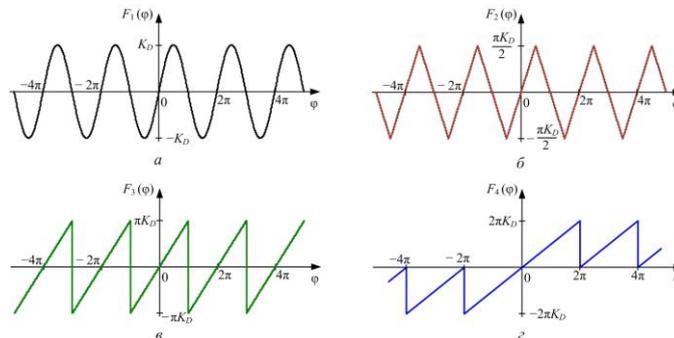


Рис. 2. Статические характеристики фазовых детекторов (а – АФД, б – ИФД-ХОР, в – ИФД-ЖК, г – ЧФД)

Аналитическое выражение для характеристики детектирования АФД известно, и имеет вид функции синуса [5]. Аналитические выражения для характеристик детектирования ИФД-ХОР, ИФД-ЖК и ЧФД можно записать на основе комбинаций тригонометрических и обратных тригонометрических функций, позволяющих моделировать треугольные и пилообразные колебания [10]. Ниже представлены аналитические выражения для характеристик детектирования АФД, ИФД-ХОР, ИФД-ЖК и ЧФД соответственно:

$$F_1(\varphi) = K_D \sin \varphi; \quad (3)$$

$$F_2(\varphi) = K_D \arcsin(\sin \varphi); \quad (4)$$

$$F_3(\varphi) = 2K_D \arctg\left(\tg \frac{\varphi}{2}\right); \quad (5)$$

$$F_4(\varphi) = \begin{cases} 2K_D \left\{ \arctg \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi - \pi}{2} \right) \right] - \frac{\pi}{2} \right\}, & \varphi < 0; \\ 2K_D \left\{ \arctg \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi - \pi}{2} \right) \right] + \frac{\pi}{2} \right\}, & \varphi \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из рис. 2 видно, что характеристики детектирования известных ФД являются периодическими функциями с периодом равным 2π . Для АФД, ИФД-ХОР и ИФД-ЖК периодичность характеристик детектирования имеет место на всем интервале изменения разности фаз φ . Характеристика детектирования ЧФД при $\varphi < 0$ и $\varphi \geq 0$ описывается разными периодическими функциями, которые смещены друг относительно друга вдоль оси ординат на величину π , но при этом имеют одинаковую форму.

Периодичность характеристик известных ФД приводит к биениям в управляющем сигнале, и, соответственно, к увеличению времени установления заданной частоты при большом рассогласовании между частотами сигналов на входах ФД. Большое рассогласование частот сравниваемых сигналов может быть вызвано как необходимостью перестройки частоты ГУН в широких пределах, так и аномальными внешними возмущениями, такими как

- ◆ резкие изменения напряжения питания синтезатора частот;
- ◆ воздействие на синтезатор частот высокочастотных помех.

В настоящей работе предлагается использовать модифицированный ЧФД с апериодической характеристикой, которая показана на рис. 3.

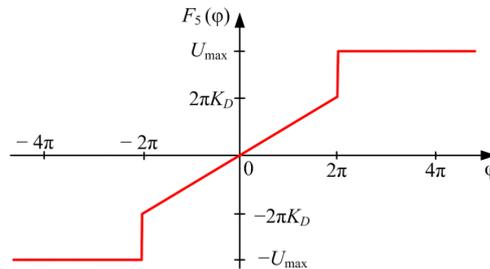


Рис. 3. Статическая характеристика модифицированного ЧФД

Скачкообразное изменение тока модифицированного ЧФД при большом фазовом рассогласовании может быть реализовано с помощью специализированного ЧФД «непрерывного времени» с дополнительным зарядно-разрядным устройством [11].

Статическая характеристика модифицированного ЧФД описывается следующим выражением:

$$F_5(\varphi) = \begin{cases} -U_{\max}, & \varphi < -2\pi; \\ K_D \varphi, & -2\pi \leq \varphi \leq 2\pi; \\ U_{\max}, & \varphi > 2\pi. \end{cases} \quad (7)$$

Модифицированный ЧФД работает в линейном режиме при $|\varphi| \leq 2\pi$ и переходит в релейную область при наличии большого фазового рассогласования $|\varphi| > 2\pi$. Данный принцип управления позволяет устранить биения управляющего сигнала и повысить быстродействие синтезатора частот [12, 13].

Дополнительное зарядно-разрядное устройство модифицированного ЧФД в релейной области вырабатывает постоянный выходной ток $I_d = U_{\max}/R_D$, который больше, чем максимальный ток в линейной области $I_{cp} = U_D/R_D$. Значение I_d определяется только знаком фазового рассогласования и не зависит от величины фазового рассогласования, поэтому система ФАПЧ может быстро вернуться в линейную область.

3. Обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ. На рис. 4 показана обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ, полностью соответствующая структурной схеме данного синтезатора, приведенной на рис. 1.

В обобщенной модели приняты следующие обозначения: $\omega_0 = 2\pi f_0$ – частота ОГ; $\omega_{VCO} = 2\pi f_{VCO}$ – частота ГУН, равная выходной частоте синтезатора; $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ – отклонение частоты синтезатора от заданного значения (начальная расстройка по частоте); $1/R$ – коэффициент деления ДФКД; $1/N$ – коэффициент деления ДПКД; $1/s$ – передаточная характеристика интегрирующего звена ($s = j\omega$ – оператор Лапласа); ω и φ – разность частот и разность фаз сигналов на входах ФД; $F(\varphi)$ – характеристика детектирования ФД; U_D – напряжение на выходе ФД; $H_F(s)$ – передаточная характеристика петлевого фильтра; U_F – управляющее напряжение ГУН; K_V – крутизна характеристики ГУН.

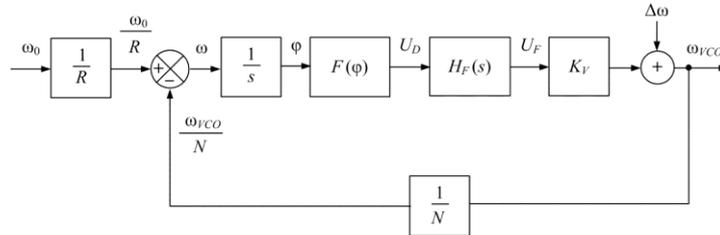


Рис. 4. Обобщенная модель синтезатора частот с ФАПЧ

Следует отметить, что в системе ФАПЧ обязательно содержится интегрирующее звено, так как фазовый детектор обеспечивает равенство частот сигналов на его входах путем сравнения фаз данных сигналов. Выражение для характеристики детектирования $F(\varphi)$ зависит от типа используемого в синтезаторе частот фазового детектора (см. формулы (3)–(7)).

Для обеспечения астатизма второго порядка в системе ФАПЧ, при наличии которого обеспечивается равенство нулю как ошибки по частоте, так и ошибки по фазе, в качестве петлевого ФНЧ используются различные виды пропорционально-интегрирующих фильтров (ПИФ) [14]. Передаточная характеристика ПИФ имеет полюс при $j\omega = 0$, т.е. фактически ПИФ содержит интегрирующее звено. Для обеспечения максимального запаса устойчивости системы ФАПЧ и достаточного уровня подавления паразитных составляющих спектра на выходе ФД рекомендуется использовать ПИФ второго порядка [12, 13]. Необходимо отметить, что в петлевой фильтр, как правило, включают операционный усилитель для достижения требуемого уровня напряжения на входе ГУН [15].

Передаточная характеристика ФНЧ, учитывающая описанные выше требования к петлевому фильтру синтезатора частот, имеет следующий вид:

$$H_F(s) = \frac{U_F}{U_D} = K_g \frac{1 + s\tau_2}{s\tau_0(1 + s\tau_1)}, \quad (8)$$

где K_g – коэффициент усиления ФНЧ; τ_0 , τ_1 , τ_2 – постоянные времени ФНЧ.

Значения постоянных времени петлевого фильтра, позволяющие обеспечить максимальный запас устойчивости системы ФАПЧ, определяются с помощью следующих соотношений [16]:

$$\tau_0 = \frac{K_D K_g K_V}{N \omega_b^2}; \quad \tau_1 = \frac{1}{\omega_b} \frac{\sqrt{M(M-1)}}{M+1}; \quad \tau_2 = \frac{1}{\omega_b} \sqrt{\frac{M}{M-1}}, \quad (9)$$

где M – показатель колебательности системы ФАПЧ; $\omega_b = 2\pi f_b$ – базовая частота системы ФАПЧ.

Для обеспечения максимального быстродействия системы ФАПЧ выбираются следующие значения показателя колебательности и базовой частоты системы [13]:

$$M = 1,41; f_b = 0,1 f_{ref}$$

где $f_{ref} = f_0/R$.

4. Численный анализ синтезатора частот во временной области. Наиболее популярным и достаточно эффективным средством моделирования систем управления во временной области является пакет MATLAB-Simulink [17].

MATLAB-Simulink имеет следующие преимущества в сравнении с другими пакетами схемотехнического проектирования и программами компьютерной математики:

- ◆ возможность построения Simulink-модели непосредственно на основании структурной схемы системы;
- ◆ наибольшее количество методов численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с адаптивным (переменным) размером временного шага;
- ◆ опции выбора максимального, минимального и начального временного шага;
- ◆ контроль точности численного анализа.

Моделирование во временной области выполнялось в MATLAB-Simulink с помощью метода Modified Rosenbrock, который обеспечивает наибольшую точность численного анализа ФАПЧ-синтезаторов частот как в линейном, так и в нелинейном режиме работы [18].

Быстродействие синтезатора частот определяется временем t_{set} , за которое заданная частота f_{set} устанавливается с требуемой точностью. Для систем связи 4G/5G предельно допустимое относительное отклонение несущей частоты составляет $\delta_f = 10^{-7}$ [19]. Таким образом, при $t \geq t_{set}$ частота синтезатора должна лежать в пределах

$$f_{VCO} = f_{set} \pm \Delta f_{set},$$

где $\Delta f_{set} = \delta_f f_{set}$ – предельно допустимое абсолютное отклонение выходной частоты ФАПЧ синтезатора.

Далее будем полагать $f_{set} = 2500$ МГц, следовательно, $\Delta f_{set} = 250$ Гц и $f_{VCO} = 2500 \cdot 10^6 \pm 250$ Гц. Остальные параметры ФАПЧ синтезатора для данного диапазона частот были выбраны следующим образом: $f_0 = 20$ МГц; $R = 10$; $K_D = 5/2\pi$ В/рад; $K_g = 5$; $K_V = 40$ МГц/В.

Моделирование во временной области показывает, что в режиме малых возмущений ($\Delta f \leq 0,1 f_{set}$) разность фаз сигналов на входе ФД лежит в пределах линейного участка передаточной характеристики детектирования для всех рассматриваемых в работе типов ФД и переходные процессы в ФАПЧ синтезаторах частот не зависят от типа ФД.

В режиме больших возмущений ($0,1 f_{set} < \Delta f < f_{set}$) вид характеристики детектирования оказывает существенное влияние на характер переходных процессов и время установления частоты синтезатора. На рис. 5 показаны процессы установле-

ния заданной частоты в синтезаторах частот с различными типами ФД при $\Delta f = 0,6f_{set}$. На рис. 6 представлены зависимости нормированного времени установления частоты $\bar{t}_{set} = t_{set}f_b$ от относительного отклонения частоты от заданного значения $\Delta\bar{f} = \Delta f / f_{set}$ в синтезаторах с различными типами ФД при $0,1f_{set} < \Delta f < f_{set}$. Следует отметить, что при $\Delta f < f_{set}$ переходные процессы и зависимости \bar{t}_{set} от $\Delta\bar{f}$ в синтезаторах частот со стандартным и модифицированным ЧФД практически совпадают и не зависят нормированного тока модифицированного ЧФД в релейной области $\bar{I}_d = I_d / I_{cp}$.

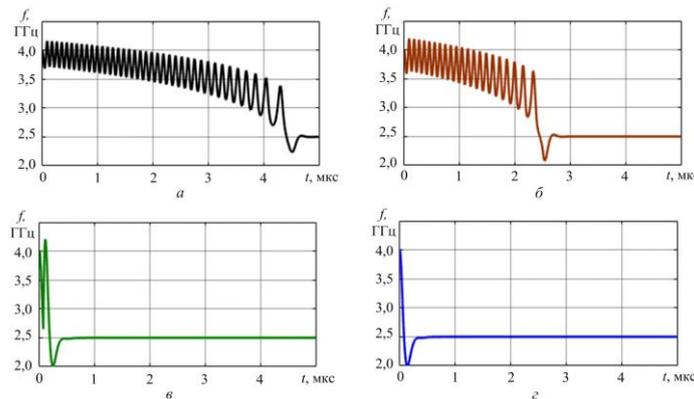


Рис. 5. Переходные процессы в синтезаторах с различными типами ФД при $\Delta f = 0,6f_{set}$ (а – АФД, б – ИФД-ХОР, в – ИФД-ЖК, з – ЧФД)

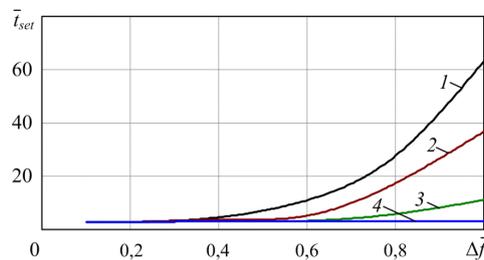


Рис. 6. Зависимости нормированного времени установления частоты от начальной расстройки по частоте в синтезаторах с различными типами ФД при $\Delta f \leq f_{set}$ (1 – АФД, 2 – ИФД-ХОР, 3 – ИФД-ЖК, 4 – ЧФД)

Из рис. 5 видно, что при больших возмущениях время установления заданной частоты уменьшается при увеличении ширины линейного участка характеристики детектирования. В частности, наибольшее время установления заданной частоты имеет АФД, наименьшее – стандартный и модифицированный ЧФД. Из рис. 6 следует, что время установления частоты в синтезаторах с АФД и ИФД обоих видов резко возрастает с увеличением отклонения частоты, причем функции роста для АФД и ИФД близки к экспоненциальным функциям с различными показателями степени. Данное свойство АФД и ИФД делает неэффективным их применение в синтезаторах частот при наличии аномальных возмущений ($\Delta\bar{f} > 1$), поэтому далее при $\Delta\bar{f} > 1$ рассматриваются возможности ЧФД.

На рис. 7 показаны процессы установления заданной частоты в синтезаторах частот со стандартным и модифицированным ЧФД при $\Delta\bar{f} = 2$ и нормированном токе модифицированного ЧФД в релейной области $\bar{I}_d = 2$. Из рис. 7 видно, что применение модифицированного ЧФД с апериодической характеристикой позволяет устранить биения в переходном процессе и уменьшить время установления заданной частоты. Следует отметить, что релейное управление в системе ФАПЧ с модифицированным ЧФД приводит к росту перерегулирования.

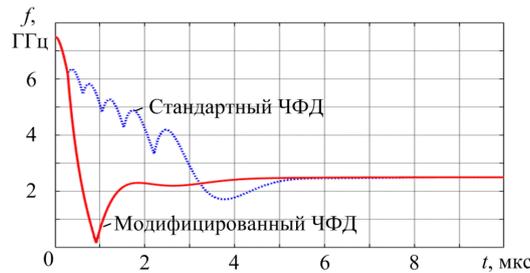


Рис. 7. Переходные процессы в синтезаторах со стандартным и модифицированным ЧФД при $\Delta f = 2f_{set}$

На рис. 8 показаны зависимости нормированного времени установления частоты от относительного отклонения частоты в синтезаторах со стандартным и модифицированным ЧФД при различных значениях \bar{I}_d .

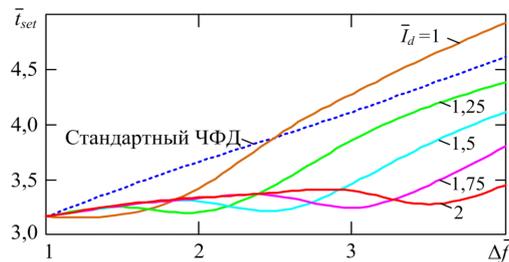


Рис. 8. Зависимости нормированного времени установления частоты от начальной расстройки по частоте в синтезаторах со стандартным ЧФД и модифицированным ЧФД при различных значениях \bar{I}_d

Из рис. 8 видно, что применение модифицированного ЧФД в режиме аномальных возмущений позволяет уменьшить время установления заданной частоты примерно 1,5 раза по сравнению со стандартным ЧФД. Следует отметить, что существует оптимальное значение нормированного тока модифицированного ЧФД $\bar{I}_{d\ opt}$ в релейной области, которое соответствует минимальному времени установления частоты при заданной начальной расстройке по частоте. Зависимость оптимального тока $\bar{I}_{d\ opt}$ от начальной расстройки по частоте в синтезаторе с модифицированным ЧФД представлена в работе [20].

Заключение. В данной работе были представлены результаты моделирования во временной области синтезаторов частот с различными типами фазовых детекторов. Полученные результаты позволяют оценить быстродействие синтезатора частот в зависимости от вида характеристики детектирования.

В работе показано, что модифицированный ЧФД с аperiodической характеристикой обеспечивает минимальное время установления заданной частоты в режиме аномальных возмущений. Применение модифицированного ЧФД позволяет повысить быстродействие синтезатора частот примерно 1,5 раза по сравнению со стандартным ЧФД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kuai L., Hong W., Chen J., Zhou H.* A Frequency Synthesizer for LO in Millimeter-wave 5G Massive MIMO System // 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – Singapore, 2019. – P. 1014-1016.
2. Phase Locked Loop (PLL) Synthesizer & Translation Loop. Analog Devices, Inc. Retrieved 17:50, March 22, 2021. – URL: <http://www.analog.com/en/parametricsearch/11322>.
3. *Fang D., Qian Y., Hu R. Q.* Security for 5G Mobile Wireless Networks // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 4850-4874.
4. *Зайцев А.А.* Нелинейное комбинированное управление в системе импульсной фазовой автоподстройки частоты // Тр. Московского физико-технического института. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 48-53.
5. *Best R.E.* Phase-Locked Loops Design, Simulation and Applications. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill, 2007 – 490 p.
6. *Chenakin A.* Frequency Synthesizers: Concept to Product. – Norwood, MA: Artech House, 2011. – 214 p.
7. *Голуб В.* Система ФАПЧ и ее применения // ChipNews. – 2000. – Vol 4. – P. 3-12.
8. *Jansen K., Kennedy M.P.* Comparison of Mathematical and Physical Phase Noise Performance in Fractional-N Synthesizers // 2020 31st Irish Signals and Systems Conference (ISSC). – Letterkenny, Ireland, 2020. – P. 1-6.
9. 74HCT9046A PLL with band gap controlled VCO. Product data sheet. – Rev. 9. – Nexperia B.V. 2020.
10. *Дьяконов В.П.* Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 832 с.
11. *Pan J., Yoshihara T.* A Fast Lock Phase-Locked Loop Using a Continuous-Time Phase Frequency Detector // 2007 IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits. – Tainan, Taiwan, 2007. – P. 393-396.
12. *Pilipenko A.M.* Simulation and parameters optimization of hybrid frequency synthesizers for wireless communication systems // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Astana, Kazakhstan, 2017. – P. 1-6.
13. *Пилипенко А.М.* Исследование быстродействия гибридных синтезаторов частот // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 15-30.
14. *Vaucher C.S.* Architectures for RF Frequency Synthesizers. – New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 250 p.
15. *Rohde U.L., Rubiola E., Whitaker J.C.* Microwave and Wireless Synthesizers: Theory and Design. – 2nd ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2021. – 816 p.
16. *Бесекерский В.Л., Понов Е.П.* Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
17. *Дьяконов В.П.* MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 975 с.
18. *Pilipenko A.M.* Testing of Numerical Simulation Methods for Hybrid Frequency Synthesizers // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – Divnomorskoe, Russia, 2019. – P. 384-387.
19. *Пилипенко А.М.* Выбор оптимальных параметров синтезаторов частот для систем связи стандарта LTE Advanced // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2017): Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2017. – С. 115-119.
20. *Pilipenko A.M.* Increasing Operation Speed of Frequency Synthesizers Using Nonlinear Control in Phase-Locked Loop System // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – Divnomorskoe, Russia, 2021. – P. 385-388.

REFERENCES

1. Kuai L., Hong W., Chen J., Zhou H. A Frequency Synthesizer for LO in Millimeter-wave 5G Massive MIMO System, *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. Singapore, 2019, pp. 1014-1016.
2. Phase Locked Loop (PLL) Synthesizer & Translation Loop. Analog Devices, Inc. Retrieved 17:50, March 22, 2021. Available at: <http://www.analog.com/en/parametricsearch/11322>.
3. Fang D., Qian Y., Hu R. Q. Security for 5G Mobile Wireless Networks, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 4850-4874.
4. Zaitsev A.A. Nelineynoe kombinirovannoe upravlenie v sisteme impul'snoy fazovoy avtopodstroyki chastoty [The compound nonlinear mode of operation of the pulse phase-locked-loop frequency control system], *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta* [Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology], 2009, Vol. 1, No. 2, pp. 48-53.
5. Best R.E. Phase-Locked Loops Design, Simulation and Applications. 6th ed., New York: McGraw-Hill, 2007, 490 p.
6. Chenakin A. Frequency Synthesizers: Concept to Product. Norwood, MA: Artech House, 2011, 214 p.
7. Golub V. Sistema FAPCh i ee primeneniya [PLL system and its applications], *ChipNews*, 2000, No. 4, pp. 3-12.
8. Jansen K., Kennedy M.P. Comparison of Mathematical and Physical Phase Noise Performance in Fractional-N Synthesizers, *2020 31st Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. Letterkenny, Ireland, 2020, pp. 1-6.
9. 74HCT9046A PLL with band gap controlled VCO. Product data sheet. Rev. 9. Nexperia B.V. 2020.
10. D'yakonov V.P. Ehntsiklopediya Mathcad 2001i i Mathcad 11 [Encyclopedia Mathcad 2001i and Mathcad 11]. Moscow: SOLON-Press, 2004, 832 p.
11. Pan J., Yoshihara T. A Fast Lock Phase-Locked Loop Using a Continuous-Time Phase Frequency Detector, *2007 IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits*. Tainan, Taiwan, 2007, pp. 393-396.
12. Pilipenko A.M. Simulation and parameters optimization of hybrid frequency synthesizers for wireless communication systems, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Astana, Kazakhstan, 2017, pp. 1-6.
13. Pilipenko A.M. Issledovanie bystrodeystviya gibridnykh sintezatorov chastot [Research of performance of hybrid frequency synthesizers], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3, pp. 15-30.
14. Vaucher C.S. Architectures for RF Frequency Synthesizers. New York, Kluwer Academic Publishers, 2002, 250 p.
15. Rohde U.L., Rubiola E., Whitaker J.C. Microwave and Wireless Synthesizers: Theory and Design. 2nd ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2021, 816 p.
16. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg: Professiya, 2004, 752 p.
17. D'yakonov V.P. MATLAB i SIMULINK dlya radioinzhenerov [MATLAB and SIMULINK for radio engineers]. Moscow: DMK Press, 2013, 975 p.
18. Pilipenko A.M. Testing of Numerical Simulation Methods for Hybrid Frequency Synthesizers, *2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. Divnomorskoe, Russia, 2019, pp. 384-387.
19. Pilipenko A.M. Vybór optimal'nykh parametrov sintezatorov chastot dlya sistem svyazi standarta LTE Advanced [Choice of optimal parameters of frequency synthesizers for communications systems of LTE Advanced standard], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii (KomTekh-2017): Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Computer and information technologies in science, engineering and management (ComTech-2017): Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation], 2017, pp. 115-119.
20. Pilipenko A.M. Increasing Operation Speed of Frequency Synthesizers Using Nonlinear Control in Phase-Locked Loop System, *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. Divnomorskoe, Russia, 2021. pp. 385-388.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.В. Демьяненко.

Пилипенко Александр Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; зав. кафедрой.

Кольцов Алексей Анатольевич – e-mail: aleksey.kolcov.97@mail.ru; кафедра теоретических основ радиотехники; студент.

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich – Southern Federal University; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; head of the department.

Koltsov Alexey Anatolyevich – e-mail: aleksey.kolcov.97@mail.ru; the department of fundamentals of radio engineering; student.

Раздел II. Методы, модели и алгоритмы обработки информации

УДК 004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-64-72

В.В. Ковалев, Н.Е. Сергеев

РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ВСТРАИВАЕМЫХ УСТРОЙСТВАХ С ОГРАНИЧЕННЫМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ РЕСУРСОМ

Большие объемы видеоданных, фиксируемые сенсорными датчиками в различных спектральных диапазонах, существенные размеры архитектур сверточных нейронных сетей создают проблемы с реализацией нейросетевых алгоритмов на периферийных устройствах из-за значительных ограничений вычислительных ресурсов на встраиваемых вычислительных устройствах. В статье рассмотрено применение алгоритмов автоматического поиска и распознавания образов на основе методов машинного обучения, реализованных на встраиваемых устройствах с вычислительным ресурсом Graphics Processing Unit. В качестве алгоритма поиска и распознавания образов используются детекционные сверточные нейронные сети «You Only Look Once V3» и «You Only Look Once V3-Tiny», которые реализованы на встраиваемых вычислительных устройствах линейки NVIDIA Jetson, находящиеся в разном ценовом диапазоне и с различным вычислительным ресурсом. Также в работе экспериментальным путем вычислены оценки алгоритмов на встраиваемых устройствах по таким показателям, как потребляемая мощность, время прямого прохода сверточной нейронной сети и точность обнаружения. На основе решений реализованных, как на аппаратном уровне, так и на программном, представляющихся компанией NVIDIA становится возможным применение глубоких нейросетевых алгоритмов на основе операции свертка в режиме реального времени. Рассмотрены методы оптимизации вычислений, предлагаемые компанией NVIDIA. Произведены экспериментальные исследования влияния вычислений с пониженной точностью на скорость работы и точность обнаружения объектов на изображениях, исследуемых архитектур сверточных нейронных сетей, которые были предварительно обучены на выборке изображений состоящей из датасетов PASCAL VOC 2007 и PASCAL VOC 2012.

Сверточные нейронные сети; оптимизация вычислений; встраиваемые вычислительные устройства; методы оптимизации; обнаружения объектов.

V.V. Kovalev, N.E. Sergeev

IMPLEMENTATION OF CONVENTIONAL NEURAL NETWORKS ON EMBEDDED DEVICES WITH A LIMITED COMPUTING RESOURCE

Large amounts of video data captured by sensor sensors in various spectral ranges, the significant size of convolutional neural network architectures create problems with the implementation of neural network algorithms on peripheral devices due to significant limitations of computing resources on embedded computing devices. The article discusses the use of algorithms for automatic search and pattern recognition based on machine learning methods, implemented on embedded devices with a computing resource Graphics Processing Unit. Detection convolutional neural networks «You Only Look Once V3» and «You Only Look Once V3-Tiny» are used as a search and pattern recognition algorithm, which are implemented on embedded computing devices of the NVIDIA Jetson line, located in different price ranges and with different computing resources ... Also, in the work, the estimates of

algorithms on embedded devices are experimentally calculated for such indicators as power consumption, forward passage time of a convolutional neural network, and detection accuracy. On the basis of solutions implemented, both at the hardware level and in software, presented by NVIDIA, it becomes possible to use deep neural network algorithms based on the convolution operation in real time. Computational optimization methods offered by NVIDIA are considered. Experimental studies of the influence of computations with reduced accuracy on the speed and accuracy of object detection in images of the investigated architectures of convolutional neural networks, which were previously trained on a sample of images consisting of the PASCAL VOC 2007 and PASCAL VOC 2012 datasets, have been carried out.

Convolutional neural networks; computing optimization; embedded computing devices; optimization methods; object detection.

Введение. Автоматизация процессов в таких отраслях, как медицина, авиация, производство, логистика и т.д. на сегодняшний момент, является одним из важных и активно развивающимся в мире технологическим направлением. Для обеспечения корректной работы автоматизированных систем сенсорные датчики считывают большие объемы данных в различных спектральных диапазонах, создающих высокоскоростные потоки данных, требующих обработки в режиме реального времени. Одной из востребованных задач обработки данных являются автоматический поиск, классификация и распознавания объектов в потоке видеок кадров. Данные алгоритмы применяются и для разработки систем автоматического управления, распознавания, ситуационной осведомленности, автономных робототехнических и других систем. С практической точки зрения для решения подобных классов задач хорошо себя зарекомендовали методы и алгоритмы на основе искусственного интеллекта [1], которые отличаются возможностями адаптации и улучшения функционирования алгоритмов в результате обучения/дообучения систем на новых расширенных представительных наборах данных. В настоящее время такие алгоритмы активно развиваются на основе методов машинного обучения глубоких нейронных сетей, среди которых широко применяются архитектуры сверточных нейронных сетей.

Основной объем требований к производительности вычислительных ресурсов встраиваемых устройств предъявляют к обработке изображений высокого разрешения. Такие изображения могут формироваться сенсорами различных спектральных диапазонов, включая видимый, инфракрасный, радиолокационный и другие диапазоны, и содержать порядка миллиона элементов изображения (пикселей). Обработка таких изображений в масштабе реального времени, как правило, должна выполняться за время порядка 10–100 [мс], что определяет необходимость достижения скорости обработки пикселей порядка 10^7 – 10^8 [пикселей/с]. Встроенные современные вычислительные устройства с малым форм-фактором позволяют выполнять большое количество параллельных вычислений благодаря наличию мощных сопроцессоров, что позволяет применять устройства для решения задач обработки видеоданных. Роль сопроцессоров в них выполняют GPU или FPGA с малым форм фактором.

Сложность и размер нейронных сетей продолжают расти. Новые сети с тысячами слоев и миллионами нейронов требуют еще более высокой производительности и более быстрого обучения. Это накладывает определенные требования на используемые ресурсы, такие как время отклика, размер используемой памяти и потребляемая мощность. Поэтому задача оптимизации нейросетевых алгоритмов является актуальной в настоящее время.

1. Обзор встраиваемых вычислительных устройств для реализации методов искусственного интеллекта. 1.1. Центральный процессор Central Processing Unit (CPU). CPU – центральное обрабатывающее устройство персонально-

го компьютера. Одним из лидеров в производительности процессоров является компания Intel, которая поставляет наряду с процессорами библиотеку для ускорения нейронных сетей oneAPI DL Framework Developer Toolkit.

CPU обладает высокой программируемостью, поддерживает большое количество типов данных, поддерживает SIMD инструкции для параллельных вычислений, позволяет эффективно использовать свойства разреженности весов нейронной сети.

CPU имеет низкую производительность, потому что вычисления не направлены на выполнения однотипных операций. Например, модель CPU Intel Xeon E7-8860 v4 имеет пиковую производительность, равную 283 GFLOPs.

Реализация СНС на процессорах CPU не позволяет реализовать большое количество параллельных вычислений однотипных операций, свойственным нейросетевым алгоритмам из-за небольшого количества вычислительных ядер.

Большинство процессоров оптимизированы под вычисление целочисленных операций. Поэтому пути оптимизации основаны на:

- ◆ минимизации вычислительной сложности архитектуры СНС;
- ◆ квантование и перевод весовых коэффициентов СНС в целочисленные значения (INT8).

Исходя из этого, целесообразно применять архитектуры СНС основанные на базе поканальной свертки (depthwise convolution), что существенно снижает вычислительную сложность алгоритма в целом.

1.2. Программируемая логическая интегральная схема Field Programmable Gate Array. Программируемая логическая интегральная схема – устройство, на котором реализация нейронной сети осуществляется на аппаратном уровне. FPGA поддерживают типы данных с произвольным количеством бит, потенциально возможна высокая производительность, имеют низкую потребляемую мощность. К недостаткам следует отнести низкую скорость программирования, высокая трудоемкость внесения изменений в конфигурацию ПЛИС. В большинстве случаев процесс обучения нейронной сети на ПЛИС не представляется возможным из-за малого объема памяти.

1.3. Tensor Processing Unit. TPU (Tensor Processing Unit) – компания Google представила в 2017 году специализированную интегральную схему (ASICs) для ускорения нейросетевых вычислений. Матричный процессор способен выполнять сотни тысяч операций типа умножение за один такт, содержит блок активации, унифицированный буфер, оптимизирован с точки зрения обращения к DRAM, поддерживает квантование в 8 бит в целой точке, набор инструкций CISC. Если обучение нейронных сетей с большим количеством слоев может занимать недели на GPU, то на TPU это займет всего лишь часы.

Достоинства: TPU показывает очень высокую производительность, особенно для больших значений размера батча (batch size) и нейронных сетей большого размера, имеет меньшую потребляемую мощность по сравнению с GPU. Пиковая производительность TPU может достигать 92 TOPs.

Недостатки: проект должен быть реализован только с помощью библиотеки TensorFlow, для прямого прохода нейронной сети с одним изображением показывает меньшую производительность по сравнению с GPU, обладают высокой стоимостью.

1.4. Графический процессор Graphics Processing Unit (GPU). Широкое применение в решении задач обработки видеоданных осуществляется с применением встраиваемых вычислительных устройств линейки NVIDIA Jetson на базе искусственного интеллекта (ИИ) [2].

Модуль NVIDIA Jetson Nano – это компактный компьютер на базе ИИ, который обладает производительностью и энергоэффективностью, необходимой для современных задач искусственного интеллекта, параллельной работы нескольких нейронных сетей и одновременной обработки данных с нескольких датчиков высокого разрешения. Поэтому он представляет собой отличное начальное решение для внедрения сложных средств искусственного интеллекта во встраиваемые системы [3].

Встраиваемые модули NVIDIA Jetson TX2 обеспечивают производительность до 2,5 раз больше, чем Jetson Nano, при уровне энергопотребления в 7,5 Вт. Jetson TX2 NX совместим с Jetson Nano по выводам и форм-фактору, а Jetson TX2, TX2 4GB и TX2i имеют оригинальный форм-фактор Jetson TX2. Надежный модуль Jetson TX2i идеально подходит для установки, в том числе на промышленных роботах и медицинском оборудовании [4].

Компактный модуль NVIDIA Jetson Xavier NX обеспечивает до 21 трлн операций в секунду для вычислений ИИ в периферийных устройствах. Вычислительное устройство обеспечивает параллельную работу нескольких нейронных сетей и обработку данных с нескольких датчиков высокого разрешения, что необходимо для систем ИИ. Jetson Xavier NX представляет собой готовое решение и поддерживает все популярные фреймворки ИИ [5].

NVIDIA Jetson AGX Xavier – это компактный мощный модуль гарантирует аппаратное ускорение для всего конвейера ИИ и высокую скорость передачи данных. С помощью Jetson AGX Xavier обеспечивает устойчивость к широкому диапазону температур, ударов и вибраций, а также новые возможности функциональной безопасности, которые хотят создавать продукты промышленного класса и/или сертифицированные по технической безопасности [6].

NVIDIA CUDA повышает производительность центрального процессора, создавая вычисления с ускорением графического процессора, которые выполняются быстрее, чем при традиционной обработке на центральном процессоре.

Помимо стандартных вычислений с одинарной точностью, видеокарты NVIDIA серий Pascal и Volta также поддерживают вычисления с низкой точностью FP16 и INT8.

Каждое тензорное ядро предоставляет матричный обрабатывающий массив $4 \times 4 \times 4$, который выполняет операцию $D = A \cdot B + C$, где A , B , C и D представляют собой матрицы 4×4 , как показано на рис. 1. Входы матричного умножения A и B являются матрицами FP16, тогда как матрицы C и D накопления могут быть матрицами FP16 или FP32.

$$D = \begin{pmatrix} A_{0,0} & A_{0,1} & A_{0,2} & A_{0,3} \\ A_{1,0} & A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,0} & A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \\ A_{3,0} & A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{0,0} & B_{0,1} & B_{0,2} & B_{0,3} \\ B_{1,0} & B_{1,1} & B_{1,2} & B_{1,3} \\ B_{2,0} & B_{2,1} & B_{2,2} & B_{2,3} \\ B_{3,0} & B_{3,1} & B_{3,2} & B_{3,3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{0,0} & C_{0,1} & C_{0,2} & C_{0,3} \\ C_{1,0} & C_{1,1} & C_{1,2} & C_{1,3} \\ C_{2,0} & C_{2,1} & C_{2,2} & C_{2,3} \\ C_{3,0} & C_{3,1} & C_{3,2} & C_{3,3} \end{pmatrix}$$

FP16 or FP32
FP16
FP16
FP16 or FP32

Рис. 1. Умножение и накопление матрицы тензорного ядра $4 \times 4 \times 4$ [7]

Тензорные ядра работают с входными данными FP16 с накоплением FP32. Умножение FP16 приводит к результату полной точности, который накапливается в операциях FP32 с другими произведениями в данном скалярном произведении для умножения матрицы $4 \times 4 \times 4$, как показано на рис. 2.

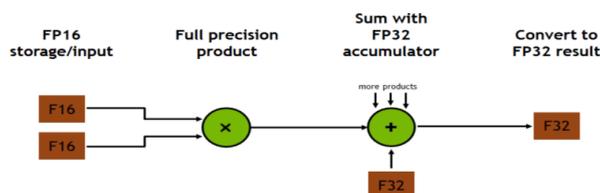


Рис. 2. Работа тензорного ядра [7]

Кроме аппаратных решений NVIDIA CUDA предоставляет спектр библиотек NVIDIA JetPack SDK: CUDA, cuDNN, TensorRT для запуска глубоких нейронных сетей. Библиотека cuDNN – это библиотека примитивов с ускорением на GPU для глубоких нейронных сетей, которая оптимизирует производительность нейронных сетей на графических процессорах NVIDIA. Библиотека TensorRT обеспечивает логический вывод с малой задержкой и высокой пропускной способностью и оптимизирует выполнение операций на различных семействах графических процессоров.

В настоящее время реализация СНС на периферийные вычислительные устройства массового производства на основе GPU имеют широкое применение в рамках мирового масштаба из-за своих технических характеристик, которые описаны в следующей главе.

2. Применение детекционных сверточных нейронных сетей на встраиваемых устройствах с ограниченным вычислительным ресурсом NVIDIA Jetson. В данном разделе рассмотрена реализация моделей детекционных сверточных нейронных сетей архитектур YOLOv3 [8, 9, 10] и ее укороченной модификации YOLOv3-TINY на встраиваемых вычислительных устройствах NVIDIA Jetson Nano B01, NVIDIA Jetson TX2 (8GB) и NVIDIA Jetson AGX Xavier [11], а также методы оптимизации нейросетевых алгоритмов по таким критериям как потребляемая мощность, время выполнения прямого прохода нейронной сети [12] и обеспечиваемая точность детекционного алгоритма по интегральному критерию Mean Average Precision (mAP) [13].

В основе модели нейронной сети YOLOv3 лежит принцип извлечения информации об объектах разного масштаба, который получил название Feature Pyramid Networks (FPN) [14, 15]. Модель нейронной сети реализована на backbone darknet.53 [8] с тремя регрессионными (детекторами) выходами, которые предсказывают параметры расположения объектов малых, средних и больших размеров. Модель HC YOLOv3-TINY реализована по тому же принципу, что и модель YOLOv3 только имеет backbone меньшей глубиной с двумя регрессионными выходами. Решением детекционного алгоритма может быть большое количество перекрывающихся объектов на изображении.

Для фильтрации решений используется алгоритм Non Maximum Suppression (NMS) [16, 17]. Это алгоритм выбирает один объект из множества перекрывающихся объектов по выдвинутому критерию. В большинстве случаев используют некую меру перекрытия, например, Intersection Over Union (IOU) (рис. 3) [18]. От типа реализации алгоритма NMS, архитектуры нейронной сети, весовых коэффициентов и т.д. время работы алгоритма может значительно варьироваться, поэтому в данном исследовании измерение времени прямого прохода нейронной сети не учитывает этот алгоритм.

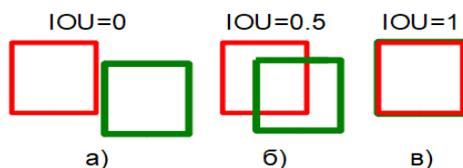


Рис. 3. Иллюстрация предсказанного и истинного обрамляющих прямоугольников для различных значений IOU а) 0 б) 0.5 в) 1

3. Вычислительный эксперимент. Оценки времени выполнения прямого прохода и точности обнаружения [19, 20] производились с применением программного обеспечения (ПО) NVIDIA JetPack 4.4.1 включающего в себя: CUDA 10.2, cuDNN 8.0, TensorRT 7.1.3 и библиотеки компьютерного зрения OpenCV 4.1.1. Все вычисления производились в режиме максимально допустимой вычислительной мощности (режим jetson clocks). В таблице 1 приведены показатели потребляемой мощности исследуемых вычислительных устройств для данного режима.

Обучение и оценка исследуемых характеристик нейросетевых алгоритмов производилась на наборе изображений для обнаружения объектов PASCAL VOC 2007 и PASCAL VOC 2012 [21], включающих в себя объекты 20 классов. Обучающая выборка состоит из 15000 изображений, а тестовая из 5000. Обучение и оценки исследуемых характеристик производились на изображениях размерностью 416 x 416 x 3 элементов яркости.

Оценка времени прямого прохода нейронной сети производилась на одном изображении для разных режимов вычислительной точности FP32, FP16, INT8. Следует отметить, что из исследуемых встраиваемых устройств, вычислительную точность INT8 поддерживает только на устройстве NVIDIA Jetson AGX Xavier. Результаты измерения времени прямого прохода исследуемых моделей нейронных сетей приведены в табл. 1.

Оценки характеристики точности обнаружения нейросетевых алгоритмов производилось на основе интегрального критерия mAP, которая рассчитывается как среднее между средней точностью обнаружения Average Precision (AP) каждого класса. В табл. 1 приведены результаты оценок точности обнаружения детекционных нейросетевых алгоритмов YOLOv3 и YOLOv3-TINY на основе критерия mAP.

В режиме реального времени прямой проход архитектуры YOLOv3 возможен только на вычислительном устройстве NVIDIA Jetson AGX Xavier для всех точностей. Архитектуру YOLOv3-TINY можно запустить в режиме реального времени на всех устройствах линейки NVIDIA Jetson для точности FP16. Вычислитель NVIDIA Jetson AGX Xavier обеспечивает меньшее время прямого прохода для исследуемых архитектур нейросетевых алгоритмов, однако потребляет большую мощность и находится в более высоком ценовом диапазоне.

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования

Наименование вычислительного устройства	Модель нейронной сети	Точность FP32, FP16, INT8	Потребляемая мощность, Вт	TOPS	Время выполнения прямого прохода, мс	mAP, %
Jetson Nano B01 (4GB)	YoloV3 416	FP32	10	65.86	Превышение отведенной памяти	-
		FP16			201	71.54
		INT8			Нет поддержки	Нет поддержки

	YoloV3-tiny 416	FP32		5.477	45	51
		FP16			29.7	50.8
		INT8			Нет поддержки	Нет поддержки
Jetson TX2 (8GB)	YoloV3 416	FP32	15	65.86	148	71.55
		FP16			95	71.54
		INT8			Нет поддержки	Нет поддержки
	YoloV3-tiny 416	FP32		5.477	18.9	51
		FP16		13.7	50.8	
		INT8		Нет поддержки	Нет поддержки	
Jetson AGX Xavier	YoloV3 416	FP32	30	65.86	51	71.55
		FP16			17.3	71.54
		INT8			12.1	71.13
	YoloV3-tiny 416	FP32		5.477	6.42	51
		FP16		3.49	50.8	
		INT8		2.71	49.28	

Для решения задач на встраиваемых вычислительных устройствах нейросетевыми алгоритмами, целесообразно найти оптимум между предоставляемым и необходимым вычислительным ресурсом для работы нейросетевого алгоритма в режиме реального времени.

Заключение. На вычислительных устройствах NVIDIA Jetson Nano B01, NVIDIA Jetson TX2, NVIDIA Jetson AGX Xavier реализованы модели детекционных сверточных нейронных сетей YOLOv3 и YOLOv3-TINY, обученные на тренировочном наборе изображений. Рассмотрены программные и аппаратные решения оптимизации вычислений, предлагаемые компанией NVIDIA.

Произведено исследование влияния перехода к вычислениям с пониженной точностью FP16 и INT8 на время прямого прохода исследуемых архитектур нейронных сетей. Переход к вычислениям с пониженной точностью увеличивает скорость работы нейросетевых алгоритмов до 4.2 раза, что позволяет реализовать глубокие сверточные нейронные сети в режиме реального времени на периферийных вычислительных устройствах с малым форм-фактором и ограниченным вычислительным ресурсом. Чем грубее точность вычислений, тем быстрее работает алгоритм. Однако влияния вычисления с пониженной точностью приводит к снижению критерия Mean Average Precision до 1.7 %, характеризующего интегральную точность обнаружения объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 59277—2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта.
2. Описание линейки NVIDIA Jetson // Официальный сайт NVIDIA. – URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems> (дата обращения: 14.11.21).
3. Описание NVIDIA Jetson Nano // Официальный сайт NVIDIA. – URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano> (дата обращения: 15.11.21).
4. Описание NVIDIA Jetson TX2 // Официальный сайт NVIDIA. – URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-tx2> (дата обращения: 16.11.21).
5. Описание NVIDIA Jetson Xavier NX // Официальный сайт NVIDIA. – URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-xavier-nx> (дата обращения: 17.11.21).

6. Описание NVIDIA Jetson AGX Xavier // Официальный сайт NVIDIA. – URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier> (дата обращения: 15.11.21).
7. Программирование тензорных ядер в CUDA // Официальный сайт NVIDIA. – URL: <https://developer.nvidia.com/blog/programming-tensor-cores-cuda-9> (дата обращения: 16.11.21).
8. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement // arXiv, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>.
9. Redmon J., Divvala S., Girshick R., and Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection // IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016.
10. Redmon J. and Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement // arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.
11. Elias Stein, Siyu Liu, John Sun Real-Time Object Detection on an Edge Device (Final Report) // CS230: Deep Learning, 2019.
12. Sazli Murat H. A brief review of feed-forward neural networks // Ankara University, Faculty of Engineering, Department of Electronics Engineering.
13. Van Eetten A. Satellite imagery multiscale rapid detection with windowed networks // IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2019.
14. Tsung-Yi Lin, Piotr Dollar, Ross Girshick, Kaiming He, Bharath Hariharan, and Serge Belongie Feature Pyramid Networks for Object Detection // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017.
15. Girshick R., Donahue J., Darrell T., and Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2014.
16. He K., Zhang X., Ren S., and Sun J. Identity mappings in deep residual networks // European Conference on Computer Vision, 2016.
17. Jan Hosang, Rodrigo Benenson, Bernt Schiele Learning Non-maximum Suppression // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017.
18. Hamid Rezatofighi, Nathan Tsoi, JunYoung Gwak, Amir Sadeghian, Ian Reid, Silvio Savarese, Generalized Intersection over Union: A Metric and A Loss for Bounding Box Regression // arXiv, 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1902.09630>.
19. Prakhar Ganesh, Yao Chen, Yin Yang, Deming Chen, Marianne Winslett YOLO-ReT: Towards High Accuracy Real-time Object Detection on Edge GPUs // Computer Vision and Pattern Recognition, 2021.
20. Huang J., Rathod V., Sun C., Zhu M., Korattikara A., Fathi A., Fischer I., Wojna Z., Song Y., Guadarrama S., et al. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017.
21. Mark Everingham, Luc Van Gool, Christopher K.I. Williams, John Winn, and Andrew Zisserman. The pascal visual object classes (voc) challenge // International Journal of Computer Vision, 2010.

REFERENCES

1. GOST R 59277—2020. Sistemy iskusstvennogo intellekta. Klassifikatsiya sistem iskusstvennogo intellekta [GOST R 59277—2020. Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems].
2. Opisaniye lineyki NVIDIA Jetson [Description of the NVIDIA Jetson line], *Ofitsial'nyy sayt NVIDIA* [Official site of NVIDIA]. Available at: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems> (accessed 14 November 2021).
3. Opisaniye NVIDIA Jetson Nano [Description of NVIDIA Jetson Nano], *Ofitsial'nyy sayt NVIDIA* [Official site of NVIDIA]. Available at: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano> (accessed 15 November 2021).
4. Opisaniye NVIDIA Jetson TX2 [Description of NVIDIA Jetson TX2], *Ofitsial'nyy sayt NVIDIA* [Official site of NVIDIA]. Available at: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-tx2> (accessed 16 November 2021).
5. Opisaniye NVIDIA Jetson Xavier NX [Description of NVIDIA Jetson Xavier NX], *Ofitsial'nyy sayt NVIDIA* [Official site of NVIDIA]. Available at: URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-xavier-nx> (accessed 17 November 2021).

6. Opisaniye NVIDIA Jetson AGX Xavier [Description of NVIDIA Jetson AGX Xavier] *Ofitsial'nyy sayt NVIDIA* [Official site of NVIDIA]. Available at: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier> (accessed 15 November 2021).
7. Programirovaniye tenzomykh yader v CUDA [Programming tensor kernels in CUDA] *Ofitsial'nyy sayt NVIDIA* [Official site of NVIDIA]. Available at: <https://developer.nvidia.com/blog/programming-tensor-cores-cuda-9> (accessed 16 November 2021).
8. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement, *arXiv*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>.
9. Redmon J., Divvala S., Girshick R., and Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection, *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016.
10. Redmon J. and Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement, *arXiv preprint arXiv:1804.02767*, 2018.
11. Elias Stein, Siyu Liu, John Sun Real-Time Object Detection on an Edge Device (Final Report), *CS230: Deep Learning*, 2019.
12. Sazli Murat H. A brief review of feed-forward neural networks, *Ankara University, Faculty of Engineering, Department of Electronics Engineering*.
13. Van Etten A. Satellite imagery multiscale rapid detection with windowed networks, *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*, 2019.
14. Tsung-Yi Lin, Piotr Dollar, Ross Girshick, Kaiming He, Bharath Hariharan, and Serge Belongie Feature Pyramid Networks for Object Detection, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017.
15. Girshick R., Donahue J., Darrell T., and Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation, *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2014.
16. He K., Zhang X., Ren S., and Sun J. Identity mappings in deep residual networks, *European Conference on Computer Vision*, 2016.
17. Jan Hosang, Rodrigo Benenson, Bernt Schiele Learning Non-maximum Suppression, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017.
18. Hamid Rezatofighi, Nathan Tsoi, JunYoung Gwak, Amir Sadeghian, Ian Reid, Silvio Savarese, Generalized Intersection over Union: A Metric and A Loss for Bounding Box Regression, *arXiv*, 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1902.09630>.
19. Prakhar Ganesh, Yao Chen, Yin Yang, Deming Chen, Marianne Winslett YOLO-ReT: Towards High Accuracy Real-time Object Detection on Edge GPUs, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2021.
20. Huang J., Rathod V., Sun C., Zhu M., Korattikara A., Fathi A., Fischer I., Wojna Z., Song Y., Guadarrama S., et al. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017.
21. Mark Everingham, Luc Van Gool, Christopher K.I. Williams, John Winn, and Andrew Zisserman. The pascal visual object classes (voc) challenge, *International Journal of Computer Vision*, 2010.

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

Ковалев Владислав Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525864492; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Сергеев Николай Евгеньевич – e-mail: nesergeev@sfedu.ru; тел.: +79281742585; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

Kovalev Vladislav Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525864492; the department of computer science; post-graduate student.

Sergeev Nikolay Evgenievich – e-mail: nesergeev@sfedu.ru; phone: +79281742585; the department of computer science; dr. of eng. sc.; professor.

Ф.С. Бульга, В.М. Курейчик

**АЛГОРИТМЫ АГЛОМЕРАТИВНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ АНАЛИЗА ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ
ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Рассмотрены и представлены основные проблемы и принципы функционирования процесса кластеризации данных, в частности принципы и задачи кластеризации текстовых массивов лингвистической экспертной информации. В ходе выполнения данной работы были обозначены основные трудности возникающие при проектировании подобного рода систем, например: необходимость предварительной обработки данных, сокращение размерности исходной выборки и т.п. Для эффективного выполнения представленных задач реализованное решение должно обладать комплексным подходом учитывающим показатель эффективности методов направленных на решение отдельных подзадач, а также способностью обеспечить высокие показатели эффективности реализации каждого этапа процесса кластеризации. В представленной работе рассматриваются различные группы алгоритмов иерархической кластеризации, в частности была рассмотрена подгруппа алгоритмов агломеративной кластеризации применительно к задачам кластеризации лингвистической экспертной информации. В описываемой работе приведена формальная постановка задачи кластеризации текстов, а также определена основная группа реализованных решений основанных на принципах агломеративной кластеризации: ROCK, CURE, CHAMELEON. Проведен детальный обзор каждого из представленных алгоритмов, а также сформулированы основные достоинства и недостатки каждого из них. Преимуществом данной работы можно считать совокупность представленных данных об алгоритмах, а также результаты сравнительного анализа, позволяющие в дальнейшем оценить целесообразность и потенциальную вероятность применения указанных решения из представленной группы алгоритмов агломеративной кластеризации. Новизна данной работы заключается в формировании обзорного анализа существующих подходов в области иерархической кластеризации для решения задач кластерного анализа лингвистической экспертной информации, а также формирование результатов проведенного сравнительного анализа рассмотренных алгоритмов.

Кластеризация; иерархическая кластеризация; агломеративная кластеризация; интеллектуальный анализ данных; кластеризация лингвистической экспертной информации.

P.S. Bulyga, V.M. Kureichik

**AGGLOMERATIVE CLUSTERIZATION ALGORITHMS FOR THE
PROBLEMS OF ANALYSIS OF LINGUISTIC EXPERT INFORMATION**

This article discusses and presents the main problems and principles of the data clustering process, in particular, the principles and tasks of clustering text arrays of linguistic expert information. In the course of this work, the main difficulties arising in the design of such systems were identified, for example: the need for preprocessing data, reducing the size of the initial sample, etc. To effectively perform the presented tasks, the implemented solution must have an integrated approach that takes into account the efficiency indicators of methods aimed at solving individual subtasks, as well as the ability to provide high efficiency indicators for the implementation of each stage of the clustering process. In the presented work, various groups of hierarchical clustering algorithms are considered, in particular, a subgroup of agglomerative clustering algorithms was considered in relation to the problems of clustering linguistic expert information. In the described work, a formal statement of the text clustering problem is given, and the main group of implemented solutions based on the principles of agglomerative clustering is determined: ROCK, CURE, CHAMELEON. A detailed review of each of the presented algorithms is carried out, and the main advantages and disadvantages of each of them are formulated. The advantage of this work can be considered the totality of the presented data on the algorithms, as well as the results of a compara-

tive analysis, which make it possible to further assess the feasibility and potential probability of using these solutions from the presented group of agglomerative clustering algorithms. The novelty of this work lies in the formation of an overview analysis of existing approaches in the field of hierarchical clustering for solving the problems of cluster analysis of linguistic expert information, as well as the formation of the results of the comparative analysis of the considered algorithms.

Clustering; hierarchical clustering; agglomerative clustering; data mining; clustering of linguistic expert information.

Введение. При решении задач различного назначения в научной области и не только, может возникать проблема обработки и анализа полученных данных. Обработка и анализ данных – процесс позволяющий структурировать, выделять характерные признаки, определять зависимости, обобщать и сортировать данные различной структуры. Однако, решение подобных задач в текущих условиях может повлечь за собой ряд проблем, обусловленных следующими причинами:

Одной из причин возникновения трудностей при обработке и анализе информации можно выделить слабую структурированность входных данных, что в свою очередь увеличивает временные, ресурсные и прочие затраты на выполнение процесса обработки.

Ко второй причине можно отнести высокие темпы увеличения количества данных. Так, согласно статистической информации компании Statista каждый год объем генерации данных увеличивается на 30 %, таким образом на данный момент, показатель находится в районе 74 зеттабайта за 2021 год [1].

Для выполнения процесса анализа и обработки информации было предложено и реализовано множество подходов и алгоритмов, отличающихся друг от друга алгоритмической сложностью, временными и ресурсными затратами, особенностями эксплуатации а также различными вариациями форматов выходных данных. Зачастую, при обработке данных применяется два типа подходов: классификация или кластеризация.

Классификация. Классификация – процесс упорядочивания данных по заранее заданным классам, основываясь на выделенных признаках данных, с целью отражения взаимосвязей между ними. Классы, сформированные при помощи классификации – это множество данных, объединенных по некоторому или некоторым общим признакам объектов, отличающих данную совокупность объектов от других.

В качестве параметра классификации могут приниматься различные признаки, удовлетворяющие задачам и целям проводимой классификации. За основу класса берутся наиболее важные признаки данных, в полной мере отвечающие задачам проводимой классификации.

Результатом классификации объекта выступает указание данному объекту некоторого параметра (наименование или номер), позволяющего однозначно определить принадлежность данного объекта к конкретному классу.

Кластеризация. Кластеризация – процесс слияния экземпляров некоторой выборки данных в кластеры, основываясь на признаках подобия экземпляров выборки так, чтобы объекты принадлежащие различным кластерам обладали существенным отличием, а экземпляры одного кластера были наиболее схожи.

Декомпозиция множества подобных объектов позволяет в дальнейшем упростить процесс обработки и принятия решений, предоставляя возможность применения к каждому кластеру собственного алгоритма анализа [2]. Начальной информацией для кластерного анализа выступает матрица наблюдений (1):

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{21} & \dots & t_{1n} \\ t_{12} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{m1} & t_{m2} & \dots & t_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где, каждая строка матрицы (1) представлена значением n признаков конкретного объекта кластеризации. Обычно в качестве метрики подобия объектов применяется метрика расстояния. При этом, координаты прототипов неизвестны, а их вычисление происходит одновременно с процессом декомпозиции данных на кластеры.

В свою очередь, методы кластеризации можно разделить на две основные группы: четкие и нечеткие методы кластеризации. Четкие методы кластеризации декомпозируют множество экземпляров X на некоторое количество не пересекаемых подмножеств, при этом, каждый объект может принадлежать только одному кластеру. Нечеткие методы кластеризации предусматривают возможность одновременной принадлежность объекта к различным кластерам.

1. Задачи кластерного анализа. Задачи, в которых возможно применение кластерного анализа весьма разнообразны, и в большей степени зависят от постановки задачи и преследуемых целей. Можно выделить следующие основные задачи, достигаемые при проведении кластерного анализа:

1. Формирование структуры некоторого множества экземпляров X_m , при помощи декомпозиции множества на кластеры объектов по некоторым признакам схожести, тем самым упрощая дальнейший процесс обработки и принятия решений, с возможностью применения отдельных алгоритмов к разным кластерам.

2. Сжатие объема получаемых данных. Данный процесс необходим при поступлении на вход выборки данных большой размерности, при этом процесс сжатия будет основываться на сохранении наиболее типичных агентов каждого кластера.

3. Определение новизны путем детектирования и выделения нетривиальных объектов не принадлежащих по своим свойствам ни к одному из сформированных кластеров.

В первом из рассмотренных случаев количество кластеров необходимо свести к минимуму, что позволит проводить анализ выборки малой размерности, экземпляры которой при этом будут обладать схожими параметрами.

Во втором случае принципиально получение кластеров с высоким уровнем сходства объектов. Количество кластеров при этом может быть не ограничено, вплоть до равного значения числа полученных кластеров и элементов выборки.

В третьем случае ставится задача определения нетривиальных объектов, которые по своим свойствам не могут быть отнесены ни к одному из полученных кластеров. Таким образом, наибольший интерес будут представлять одинокие кластеры, обладающие наибольшим расстоянием к соседям.

Для выполнения всех вышеперечисленных задач возможно применение различных методов кластеризации. В данной работе будет рассмотрена одна из групп кластеризационных методов, а именно алгоритмы иерархической кластеризации. Иерархическая кластеризация – процесс поэтапного слияния множества объектов в единый кластер, либо представление множества в качестве единого кластера, с последующим дроблением, на более мелкие части. Результатом данного процесса выступает не только декомпозиция множества или его объединение в единый кластер, но также формирование древообразной иерархической структуры.

1.1. Кластеризация экспертной лингвистической информации. Процесс кластеризации экспертной лингвистической информации является одним из наиболее важных и часто встречаемых этапов при решении большинства прикладных задач в области обработки и анализа естественного языка. Например, к наиболее частым задачам кластеризации текстовых массивов можно отнести: разработка и проектирование интеллектуальных ассистентов, разработка рекомендательных систем, и т.п.

В свою очередь, процесс кластеризации текстовых массивов данных можно разделить на два основных этапа:

1. Выделение основных признаков из текстовых массивов с последующим формированием множества векторов, выступающих в качестве математической модели кластеризуемого массива.

2. Основываясь на различных метриках схожести векторов, происходит оп-ределение кластеров текстовых данных.

Методы позволяющие выделять основные признаки из текстовых массивов разделяются на следующие группы:

1. Методы основанные на семантических признаках [3].
2. Методы основанные на Latent Semantic Analysis («LSA», «LDA» [4]).
3. Методы основанные на Word embeddings («word2vec», «BERT» [5]).
4. Методы основанные на «Мешке слов» («bag-of-words» [6]).

Отличительной особенностью перечисленных методов, является необходи-мость предварительного обучения. Подобное обучение осуществляется на тексто-вых массивах, которые включают в себя термины, применяемые в кластеризируе-мых текстах, с целью определения «семантической близости» слов, используемых при проектировании векторной модели текста.

Для некоторых прикладных задач анализ и обработка текстовой информации является достаточно сложной и трудозатратой процедурой. Например в задачах кластеризации научных текстов или аннотаций. Основной проблемой данного процесса является отсутствие достаточного количества текстов для обучения алго-ритмов в некоторых областях научных исследований. В связи с вышеперечислен-ными проблемами, возникающими при решении различных прикладных задачах, разработка и проектирование методов и алгоритмов кластеризации лингвистиче-ской экспертной информации является актуальной и востребованной задачей.

2. Постановка задачи кластеризации. Общая постановка задачи кластери-зации выглядит следующим образом: пусть задано некоторое множество X и функция, вычисляющая расстояние между экземплярами данного множества $d: X^2 \rightarrow [0, \infty)$. Далее, необходимо разделить выборку объектов X_m принадлежащих дан-ному множеству на кластеры так, чтобы расстояние между экземплярами выборки одного кластера, было минимальными, а расстояние между экземплярами различ-ных кластеров – максимальным.

Алгоритм кластеризации – это представление $a: X \rightarrow Y$, где Y – неопределен-ный каскад кластеров. Следовательно, некоторому экземпляру, принадлежащему выборке $x_i \in X_m$ ставится в соответствии некоторый кластер $y_i \in Y$. Обычно, размерность каскада кластеров Y заранее не определена, и для того, чтобы полу-чить оптимальную размерность каскада, необходимо решить задачу вычисления количества кластеров, соответствующих некоторому критерию эффективности (качеству) кластеризации.

В свою очередь постановка задачи кластеризации документов выглядит не-много иным образом, так данную постановку задачи можно сформулировать на основе задачи распознавания по Ю.И. Журавлеву [7]. Пусть задано множество M объектов $\{w_j\}$; на данном множестве M проведем декомпозицию для получения конечного значения классов $\Psi_v, v = 1, \dots, g; \cup_v^g \Psi_v = M$. При этом, объекты опре-деляются значением признаков $x_j, j=1, \dots, n$. Множество значений указанных при-знаков x_j определяет представление объекта $I(w)=\{x_1, \dots, x_n\}$. Данные о принад-лежности объекта w к какому-либо классу определяются в векторной форме: $\{I_1(w), \dots, I_g(w)\}$, где $I_h(w)$ содержит в себе данные о принадлежности объекта w к классу Ψ_h (2):

$$I_h(w) = \begin{cases} 1, & \text{если } w \in \Psi_h \\ 0, & \text{если } w \notin \Psi_h \\ \Delta, & \text{если неопределен} \end{cases} \quad (2)$$

Заключение о принадлежности объекта w к классу Ψ_h принимается основываясь на значении сравнительного анализа расстояния между объектом и классом. При этом пороговые значения расстояния предопределены заранее.

При группировании экземпляров кластера, необходимо вычислить сходство данных экземпляров в соответствии с метрикой расстояния, вычисляемой по следующим формулам [8]:

1. Манхэттенское расстояние, вычисляемое по формуле:

$$d(X, Y) = \sum_i |x_i - y_i|. \quad (3)$$

2. Евклидово расстояние, вычисляемое по формуле:

$$d_E(X, Y) = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2}. \quad (4)$$

3. Расстояние Чебышева, вычисляемое по формуле:

$$d(X, Y) = \max(|x_i - y_i|). \quad (5)$$

4. Квадрат евклидова расстояния, вычисляемое по формуле:

$$d_E(X, Y) = \sum_i (x_i - y_i)^2. \quad (6)$$

Рассмотрев возможные варианты вычисления метрики расстояния можно сделать заключение о высокой вариативности вычисления параметра схожести различных кластеров. Однако, для формирования более полного представления о методах кластеризации, необходимо представить классификацию методов.

Представление классификации методов кластеризации достаточно затруднительно в силу вероятности пересечения некоторых критериев классификации, а также возможность некоторых методов обладать функциями, которые могут быть отнесены к нескольким классам. Так, в работе [9] была предложена классификация методов кластеризации с точки зрения разработчика алгоритмов, результатом данной работы стало дерево методов кластерного анализа, представленное на рис. 1.

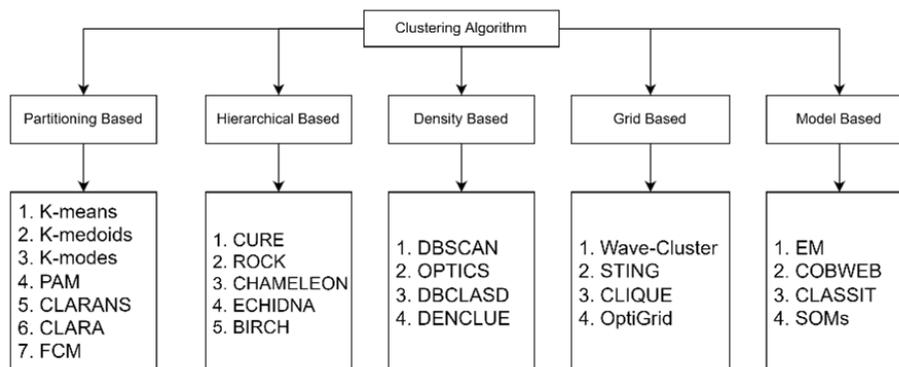


Рис. 1. Дерево классификации методов кластеризации

В данной работе более подробно будут рассмотрены методы иерархической кластеризации в качестве одного из подходов решения задачи кластерного анализа лингвистической экспертной информации.

3. Иерархическая кластеризация. Алгоритмы иерархической кластеризации базируются на основном принципе поэтапной иерархической декомпозиции массива объектов. Подобные алгоритмы принято представлять в виде двух от-

дельных групп, разделяемых направлением построения иерархии: агломеративная кластеризация – объединение малых кластеров в общий; дивизионная кластеризация – представление всех экземпляров массива единым кластером, с последующим разделением на малые. Результатом работы данного типа методов кластерного анализа выступает система вложенных разбиений, визуализируемая при помощи дендрограмм.

В данной работе будет рассмотрена агломеративная кластеризация, также именуемые восходящей. В общем виде агломеративная кластеризация выполняется в соответствии следующим этапам [10]:

1. Инициализация некоторого множества кластеров C_I , где каждый элемент массива данных x_i выступает кластером $C_q = \{x_1, \dots, x_n\}$; $q = \{1, \dots, n\}$ (q – шаг итерации);
2. Определяем в C_{q-1} пару кластеров с минимальным расстоянием друг от друга B и F , при условии, что $B \neq F$;
3. Проводим этап слияние обнаруженных кластеров B и F в единый кластер $W = B \cup F$.
4. Вычисление расстояния от сформированного кластера W к иному кластеру S , данное значение определяется по расстояниям (B, F) , (B, S) и (F, S) .

Основным отличием большинства иерархических алгоритмов выступает метод расчета расстояния между кластерами. Ниже приведены основные и часто применяемые функции вычисления межкластерного расстояния [11]:

- ◆ Расстояние дальнего соседа:

$$R(W, S) = \max_{w \in W, s \in S} \rho(w, s). \quad (7)$$

- ◆ Расстояние ближнего соседа:

$$R(W, S) = \min_{w \in W, s \in S} \rho(w, s). \quad (8)$$

- ◆ Расстояние Уорда:

$$R(W, S) = \frac{|S|W}{|S| + |W|} \rho^2 \left(\sum_{w \in W} \frac{w}{|W|}, \sum_{s \in S} \frac{s}{|S|} \right). \quad (9)$$

- ◆ Расстояние между центрами:

$$R(W, S) = \rho^2 \left(\sum_{w \in W} \frac{w}{|W|}, \sum_{s \in S} \frac{s}{|S|} \right). \quad (10)$$

- ◆ Среднее расстояние:

$$R(W, S) = \frac{1}{|W||S|} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} \rho(w, s). \quad (11)$$

Большинство методов расчета расстояния можно представить в виде единой формулы, предложенной Г. Лансом и У. Уильямсом в 1983 году [12]:

$$R(B \cup F, S) = a_B R(B, S) + a_F R(F, S) + \beta(B, F) + \gamma |R(B, S) - R(F, S)|, \quad (12)$$

где, $B \cup F$ – кластер, сформированный слиянием двух кластеров на предшествующей итерации, S – кластер, к которому необходимо рассчитать расстояние, a_B, a_F, β, γ – коэффициенты, определяющие разные функции расстояний.

В табл. 1 представлены вариации значений коэффициентов, определяющие соответствующие алгоритмы.

Таблица 1

Значение коэффициентов алгоритмом вычисления расстояния

Коэффициенты	Расстояние дальнего соседа	Расстояние ближнего соседа	Расстояние Уорда	Расстояние между центрами	Среднее расстояние
a_B	0,5	0,5	$\frac{ B }{ W }$	$\frac{ B }{ W }$	$\frac{ S + B }{ S + W }$
a_F	0,5	0,5	$\frac{ F }{ W }$	$\frac{ F }{ W }$	$\frac{ S + F }{ S + W }$
β	0	0	0	$-a_B a_F$	$\frac{- S }{ S + W }$
γ	-0,5	0,5	0	0	0

Общее описание принципов и свойств алгоритмов агломеративной кластеризации, дает представление об их функционировании, и является необходимым минимумом для дальнейшего рассмотрения существующих алгоритмов группы агломеративной иерархической кластеризации.

3.1. Алгоритм CURE (Clustering Using Representatives). Алгоритм кластеризации CURE представляет каждый элемент входной выборки в виде отдельного кластера (точки), с последующим поэтапным слиянием всей выборки в единый кластер [13].

Принцип работы данного алгоритма заключается в следующем: задается константное число точек, находящихся на максимальном удалении от центра тяжести кластера. Далее воспроизводится процесс группирования данных точек к центру тяжести на параметр J . После завершения процесса группирования, данные точки будут определены в качестве представителей кластера, которому они принадлежат. Кластеры с наиболее схожими наборами репрезентативных точек будут объединены на следующей итерации алгоритма. За счет применения точек-представителей, алгоритм CURE менее подвержен выбросам и способен определять кластеры вариативной формы и различной размерности.

Описание этапов работы алгоритма CURE:

1. На первой итерации алгоритма необходимо случайным образом отобрать часть точек, с последующим размещением их в памяти. Далее проводится объединение точек с подобными параметрами при помощи иерархического метода, в заранее заданное количество кластеров.

2. У каждого кластера определяется C точек-представителей, которые максимально удалены друг от друга, при этом значение C остается неизменным.

3. Производим группирование и объединение кластеров, с наиболее схожими каскадами точек-представителей. В случае, если чисто кластеров не было достигнуто, необходимо вернуться к шагу 2. Для того, чтобы во время процесса группирования кластеров, не нужно было каждый раз производить отбор из всех C точек-представителей, необходимо производить отбор из $2C$ точек объединенных кластеров.

4. Отобранные точки сдвигаются на последующем шаге на параметр J к центру кластера.

Входными данными для данного алгоритма выступает: матрица $x \in R^{m \times n}$, h – количество кластеров, c – количество точек-представителей, параметр α , γ , m – количество точек для выполнения кластеризации, n -размерность.

α – данный параметр предназначен для сжатия точек-представления к центру кластера, сами авторы в своей работе рекомендовали задавать данный параметр в диапазоне [0.2; 0.7], поскольку данный диапазон позволяет обнаружить кластеры несферической формы и подавлять нечастые выбросы.

γ – данный параметр определяется в качестве некоторой выборки от m точек.

c – данный параметр отвечает за количество точек-представлений. Значение данного параметра будет выбираться в зависимости от исходных данных.

Сложность данного алгоритма будет рассчитываться следующим образом. Так как входными данными для алгоритма CURE выступает n репрезентативных точек в d -мерном пространстве, а также константное число кластеров h , тогда, каждой точке требуется рассчитать расстояние к другой. Сложность данного этапа будет составлять: $O(n)$. В случае поиска соседних кластеров способом перебора, сложность данного поиска также будет составлять $O(n)$, но при эффективном поиске, сложность можно сократить до $(\log_2 n)$ [14]. По завершению этапа поиска, каждую точку требуется сместить к центроиду, сложность данной операции составит $O(n)$. Следовательно, наиболее длительное время выполнения алгоритма составит $O(n^2 \log_2 n)$. В случае двумерного пространства временная сложность составит: $O(n^2)$. В заключении можно констатировать, что алгоритм CURE выполняется за полиномиальное время [15].

Математическое описание алгоритма:

Пусть задана некоторая матрица $x \in R^{m \times n}$, число кластеров равно h , количество точек-представителей c , параметры α, γ . Любая строка из матрицы x представляет собой некоторую точку в d -мерном пространстве.

Вычисление расстояния между точками $a = (a_1, \dots, a_n)$ и $b = (b_1, \dots, b_n)$ будет производиться по формуле:

$$d(a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^d (a_i - b_i)^2}. \quad (13)$$

Этап «Инициализации». Отбирается γm строк из матрицы x некоторым случайным образом, в памяти выделяется «гуча», часть которой будет выделена для хранения дерева.

Этап «Кластеризация». В начале каждой итерации производится представление каждой отобранной точки в кластер с центроидом в этой самой точке. Далее производим выполнение следующих шагов до тех пор, пока количество кластеров не будет равно h .

1. Для i -го кластера производятся вычисления центроида μ_i в соответствии с формулой:

$$\mu_i = \frac{1}{s_i} \sum_{j \in S_i} x_j, \quad (14)$$

где S_i – порядковый номер строк матрицы x , принадлежащие кластеру i ; s_i – число экземпляров множества S_i ; x_j – j -я строка матрицы x .

2. Производится детектирование двух кластеров подходящих для слияния. Критерием выбора в данном случае может выступать: минимальное расстояние между экземплярами, принадлежащими данной паре кластеров или минимальное расстояние между центроидами двух кластеров с последующим объединением данных кластеров.

Этап «Смещение к центроиду». Каждая точка-представитель x^y k -го кластера выполняет смещение к центроиду μ_k в α раз, по формуле:

$$\widehat{x^y} = \alpha \mu_k + (1 - \alpha) x^y \quad (15)$$

тем самым получая множество \widehat{R}_k из c точек, которые в дальнейшем будут использоваться в качестве представителя кластера.

Этап «Присваивания». Данный этап присваивает неиспользованные точки k кластерам, путем вычисления расстояния до каждой точки-представителя.

В заключении можно сказать следующее: алгоритм CURE осуществляет иерархическую кластеризацию при помощи наборов определяющих точек, применение данного алгоритма возможно только в Евклидовом пространстве и для наборов данным большой размерности.

К преимуществам данного алгоритма можно отнести: выполнение кластеризации на высоком уровне; определение кластеров вариативной формы и различной размерности; обладание линейной зависимости к условиям места хранения данных и квадратичной сложности для данных высокой размерности.

Недостатки: потребность в определении пороговых значений, значений количества кластеров; возможность работы исключительно с числовыми данными; эффективные показатели только с данными малой размерности.

3.2. Алгоритм ROCK (Robust Clustering using links). Характерной особенностью данного алгоритма является то, что в нем применяются взаимосвязи между точками, в отличие от алгоритмов основанных на применении различных метрик [16]. Данный подход в кластеризации позволяет совершенствовать некоторые глобальные зависимости, а также является более результативным при обработке данных, свойства которых определяются небольшим конечным объемом параметров.

К базовым понятиям алгоритма можно отнести «соседство пары точек». Так, пусть задана некоторая функция схожести $sim(p_i, p_j)$, которая принимает значение в диапазоне $[0; 1]$, выражающая близость или подобность точек p_i и p_j , полагая что 0 – абсолютная отдаленность, 1 – абсолютная близость. Тогда при наличии границы θ между 0 и 1, при условии что $sim(p_i, p_j) \geq \theta$, точки p_i и p_j будут считаться близкими. При этом, выбор параметра граничного значения θ и функции sim будет зависеть от особенности реализации и входных данных.

Второе базовое понятие – связь между точками. Так, пусть задана некоторая функция связи $link(p_i, p_j)$ представляемая как численное значение общих соседей точек p_i и p_j . Из вышеописанного определения можно сделать заключение, что чем больше значение связи, тем выше вероятность того, что рассматриваемые точки принадлежат единому для них кластеру. Данный подход кластеризации является более обширным, в сравнении с применяемой в иных алгоритмах метрикой расстояния.

Алгоритм ROCK включает в себя два основных этапа. Так, первоначально задано n точек и k – кластеров (желаемое количество кластеров). На первом шаге алгоритм производит вычисление значений связей $link(p_i, p_j)$ между всеми парами точек, при этом каждая точка будет считаться отдельным кластером [17]. Каждому кластеру i формируется локальная куча $q[i]$, которая включает в себя все кластеры j , с которыми связь не равна нулю. Одновременно с этим формируя глобальную «кучу» Q , включающую в себя все кластеры. Второй шаг является циклом, на каждой итерации которого происходит слияние двух кластеров с наибольшими значениями функции полезности $g(i, j)$, после чего происходят соответствующие преобразования в куче. Завершение алгоритма возможно в двух случаях: все связи между оставшимися кластера нулевые, либо в остатке получено k кластеров.

Сложность данного алгоритма будет вычисляться следующим образом. Вычисление значений связей можно представить в виде перемножения пары матриц размерности n , что соответствует $O(n^{2.37})$. При этом затраты в памяти на хранение связей не должно быть более чем $n(n+1)/2$, в случае соседства пары точек. Впрочем в подавляющей части случаев медианное количество соседей составляет m_a а максимальное число m_m что в свою очередь меньше n , поэтому оценка сложности зависит от величин представленных параметров. Сложность формирования массива соседей оценивается как $O(n^2)$. Так, после завершения формирования массива для любой точки, алгоритм рассматривает все соседние пары, при этом, для каж-

дой пары формируется единственная связь. Если m_i – количество соседних точек i , тогда необходимо для нее увеличить число связей на m_i^2 раз. Следовательно сложность алгоритма составит $\sum m_i^2$ и оценивается как $O(n m_m m_a)$. Так как любая точка i может обладать не более чем $\min\{m_m, n\}$ связями, тогда полные затраты памяти не превышают $O(\min\{n m_m m_a, n^2\})$ [18].

Условные обозначения используемые в расчете сложности алгоритма: m_a – медианное количество соседей; m_m – максимально возможное количество соседей; m_i – количество соседей точки i ; n – размерность входных данных.

Математическое описание алгоритма. Пусть дано некоторое множество S состоящее из n экземпляров и некоторое число кластеров k . Для всех $p_i, p_j \in S$ задана функция схожести: $\text{sim}(p_i, p_j)$ в диапазоне $[0, 1]$, также задано пороговое значение θ в интервале $[0, 1]$ и функция $f(\theta)$.

Необходимо декомпонировать множество S на k не пересекаемых кластеров C_k таким образом, чтобы значение целевой функции E_l было максимальным. Полагая что $p_i, p_j \in S$ определим следующие условия функций:

1. Функция определения соседства пары точек:

$$\text{neib}(p_i, p_j) = \begin{cases} 1, \text{sim}(p_i, p_j) \geq \theta \\ 0, \text{sim}(p_i, p_j) < \theta \end{cases} \quad (16)$$

2. Функция определения числа связей между точками:

$$\text{link}(p_i, p_j) = \sum_{s \in S} \text{neib}(p_i, s) \text{neib}(p_j, s). \quad (17)$$

3. Целевая функция, предполагая что n_i количество элементов в C_i

$$E_l = \sum_{i=1}^k n_i \sum_{p_q, p_r \in C_i} \frac{\text{link}(p_q, p_r)}{n_i^{1+2f(\theta)}}. \quad (18)$$

4. Функция связи между кластерами C_i, C_j :

$$\text{link}[C_i, C_j] = \sum_{p_q \in C_i, p_r \in C_j} \text{link}(p_i, p_j). \quad (19)$$

5. Функция полезности, позволяет оценить целесообразность слияния кластеров C_i, C_j :

$$g(C_i, C_j) = \frac{\text{link}[C_i, C_j]}{(n_i + n_j)^{1+2f(\theta)} - n_i^{1+2f(\theta)} - n_j^{1+2f(\theta)}}. \quad (20)$$

В алгоритме ROCK изначально каждый элемент разбивается на n подмножеств, совершая $n \cdot k$ итераций, на каждой из которых происходит слияние множеств, для которых показатель функции полезности $g(i, j) \rightarrow \max$. В заключении можно констатировать, что алгоритм является достаточно устойчивым, и детерминированным.

3.3. Алгоритм CHAMELEON (Hierarchical Clustering Using Dynamic Modeling). Принцип работы данного подхода заключается в итеративном слиянии пары соседних кластеров. На первоначальном этапе данный алгоритм применяет декомпозицию графа с целью получения каскада кластеров, относительно малой величины. На следующем этапе с целью объединения кластеров полученных на первом этапе применяется агломеративная кластеризация. Таким образом, рассматриваемый алгоритм CHAMELEON по своей сути является гибридным алгоритмом включающим в себя особенности классических иерархических методов и графо-ориентированных методов [19].

Так, на первом этапе, основываясь на принципах графо-ориентированного подхода, применяется формирование графа базируясь на матрице сходства по принципу k -ближних соседей. Вершины подобного графа соединены ребрами, в

случае если объект соответствующий какой-либо из данных вершин попадает в k -ближайших объектов. На рис. 2 представлены: (а) некоторые объекты в пространстве; (б) граф построенный по принципу 1-го ближнего соседа; (в) граф построенный по принципу 3-х ближних соседей.

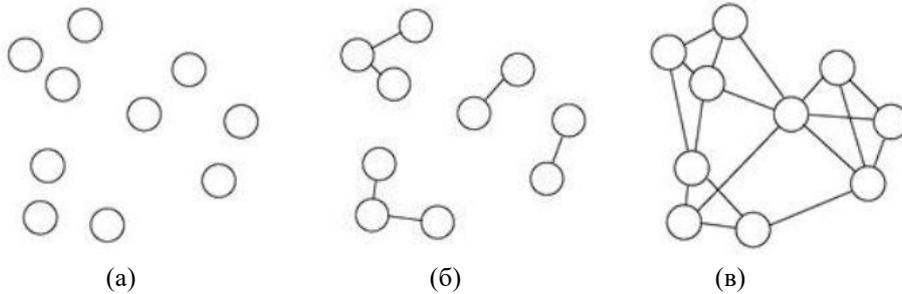


Рис. 2. Процесс формирования графа алгоритмом CHAMELEON

В последствии CHAMELEON последовательно декомпозирует сформированный граф на некоторое множество малых подграфов. На каждой итерации определяется подграф, включающий в себя наибольшее количество вершин. Данный граф будет разделен на два подграфа таким образом, чтобы разделить графа был минимальным, и каждый из вновь сформированных графов содержал некоторый процент вершин исходного графа. Этап разделения будет завершен только тогда, когда исходный граф будет содержать количество вершин не меньшее чем заданное пороговое значение. Результатом данных итераций должно быть множество связанных графов, которые будут интерпретироваться множеством начальных кластеров.

На следующем этапе происходит поэтапное слияние кластеров, применяя значения их взаимосвязанности и относительного подобия. В случае если оба перечисленных значения у обоих кластеров достаточно большие, будет произведено слияние. Относительная взаимосвязанность двух кластеров определяется абсолютной взаимосвязанностью кластеров, нормализованных с учетом внутренних связей каждого кластера. Нормализация необходима для того, чтобы исключить возможность возникновения тенденции к приоритетному слиянию кластеров большой размерности [20]. На рис. 3 представлена схема работы алгоритма.

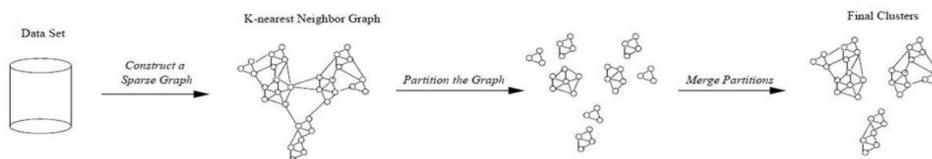


Рис. 3. Схема работы CHAMELEON

Вычисление сложности алгоритма: первоначально определим условные обозначения, используемые в ходе описания сложности алгоритма: m – количество исходных кластеров сформированных после второго шага алгоритма, n – размерность исходной выборки данных; для упрощения анализа положим размерность любого кластера равной n/m .

Формирование графа k -ближних соседей. Для определения k -ближних соседей некоторой единой фиксированной вершины, в общем случае потребуется $O(n)$ шагов, соответственно, для выполнения данного этапа необходимо $O(n^2)$ шагов.

Формирование стартового каскада кластеров. Пусть задан некоторый граф $G=(V,E)$. Первая итерация алгоритма – декомпозиция кластера максимальной размерности на пару подкластеров. Данное действие может быть выполнено за $O(|V|+|E|)$ шагов. Поскольку первоначальной точкой данной итерации выступает граф k -ближних соседей $|E|=O(|V|)$, соответственно, шаг может быть завершён за $O(|V|)=O(n)$ шагов. Итоговая сложность данного этапа может равняться $O(n \log(n/m)) = O(n \log(n))$, поскольку по итогу будет получено m кластеров.

Определение сложности третьего этапа всецело будет зависеть от вычислительной сложности относительных взаимных связностей. При этом, время затрачиваемое для декомпозиции каждого из первоначальных m кластеров будет равняться $O(n/m)$, в итоге потребуется $O(n)$. После этого, необходимо выполнить $m-1$ слияний m первоначальных кластеров, следовательно, итоговая сложность вычислений схожести составит: $O(nm)$. Исходя из всего вышесказанного, можно сделать заключение о том, что итоговая сложность алгоритма составит: $O(n^2 + nm + n \log n + m^2 \log(m))$.

Математическое описание алгоритма CHAMELEON. Этапы алгоритма:

- ◆ Определение набора данных в виде графа $G=(V, E)$ при помощи алгоритма k -ближних соседей: $e = (v_i, v_j) \in E$, при условии $dist(v_i, v_j) \in sorted(\{r | r = dist(v_i, v_k), k = 1, \dots, n\}) [1 \dots k]$, причем $weight(e) = dist(v_i, v_j)$;

- ◆ Декомпозиция графа на малые кластеры. Для выполнения данного этапа потребуется сформировать множество $C = G$ и выполнить цикл со следующими условиями на каждой итерации:

- Обнаружить $C_{greatest}$ таким, чтобы $|C_{greatest}| = \max_{1 \leq j \leq |C|} |C_j|$;

- В случае если $\frac{|C_{greatest}|}{|V|} > minsize$, тогда необходимо декомпозировать $C_{greatest}$ на пару кластеров C_1 и C_2 . В противном случае, цикл завершается;

- ◆ Формирование стартового каскада кластеров $C_{current} = C$. Далее необходимо выполнить новый цикл со следующими условиями на каждой итерации:

- Каждой паре кластеров $C_i, C_j \in C_{current}$ необходимо рассчитать следующие значения:

$$EC(C_i, C_j) = \sum_{e \in con n(C_i, C_j)} weight(e), \text{ где } con n(C_i, C_j) = \{(v, \omega) | v \in C_i, \omega \in C_j\};$$

$$EC(C_i) = \sum_{e \in mincut(C_i)} weight(e), \text{ где } mincut(C_i) - \text{минимально возможный разрез } C_i, \text{ точно также происходит вычисление } EC(C_j);$$

$$\bar{S}_{EC(C_i, C_j)} = \frac{EC(C_i, C_j)}{|con n(C_i, C_j)|};$$

$$\bar{S}_{EC(C_i)} = \frac{EC(C_i)}{|mincut(C_i)|};$$

- Выполнение процесса расчета взаимосвязанности и относительного взаимного сходства пары нынешних кластеров:

$$RI(C_i, C_j) = \frac{|EC(C_i, C_j)|}{|EC(C_i)| + |EC(C_j)|};$$

$$RC(C_i, C_j) = \frac{\bar{S}_{EC(C_i, C_j)}}{\frac{|C_i|}{|C_i| + |C_j|} \bar{S}_{EC(C_i)} + \frac{|C_j|}{|C_i| + |C_j|} \bar{S}_{EC(C_j)}};$$

- ◆ В случае если $RI(C_i, C_j)^\alpha RC(C_i, C_j) > t$, тогда необходимо выполнение объединения данной пары кластеров, если наоборот – перейти к следующему этапу. На данном этапе α – параметр, при помощи которого можно выставить приоритет одному из показателей, t – параметр, демонстрирующий минимальную степень сходства кластеров, при котором возможно объединение. В случае если на одном из этом не было объединения кластеров, цикл необходимо завершить;

В завершение можно сказать следующее: CHAMELEON разделяется на части, которые исполняются поэтапно и обособленно друг от друга, в рамках каждой из частей возможна параллельная реализация.

Представленное описание алгоритмов агломеративной кластеризации позволяют провести сравнительный анализ, необходимый для определения целесообразности применения какого-либо из представленных алгоритмов, в качестве решения задачи кластеризации текстовых данных. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ алгоритмов агломеративной кластеризации

Алгоритм	Тип моделирования	Преимущества	Недостатки
ROCK	Статическое моделирование	Надежность алгоритма; Применим для обработки больших массивов данных;	Низкая скорость работы; Слабая масштабируемость для множества объектов большой размерности;
CURE	Статическое моделирование	Устойчив к выбросам; Применим для обработки больших массивов данных; Процесс выполнения без ущерба качества кластеризации; Легкость распознавания кластеров произвольной формы;	Необходимо задание порогового значения плотности объектов и числа кластеров; Возможность работы только с числовыми значениями;
CHAMELEON	Динамическое моделирование	Эффективность применения для больших массивов данных; Возможность детектирования кластеров различной формы;	Не применим для пространств большой размерности; Высокая временная сложность в пространстве большой размерности;

Комментируя представленные результаты сравнительного анализа можно заявить следующее. Рассматриваемый алгоритм CURE не предназначен для работы с данными текстового формата, соответственно применение данного алгоритма для решения поставленной задачи невозможно.

В свою очередь алгоритм ROCK несмотря на выделенные недостатки связанные со скоростью выполнения кластерного анализа обладает достаточным потенциалом для дальнейших исследований в качестве возможного решения задачи кластеризации текстовых данных. Поскольку обладает свойством возможности работы с большими массивами и достаточной устойчивостью к выбросам.

Алгоритм CHAMELEON также обладает достаточным потенциалом для дальнейших исследований, поскольку возможен в применении для массивов больших данных, а также способен обнаруживать кластеры различной формы, что является достаточно частым явлением в задачах кластеризации текстовых данных.

Заключение. Данная работа посвящена обзорному анализу методов кластерного анализа в рамках кластеризации экспертной лингвистической информации. По итогам написания данной работы были определены основные положения и за-

дачи процесса кластеризации, а также приведены основные выводы касающиеся существующих решений в данной области в рамках группы методов агломеративной кластеризации. По результатам сравнительного анализа методов CURE, ROCK, CHAMELEON было сделано заключение о нецелесообразности дальнейшего исследования метода CURE в силу отсутствия поддержки данного метода работы с текстовыми данными. Для дальнейших исследований по данному вопросу предлагается к рассмотрению реализация и сравнение методов ROCK и CHAMELEON. Реализация данных методов позволит провести экспериментальные исследования с целью получения показателей эффективности и определить подходящий метод для дальнейшего применения в будущих исследованиях.

Данная работа выступает теоретическим базисом для начала исследований в области кластеризации текстовым массивом данных, а также экспертной лингвистической информации, и носит обзорный характер. Новизна данной работы заключается в рассмотрении основных методов и подходов к решению подобного рода задачи, а также выделения основных достоинств и недостатков каждого из представленных методов.

Отличием данной работы от существующих научных трудов является проведенный аналитический обзор развития теории кластерного анализа, а также уточнение теоретических конструкций по данной тематике. Представлен к рассмотрению сравнительный анализ методов агломеративной кластеризации с последующим выделением основных достоинств и недостатков рассмотренных методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Volume of data/information created, captured, copied and consumed worldwide from 2021 year. – <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/> (дата обращения 22.12.2021).
2. *Заргарян Ю.А., Затылкин В.В.* Классификация и нечеткая кластеризация в задачах принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 1 (102). – С. 140-144.
3. *Staab S., Hotho A.* Ontology-based text document clustering // Proc. International Intelligent Information System // Intelligent Information Processing and Web Mining Conference (IIS: IIPWM'03). – 2003. – P. 451-452.
4. *Hofmann T.* Probabilistic latent semantic indexing // Proc. of the 22nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 1999). – 1999. – P. 50-57.
5. *Devlin J., Chang M., Lee K.* BERT: Pretraining of deep bidirectional transformers for language understanding // ArXiv. – 2018. – P. 42-48.
6. *Whissell J.S., Clarke C.L.* Improving document clustering using Okapi BM25 feature weighting // Information Retrieval. – 2011. – Vol. 14, No. 5. – P. 466-487.
7. *Журавлев Ю.И.* Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. – 1978. – Т. 33. – С. 5-68.
8. *Ермоченко С.А.* Концепция применения Mapreduce в иерархической агломеративной кластеризации // Вестник Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. – 2019. – № 3 (104). – С. 28-37.
9. *Махрусе Н.* Современные тенденции методов интеллектуального анализа данных: метод кластеризации // Московский экономический журнал. – 2019. – № 6. – С. 359-377.
10. *Бильгаева Л.П., Заиграева Е.В.* Оценка качества агломеративной кластеризации // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. – 2020. – № 1 (10). – С. 43-53.
11. *Кирпичников А.П., Ризаев И.С., Тахавова Э.Г. и др.* Разработка эффективного алгоритма иерархической кластеризации // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 10. – С. 117-122.
12. *Уиллиамс У.Т., Ланс Дж.Н.* Методы иерархической классификации // Статистические методы для ЭВМ / под ред. К. Энслейна, Э. Рэлстона, Г.С. Уилфа. – М.: Наука, 1986. – С. 269-300.

13. *Гладилин А.В., Гамазина В.С.* Иерархические методы кластеризации данных и их характеристики // Информационные технологии в экономических и технических задачах. – Пенза: Пензенский государственный технологический университет, 2016. – С. 200-202.
14. *Sudipto G., Rajeev R., Kyuseok S.* CURE: an efficient clustering algorithm for large databases // SIGMOD '98 Proc. of the 1998 ACM SIGMOD international conference on Management of data. – 1998. – P. 73-84.
15. *Дубаков А.А., Воробьев А.М.* Разработка алгоритма иерархической агломеративной кластеризации для анализа текстовых документов Воробьев // Математическое и информационное моделирование. – Тюмень: Тюменский государственный университет, 2018. – С. 246-255.
16. *Давыдов О.А.* Анализ существующих алгоритмов кластеризации (Ч. 1) // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2020. – № 1 (56). – С. 27-36.
17. *Михайлов А.С., Шабанов В.Ю.* Разработка алгоритм кластеризации номинальных данных // Информационные технологии. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2019. – С. 101-107.
18. *Холда О.С., Извозчикова В.В.* Разработка алгоритма обработки больших массивов данных // Глобализация науки и техники в условиях кризиса. – Ростов-на-Дону: Изд-во ВВМ», 2021. – С. 48-53.
19. *Безверхий О.А., Самохвалова С.Г.* Кластеризация большого объема текстовых поисковых запросов // Ученые заметки ТОГУ. – 2016. – Т. 7, № 3-1. – С. 104-110.
20. *Шатовская Т.Б., Заремская А.А.* Экспериментальные результаты исследования качества кластеризации разнообразных наборов данных с помощью модифицированного алгоритма хамелеона // ScienceRise. – 2015. – Т. 3, № 2 (8). – С. 11-16.

REFERENCES

1. Volume of data/information created, captured, copied and consumed worldwide from 2021 year. Available at: <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/> (accessed 22 December 2021).
2. *Zargaryan Yu.A., Zatytkin V.V.* Klassifikatsiya i nechetkaya klasterizatsiya v zadachakh prinyatiya resheniy [Classification and fuzzy clustering in decision-making tasks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 1 (102), pp. 140-144.
3. *Staab S., Hotho A.* Ontology-based text document clustering // Proc. International Intelligent Information System, *Intelligent Information Processing and Web Mining Conference (IIS: IIPWM'03)*, 2003, pp. 451-452.
4. *Hofmann T.* Probabilistic latent semantic indexing, *Proc. of the 22nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 1999)*, 1999, pp. 50-57.
5. *Devlin J., Chang M., Lee K.* BERT: Pretraining of deep bidirectional transformers for language understanding, *ArXiv*, 2018, pp. 42-48.
6. *Whissell J.S., Clarke C.L.* Improving document clustering using Okapi BM25 feature weighting, *Information Retrieval*, 2011, Vol. 14, No. 5, pp. 466-487.
7. *Zhuravlev Yu.I.* Ob algebraicheskom podkhode k resheniyu zadach raspoznavaniya ili klassifikatsii [On an algebraic approach to solving problems of recognition or classification], *Problemy kibernetiki* [Problems of Cybernetics], 1978, Vol. 33, pp. 5-68.
8. *Ermochenko S.A.* Kontseptsiya primeneniya Mapreduce v ierarkhicheskoy aglomerativnoy klasterizatsii [The concept of using Mapreduce in hierarchical agglomerative clustering], *Vestnik Vitsebskaga dzyarzhavnaga universiteta* [Vestnik Vitsebskaga dzyarzhavnaga universiteta], 2019, No. 3 (104), pp. 28-37.
9. *Makhruse N.* Sovremennye tendentsii metodov intellektual'nogo analiza dannykh: metod klasterizatsii [Modern trends in data mining methods: clustering method], *Moskovskiy ekonomicheskyy zhurnal* [Moscow Economic Journal], 2019, No. 6, pp. 359-377.
10. *Bil'gaeva L.P., Zaigraeva E.V.* Otsenka kachestva aglomerativnoy klasterizatsii [Assessment of the quality of agglomerative clustering], *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh* [Application of Mathematics in Economic and Technical Research], 2020, No. 1 (10), pp. 43-53.

11. Kirpichnikov A.P., Rizaev I.S. Takhavova E.G., and others. Razrabotka effektivnogo algoritma ierarkhicheskoy klasterizatsii [Development of an effective hierarchical clustering algorithm], *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2019, Vol. 22, No. 10, pp. 117-122.
12. Uilliams U.T., Lans Dzh.N. Metody ierarkhicheskoy klassifikatsii [Methods for hierarchical classification // Statistical methods for computers], *Statisticheskie metody dlya EVM* [Statistical Methods for Computers], ed. by K. Ensleyana, E. Relstona, G.S. Uilfa. Moscow: Nauka, 1986, pp. 269-300.
13. Gladilin A.V., Gamazina V.S. Ierarkhicheskie metody klasterizatsii dannykh i ikh kharakteristiki [Hierarchical methods of data clustering and their characteristics], *Informatsionnye tekhnologii v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh zadachakh* [Information Technologies in Economic and Technical Problems]. Penza: Penzenskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiiy universitet, 2016, pp. 200-202.
14. Sudipto G., Rajeev R., Kyuseok S. CURE: an efficient clustering algorithm for large databases, *SIGMOD '98 Pro. of the 1998 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 1998, pp. 73-84.
15. Dubakov A.A., Vorob'ev A.M. Razrabotka algoritma ierarkhicheskoy aglomerativnoy klasterizatsii dlya analiza tekstovykh dokumentov Vorob'ev [Development of an algorithm for hierarchical agglomerative clustering for the analysis of text documents Vorobiev], *Matematicheskoe i informatsionnoe modelirovanie* [Mathematical and Information Modeling]. Tyumen': Tyumenskiy gosudarstvennyy universitet, 2018, pp. 246-255.
16. Davydov O.A. Analiz sushchestvuyushchikh algoritmov klasterizatsii [Analysis of existing clustering algorithms (Part 1)], *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific State University], 2020, No. 1 (56), pp. 27-36.
17. Mikhaylov A.S., SHabanov V.Yu. Razrabotka algoritma klasterizatsii nominal'nykh dannykh [Development of an algorithm for clustering nominal data], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. Novosibirsk: Novosibirskiy natsional'nyy issledovatel'skiy gosudarstvennyy universitet, 2019, pp. 101-107.
18. Kholda O.S., Izvozchikova V.V. Razrabotka algoritma obrabotki bol'shikh massivov dannykh [Development of an algorithm for processing large data arrays], *Globalizatsiya nauki i tekhniki v usloviyakh krizisa* [Globalization of Science and Technology in a Crisis]. Rostov-on-Donu: Izd-vo VVM», 2021, pp. 48-53.
19. Bezverkhiiy O.A., Samokhvalova S.G. Klasterizatsiya bol'shogo ob"ema tekstovykh poiskovykh zaprosov [Clustering of a large volume of text search queries], *Uchenye zametki TOGU* [Scientific Notes of PNU], 2016, Vol. 7, No. 3-1, pp. 104-110.
20. Shatovskaya T.B., Zaremskaya A.A. Eksperimental'nye rezul'taty issledovaniya kachestva klasterizatsii raznoobraznykh naborov dannykh s pomoshch'yu modifitsirovannogo algoritma khameleona [Experimental results of studying the quality of clustering of various data sets using a modified chameleon algorithm], *ScienceRise*, 2015, Vol. 3, No. 2 (8), pp. 11-16.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Булыга Филипп Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: bulyga@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79001330866; кафедра САПР; аспирант.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; тел.: +79282132730; кафедра САПР; д.т.н.; профессор.

Bulyga Philip Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: bulyga@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79001330866; the department of computer-aided design; graduate student.

Kureichik Viktor Mikhailovich – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; phone: +79282132730; the department of computer-aided design; dr. of eng. sc; professor.

Э.В. Кулиев, Д.Ю. Запорожец, Ю.А. Кравченко, М.М. Семенова

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ
НА ОСНОВЕ БИОИНСПИРИРОВАННОГО АЛГОРИТМА***

Рассматривается биоинспирированный алгоритм для решения задач интеллектуального анализа. Интеграция биоинспирированных алгоритмов для решения задач интеллектуального анализа данных является перспективным направлением исследований. В качестве биоинспирированного алгоритма, рассмотрен алгоритм, основанный на адаптивном поведении муравьиной колонии. Алгоритм муравьиной колонии позволяет производить качественный поиск перспективных решений для получения оптимальных и квазиоптимальных решений. Алгоритм обладает способностью выполнять поиск подходящей логических условий. Алгоритм муравьиной колонии основан на примере поведения живых муравьев в природе. Муравьи способны находить кратчайшее решение адаптируясь к изменениям окружающей среды. Авторами предложен модифицированный алгоритм муравьиной колонии для решения задачи интеллектуального анализа данных. В качестве задачи интеллектуального анализа данных выбрана задача кластеризации. Кластеризация – объединение в группы схожих объектов – является одной из фундаментальных задач в области анализа данных и Data Mining. Список прикладных областей, где она применяется, широк: сегментация изображений, маркетинг, борьба с мошенничеством, прогнозирование, анализ текстов и многие другие. Решение данной задачи приобретает особую актуальность в условиях постоянно растущего объема генерируемых, передаваемых и обрабатываемых данных. Классические методы кластеризации оптимизированы путем объединения с предложенным алгоритмом биоинспирированной оптимизации – муравьиным алгоритмом. Предложенный метод представляет собой модель, в которой муравьи представлены в виде агентов, которые случайным образом перемещаются в пространстве решений с некоторыми ограничениями (например, препятствия на их пути). Для определения эффективности разработанного модифицированного муравьиного алгоритма (ACO) с алгоритмом кластеризации, авторами была проведена серия вычислительных экспериментов. Для сравнения были взяты генетический алгоритм, алгоритм обезьян и алгоритм волков. Результаты моделирования доказывают, что муравьиный алгоритм на основе кластеризации дает лучшие результаты, чем другие предлагаемые алгоритмы.

Оптимизация муравьиной колонии; интеллектуальный анализ данных; кластеризация.

E.V. Kuliev, D.Yu. Zaporozhets, Yu.A. Kravchenko, M.M. Semenova

**SOLUTION OF THE PROBLEM OF INTELLECTUAL DATA ANALYSIS
BASED ON BIOINSPIRED ALGORITHM**

The article discusses a bioinspired algorithm for solving the problems of intellectual analysis. The integration of bioinspired algorithms for solving data mining problems is a promising area of research. As a bioinspired algorithm, an algorithm based on the adaptive behavior of an ant colony is considered. The ant colony algorithm allows for a high-quality search for promising solutions to obtain optimal and quasi-optimal solutions. The algorithm has the ability to search for suitable logical conditions. The ant colony algorithm is based on the example of the behavior of living ants in nature. Ants are able to find the shortest solution by adapting to changes in the environment. The authors proposed a modified ant colony algorithm for solving the problem of data mining. The clustering problem was chosen as the task of data mining. Clustering is a combining of similar objects into groups, is one of the fundamental tasks in the field of data analysis and Data Mining. The list of application areas where it is applied is wide: image segmentation, marketing, anti-fraud, forecasting, text analysis and many others. The solution to this problem is of

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-22019.

particular relevance in the context of the constantly growing volume of generated, transmitted and processed data. Classical clustering methods are optimized by combining with the proposed bioinspired optimization algorithm - the ant algorithm. The proposed method is a model in which ants are represented as agents that randomly move in the solution space with some restrictions (for example, obstacles in their path). To determine the effectiveness of the developed modified ant algorithm (ALA) with the clustering algorithm, the authors carried out a series of computational experiments. For comparison, we took the genetic algorithm, the monkey algorithm and the wolf algorithm. The simulation results prove that the clustering-based ant algorithm gives better results than other proposed algorithms.

Ant colony optimization; data mining; clustering.

Введение. Целью интеллектуального анализа данных является извлечение знаний из данных. Интеллектуальный анализ данных – это междисциплинарная область, ядро которой находится на пересечении машинного обучения, статистики и баз данных.

В интеллектуальном анализе данных цель состоит в том, чтобы обнаружить знания, которые не только точны, но и понятны для пользователя. Понятность важна всякий раз, когда обнаруженные знания будут использоваться для поддержки решения, принятого пользователем-человеком [1]. В конце концов, если обнаруженные знания непонятны для пользователя, он не сможет интерпретировать и подтвердить их. В этом случае, вероятно, пользователь не будет достаточно доверять обнаруженным знаниям, чтобы использовать их для принятия решений. Это может привести к неправильным решениям.

Существует несколько задач интеллектуального анализа данных, включая классификацию, регрессию, кластеризацию, моделирование зависимостей и т.д. Каждую из этих задач можно рассматривать как своего рода проблему, которую необходимо решить с помощью алгоритма интеллектуального анализа данных. Поэтому первым шагом при разработке алгоритма интеллектуального анализа данных является определение того, какую задачу будет решать алгоритм

Разработка алгоритмов муравьиной колонии для решения задач интеллектуального анализа данных является перспективным направлением исследований. В контексте обнаружения правил алгоритм АСО обладает способностью выполнять гибкий и надежный поиск подходящей комбинации терминов (логических условий), включающих значения атрибутов предиктора

1. Постановка задачи. Использование различных методов оптимизации развивалось на протяжении многих лет, и было предложено множество методов для того, чтобы приблизиться к оптимальному решению или набору приближенных решений для целого ряда задач в конкретных областях.

Социальные насекомые, такие как муравьи, выполняют ряд задач как группа, а не атомарно. Такое поведение иллюстрирует высокий уровень интеллекта роя.

Интеллектуальный анализ данных, дисциплина, которая состоит из методов обнаружения ранее неизвестных, действительных закономерностей и взаимосвязей в больших наборах данных, была признана ключевой областью исследований и стала важной технологией с многочисленными практическими приложениями, благодаря широкой доступности огромного объема данных [1–4]. Крупные организации применяют различные методы интеллектуального анализа данных к своим данным, чтобы извлечь полезную информацию и закономерности.

Технология поддержки, полученная в результате совместного использования метода оптимизации муравьиной колонии и интеллектуального анализа данных, приводит к усовершенствованию алгоритмов и методов с многочисленными применениями в реальных задачах и может быть использована в приложениях следующего поколения.

2. Метод оптимизация муравьиной колонии. Идея метода оптимизации муравьиной колонии (АСО) возникла в результате наблюдения за муравьями в ходе поиска пищи. Муравьи по отдельности обладают ограниченными когнитивными способностями, но коллективно способны найти кратчайший путь между источником пищи и своим гнездом. В природе муравьи бродят беспорядочно в поисках пищи. Добившись успеха, они возвращаются в свое гнездо. Во время своего перемещения они выделяют феромон, который образует испаряющийся химический путь. Другие муравьи, которые находят этот след, следуют по нему и укрепляют его, так как они также выделяют феромон. В результате более короткие пути к пище содержат больше феромонов, и по ним с большей вероятностью будут следовать остальные муравьи [5–7]. Таким образом, эта положительная обратная связь в итоге ведет всех муравьев по одному пути. Алгоритмы АСО – вероятностные методы решения вычислительных задач, которые основаны на поиске путей через графики, имитируя поиск муравьями пищи.

Алгоритмы АСО основаны на прокладке феромонного следа и следующем поведении некоторых видов муравьев, которое позволяет реальным колониям муравьев находить кратчайший путь между их колонией и источниками пищи. В настоящее время успешное применение алгоритмов АСО позволяют решать различные сложные алгоритмические разработки и теоретические исследования для сложных задач оптимизации.

В колонии насекомых, таких как муравьи, пчелы и осы каждое насекомое обычно выполняет свои собственные задачи независимо от других членов колонии. Однако задачи, выполняемые разными насекомыми, связаны друг с другом таким образом, что колония в целом способна решать сложные задачи посредством взаимного взаимодействия. Важные проблемы, связанные с выживанием, такие как выбор и сбор материалов, поиск и хранение продуктов питания, которые требуют сложного планирования, решаются колониями насекомых без какого-либо руководителя или централизованного контроллера.

Муравьи способны находить кратчайший путь между источником пищи и гнездом (адаптируясь к изменениям окружающей среды) без использования визуальной информации. Эта способность почти слепых муравьев была тщательно изучена этологами. Они обнаружили, что для обмена информацией о том, по какому пути следует следовать, муравьи общаются друг с другом с помощью следов феромонов (химического вещества). Когда муравьи двигаются, определенное количество феромона падает на землю, отмечая путь следом этого вещества. Чем больше муравьев следует по заданному следу, тем более привлекательным становится этот след для других муравьев. Этот процесс можно описать как цикл положительной обратной связи, в котором вероятность того, что муравей выберет путь, пропорциональна количеству муравьев, которые уже прошли по этому пути [8].

Когда установленный путь между источником пищи и муравьиным гнездом нарушается присутствием какого-либо предмета, муравьи вскоре попытаются обойти препятствие. Во-первых, каждый муравей может выбрать обход слева или справа от объекта с распределением вероятности 0,5–0,5. Все муравьи движутся примерно с одинаковой скоростью и оставляют феромон на тропе примерно с одинаковой скоростью. Поэтому муравьи, которые (случайно) обходят препятствие кратчайшим путем, достигнут исходной дорожки быстрее, чем другие, которые прошли более длинные пути, чтобы обойти препятствие. В результате феромон накапливается быстрее на более коротком пути вокруг препятствия. Поскольку муравьи предпочитают следовать по тропам с большим количеством феромонов, в конце концов все муравьи сходятся на более коротком пути.

АСО был вдохновлен наблюдением за поведением настоящих муравьев. Колонии муравьев состоят из особей муравьев с простым поведением, не способных решать сложные задачи. Однако на коллективном уровне эти общества способны решать сложные задачи, такие как построение оптимальной структуры гнезда или поиск кратчайшего пути к источнику пищи. На рис. 1 показано гнездо муравьиной колонии (в данном примере предполагается, что их насчитывается восемь муравьев), источник пищи и два возможных пути между ними.

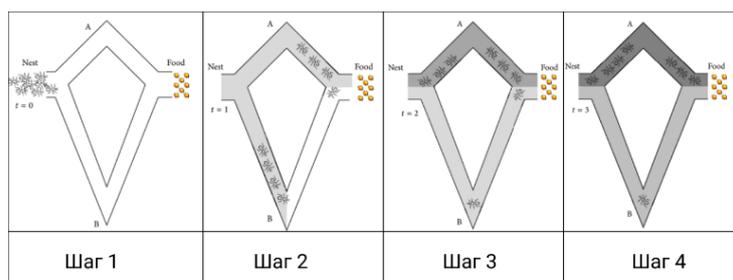


Рис. 1. Процедура поиска пищи, за которой следуют муравьи

Интенсивность цвета представляет уровень феромона для каждого пути. Более того, предполагается, что самый короткий путь – это путь А, и он имеет время прохождения, равное одной единице времени, в то время как путь В – самый длинный, с временем прохождения, равным двум единицам времени. Первоначальный выбор одного пути случаен. Предполагается, что половина колонии выбирает путь А, а оставшаяся часть – путь В. Поскольку муравьи, которые прошли по пути А, находятся в источнике пищи, и они разделили определенное количество феромона на этом пути. С другой стороны, муравьи, выбравшие путь В, все еще находятся в середине пути. Когда муравьи, выбравшие путь А в первом путешествии, возвращаются в гнездо, трое из них выбирают путь А, а один выбирает путь В из-за уровня феромона. Ведь муравьи, выбравшие путь А, теперь находятся в гнезде, и они увеличили уровень феромона на этом пути, в то время как муравей, выбравший путь В вместо пути А, чтобы вернуться в гнездо, все еще находится в гнезде, середина этого пути. Муравьи, выбравшие путь В, только что приближаются к источнику пищи [9]. Когда они возвращаются в гнездо из-за большей концентрации феромонов, трое выбирают путь А, и только один выбирает путь В. Семь муравьев, пересекающих путь А, и только один – путь В. В более поздние времена путь А будет иметь большую вероятность быть выбранным, чем путь В, поскольку концентрация феромона уменьшается на пути В (из-за того, что он не используется) и увеличивается на пути А. Однако всегда есть несколько муравьев, исследующих новые пути. Последние позволяют муравьям не застревать только на одном пути, придавая методике оптимизации глобальный характер. Описанный выше процесс показывает, как муравьи направляются по кратчайшему пути между гнездом и источником пищи.

Алгоритм АСО должен обладать следующими основными характеристиками:

- ♦ требуется соответствующее представление проблемы, позволяющее искусственным муравьям постепенно строить решение с использованием вероятностного правила перехода. В качестве примера искусственные муравьи строят свое решение, перемещаясь по графику задач из одного города в другой, пока не завершат алгоритм;

- ◆ локальная эвристика предоставляет руководство муравью при выборе следующего узла для пути, который он строит. Эта эвристика зависит от проблемы и так как она обратно пропорциональна расстоянию между двумя городами;
- ◆ вероятностное правило перехода, которое определяет, какой узел искусственный муравей должен посетить следующим. Правило перехода зависит от эвристического значения и уровня феромонов, связанного с ребром, соединяющим два узла;
- ◆ метод удовлетворения ограничений, который заставляет создавать выполнимые правила [12] муравей должен посетить каждый город один и только один раз во время построения решения;
- ◆ функция пригодности, которая определяет качество решения, построенного искусственным муравьем. Для алгоритма муравей, который производит замкнутый тур минимальной длины, имеет наибольшее качество;
- ◆ правило обновления феромонов, которое определяет, как будет происходить модификация следа феромонов, проложенного по краям графика. Уровни феромонов являются неотъемлемой частью правила перехода, упомянутого выше.

Система муравьиных колоний имитирует поведение реальных муравьиных колоний, поскольку искусственные муравьи предпочитают тропы с большим количеством феромона, более короткие пути имеют более сильное увеличение феромона, и муравьи косвенно общаются с другими муравьями, чтобы найти кратчайший путь

3. Современные элементы интеллектуального анализа данных. Интеллектуальный анализ данных (DM) – это процесс анализа данных с целью обнаружения полезных, возможно, неожиданных закономерностей в данных [7, 10–15]. Двумя наиболее важными методами DM являются классификация и кластеризация. Модель классификации выполняет задачу присвоения метки класса неизвестному объекту после того, как он был обучен несколькими примерам из заданного набора обучающих данных. С другой стороны, кластеризация – это разделение набора входных данных на подмножества (именованные кластеры), чтобы данные в одном и том же подмножестве имели что-то общее.

Вклад DM в научное сообщество неоспорим. По мере того, как DM становится все более популярным, он получает широкое признание во многих областях, таких как здравоохранение, биомедицина, фондовый рынок, обнаружение мошенничества, телекоммуникации, текстовый и веб-майнинг и другие. В биомедицинских исследованиях в области анализа ДНК привели к открытию генетических причин многих заболеваний и инвалидности, а также подходов к диагностике, профилактике и лечению заболеваний. Кроме того, DM для бизнеса продолжает расширяться, поскольку электронная коммерция и маркетинг становятся основными направлениями розничной торговли.

Разработка языков DM, разработка эффективных и действенных методов и систем интеллектуального анализа данных, создание интерактивных и интегрированных сред интеллектуального анализа данных и приложений интеллектуального анализа данных для решения крупномасштабных прикладных задач являются важными задачами как для исследователей интеллектуального анализа данных, так и для разработчиков систем и приложений интеллектуального анализа данных.

4. ACO и DM. Интересной областью исследований ACO является сочетание с методами DM для классификации и кластеризации задач принятия решений. Моделирование классификации и кластеризации в качестве задач поиска по графам позволяет использовать ACO для поиска оптимальных решений этих задач DM. До сегодняшнего дня ACO сочетался с методами DM для классификации и кластеризации в ограниченном числе исследований [11, 16].

Методы кластеризации данных также были объединены с методами АСО для поиска оптимального решения ряда проблем. Классические методы кластеризации могут быть улучшены, когда они сочетаются с концепциями АСО. Более конкретно, алгоритм Ant K-Средних модифицировал алгоритм кластеризации K-средних по вероятности нахождения объектов в кластере с использованием феромона, в то время как правило этого обновления подчиняется общей дисперсии в пределах кластера [6].

5. Кластеризация данных и оптимизация муравьиной колонии. Базовая модель для методов кластеризации данных, основанная на идеях, полученных из муравьиных колоний, была впервые представлена Deneubourg et al. (1990). Основная идея, лежащая в основе их метода, включает в себя основные действия колонии муравьев по сбору предметов для формирования куч, и сортировки их с различием между различными видами предметов. Предлагаемая модель представляет собой непрерывную модель, в которой муравьи представлены в виде простых агентов, которые случайным образом перемещаются в двумерную (квадратную) сетку с рядом ограничений для того, чтобы складывать свои предметы. Предметы, распределенные в такой среде, могут быть подобраны с вероятностью [1, 2, 17]

$$P_p = \left(\frac{a_1}{a_1 + f} \right)^2$$

или сброшены с вероятностью

$$P_d = \left(\frac{f}{a_2 + f} \right)^2.$$

На каждом шаге итерации муравей исследует свою окрестность и вычисляет вышеуказанные вероятности. Параметры a_1 и a_2 являются пороговыми константами, и их значения сравниваются со значением функции f , которая обозначает высокую вероятность подбора или опускания предмета. Например, если a_1 намного выше f , то P_p сходится к 1, что делает вероятность того, что муравей поднимет предмет, довольно высокой. Функция f – это функция, которая инкапсулирует понятие среднего расстояния между элементами.

На эту процедуру влияет ряд параметров в локальной окрестности агентов, которые задаются эмпирически и могут создавать больше кластеров, чем оптимальное число. Более того, в базовой модели отсутствие феромона в ряде случаев может иметь решающее значение. По этой причине было предложено множество улучшений этого алгоритма.

Основные этапы алгоритма кратко изложены ниже. На этапе инициализации выбираются n точек данных и m муравьев назначаются m узлам (n представляет количество узлов, а m – количество муравьев). Затем выполняется вычисление количества узлов, которые должны посетить муравьи (сначала в первый раз, а затем случайным образом для каждого муравья в произвольных направлениях). После этого выполняется случайный выбор нескольких трасс, и с помощью механизма отбора (в данном случае выбора турнира) алгоритм находит феромонный след с большим количеством. На следующем шаге это количество феромонов каждого следа обновляется и выполняется повторение вышеуказанных шагов, пока все следы количества феромонов не достигнут стабильного состояния. На последнем этапе выполняется кластеризация с использованием значения количества феромонов.

Более того, результаты, полученные с помощью алгоритма ACODF, были сопоставлены с двумя другими известными подходами к кластеризации данных, быстрой самоорганизующейся картой (FSOM), объединяющей K-средние (он же FSOM+K-средние) и генетический алгоритм K-средних (GKA) [6]. Сравнение показало, что алгоритм ACODF работает лучше с точки зрения временных затрат, когда используемые наборы данных представляют собой наборы данных из 300 и

579 выборок, а используемые методы кластеризации являются как несферическими, так и сферическими. Кроме того, ACODF выдает меньшее количество ошибок (лучшие результаты кластеризации), чем два других алгоритма.

Другие подходы включают совершенствование классических методов кластеризации, когда они сочетаются с концепциями АСО. Основная парадигма такого подхода представлена в, где представлен алгоритм Ant K-средних, который модифицирует знакомый алгоритм кластеризации K-средних по вероятности нахождения объектов в кластере с использованием феромона, в то время как правило этого обновления соответствует общей дисперсии в кластере (TWCV). Основным недостатком методов, основанных на алгоритме Ant K-средних и его вариациях, является то, что количество кластеров и соответствующие центроиды должны быть известны заранее и сгенерированы с целью алгоритма кластеризации на основе системы Ant (ASCA).

Этот алгоритм состоит из четырех подпроцедур (разделить, agglomerate_obj, агломерировать и удалить) и вычисляет TWCV. Введенный основной алгоритм изменяет хорошо известный алгоритм K-средних в том, как вычисляется местоположение объектов в кластере, и используемая вероятность изменяется феромоном (обновление феромона в соответствии с TWCV). Первым шагом алгоритма АК (ANT K-means) является фаза инициализации, на которой инициализируются все параметры, включая количество кластеров и его центроид. На втором этапе на каждый путь накладывается равное количество феромона, а затем каждый муравей выбирает центроид с вероятностью P ,

$$P_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_c^{nc} \tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta},$$

где i – начальная точка, j – конечная точка, которую муравей k выбирает в итоге для перемещения, c – центроид, а nc – общее количество центроидов. Следующим шагом является обновление феромона с помощью

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \frac{Q}{TWCV},$$

где Q – константа. Затем выполняется вычисление объекта $O_{center}(T_k)$, который является центром всех объектов в T , где $k = 1, 2, 3, \dots, nc$, и при необходимости выполняется пересчет TWCV. Параметр T описывает набор, включающий все используемые объекты (максимальное число равно n). Если TWCV изменяется, вероятность P пересчитывается на третьем шаге. Последним шагом является выполнение процедуры *Perturbation*, чтобы перейти от локального минимального решения и если количество итераций выполнено, алгоритм останавливается, в противном случае P пересчитывается.

Во время первой итерации алгоритма каждый элемент матрицы инициализируется одинаковыми значениями. По мере выполнения алгоритма матрица феромонов обновляется соответствующим образом, в зависимости от полученных решений. На каждой итерации агенты или программные муравьи производят пробные решения с использованием следов феромонов, чтобы получить оптимальное или почти оптимальное разделение заданных N объектов на K кластеров (групп). После генерации пробных решений достигается дальнейшее улучшение предлагаемых решений путем выполнения локального поиска. Вероятность феромона используется для выбора между различными кластерами и определяется

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\sum_{k=1}^k \tau_{ik}},$$

где p_{ij} – нормализованная вероятность феромона для элемента i , принадлежащего кластеру j , и $j = 1, 2, \dots, K$.

Экспериментальные исследования. Для определения эффективности разработанного модифицированного муравьиного алгоритма (ACO) с алгоритмом кластеризации, авторами была проведена серия вычислительных экспериментов. Для сравнения были взяты генетический алгоритм [20], алгоритм обезьян (MA) [18–19] и алгоритм волков (GWO) [14–17]. Результаты моделирования доказывают, что муравьиный алгоритм на основе кластеризации дает лучшие результаты, чем другие предлагаемые алгоритмы.

Таблица 1

Сравнение предложенных алгоритмов

Алгоритм	Время работы (сек)	Скорость классификации	MSE (среднеквадратическое отклонение)
ACO	7400	98,6667%	0,0156
GWO	8956	88,6667%	0,0725
GA	8412	78,6667%	0,2094
MA	27 729	81,3333%	0,1674

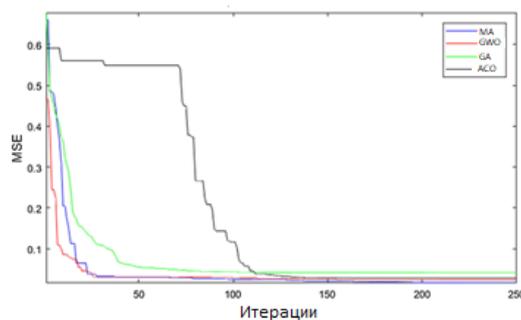


Рис. 2. Кривая сходимости

Факторами, рассматриваемыми для сравнительного исследования, являются сходимость, время выполнения, скорость классификации и MSE. Результаты моделирования доказывают, что муравьиный алгоритм на основе кластеризации дает лучшие результаты, чем другие предлагаемые алгоритмы. Данный алгоритм может быть рассмотрен для будущего исследования задач интеллектуального анализа данных.

Заключение. Была рассмотрена модель для методов кластеризации данных, основанная на оптимизации муравьиной колонии. Метод оптимизации муравьиной колонии был вдохновлен поведением настоящих муравьев и того, как они себя ведут, чтобы решить проблемы, такие как поиск пищи или сортировка выводков. Этот метод, названный ACO, и его совместное использование с методом DM кластеризацией, которая является наиболее часто используемой в задачах интеллектуального анализа данных. В этой статье основное внимание уделяется обзору работы по использованию ACO для кластеризации. Технологии, обеспечивающие совместное использование ACO и DM приводят к усовершенствованным алгоритмам и методам с многочисленными применениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jun Wu, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Jianhua Li, Zhitao Guan.* Big Data Analysis-Based Secure Cluster Management for Optimized Control Plane in Software-Defined Networks // Network and Service Management IEEE Transactions on. – 2018. – Vol. 15, No. 1. – P. 27-38.
2. *Farha Haneef, Ganesh Raj Kushwaha, Ashutosh K. Dubey.* Analysis with Data Mining and Ant Colony Algorithm for Implementing of Object Pool Optimization // 2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies.
3. *Rodzin S.I., Rodzina L.S.* Theory of Bionic Optimization and its Application to Evolutionary Synthesis of Digital Devices // 12th IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM (EWDTS 2014). – Kharkov: Kharkov National University of Radio Electronics. – P. 147-151.
4. *Bova V.V., Kureichik V.V., Lezhebokov A.A.* The integrated model of representation of problem-oriented knowledge in information systems // IEEE 8th International Conference on Application of Information and Communication Technologies - AICT2014, Astana. – P. 111-114.
5. *Родзин С.И., Курейчик В.В.* Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 3. – С. 51-79.
6. *Кравченко Ю.А., Нацкевич А.Н.* Модель решения задачи кластеризации данных на основе использования бустинга алгоритмов адаптивного поведения муравьиной колонии и к-средних // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 7 (192). – С. 90-102.
7. *Ершов К.С., Романова Т.Н.* Анализ и классификация алгоритмов кластеризации // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. – Вып. 19. – С. 274-279.
8. *Van D.M. and Engelbrecht A.P.* Data clustering using particle swarm optimization // Proceedings of The Congress on Evolutionary Computation. – 2003. – P. 215-220.
9. *Кравченко Ю.А., Нацкевич А.Н., Курсутыс И.О.* Бустинг биоинспирированных алгоритмов для решения задачи кластеризации // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2018. – Т. 1. – С. 777-780.
10. *Shelokar P.S., Jayaraman V.K. and Kulkarni B.D.* An Ant Colony Approach for Clustering // Analytica Chimica Acta. – 2004. – Vol. 509, No. 2. – P. 187-195.
11. *Yi-Tung Kao, Erwie Zahara and I-Wei Kao.* A hybridized approach to data clustering // Expert Systems with Applications. – 2008. – Vol. 34, No. 3. – P. 1754-1762.
12. *Changsheng Zhang, Dantong Ouyang and Jiaxu Ning.* An artificial bee colony approach for clustering // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol. 37, No. 7. – P. 4761-4767
13. *Miao Wan, Lixiang Li, Jinghua Xiao, Cong Wang and Yixian Yang.* Data clustering using bacterial foraging optimization // Journal of Intelligent Information Systems. – 2012. – Vol. 38, No. 2. – P. 321-341.
14. *Кулиев Э.В., Лежебоков А.А., Кравченко Ю.А.* Роевой алгоритм поисковой оптимизации на основе моделирования поведения летучих мышей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 7 (180). – С. 53-62.
15. *Kursitys I., Kravchenko Y., Kuliev E., Natskevich A.* A bioinspired algorithm for improving the effectiveness of knowledge processing // Advances in Intelligent Systems and Computing (см. в книгах). – 2021. – Vol. 1197 AISC. – P. 1491-1498.
16. *Kuliev E.V., Zaporozhets D.Y., Kureichik V.V., Kursitys I.O.* Wolf pack algorithm for solving vlsi design tasks // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference "Information Technologies in Business and Industry" - 1 - Microprocessor Devices, Telecommunication and Networking" 2019. – P. 022009.
17. *Kuliev E.V., Kureichik V.V., Kursitys I.O.* Decision making in VLSI components placement problem based on grey wolf optimization // 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2019. – 2019. – P. 8884371.
18. *Курейчик В.В., Кулиев Э.В., Курейчик В.В.* Модель адаптивного поведения "обезьян" для решения задачи компоновки блоков ЭВА // Информатизация и связь. – 2018. – № 4. – С. 31-37.
19. *Kuliev E., Kureichik V., Kureichik V.* Monkey search algorithm for ece components partitioning // Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 - Enterprise Information Systems. – 2018. – P. 042026.
20. *Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V.* Development of distributed information systems: ontological approach // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – Vol. 349. – P. 113-122.

REFERENCES

1. Jun Wu, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Jianhua Li, Zhitao Guan. Big Data Analysis-Based Secure Cluster Management for Optimized Control Plane in Software-Defined Networks, *Network and Service Management IEEE Transactions on*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 27-38.
2. Farha Haneef, Ganesh Raj Kushwaha, Ashutosh K. Dubey. Analysis with Data Mining and Ant Colony Algorithm for Implementing of Object Pool Optimization, *2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies*.
3. Rodzin S.I., Rodzina L.S. Theory of Bionic Optimization and its Application to Evolutionary Synthesis of Digital Devices, *12th IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM (EWDTS 2014)*. Kharkov: Kharkov National University of Radio Electronics, pp. 147-151.
4. Bova V.V., Kureichik V.V., Lezhebokov A.A. The integrated model of representation of problem-oriented knowledge in information systems, *IEEE 8th International Conference on Application of Information and Communication Technologies - AICT2014, Astana*, pp. 111-114.
5. Rodzin S.I., Kureychik V.V. Teoreticheskie voprosy i sovremennye problemy razvitiya kognitivnykh bioinspirirovannykh algoritmov optimizatsii [Theoretical issues and modern problems of the development of cognitive bioinspired optimization algorithms], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2017, No. 3, pp. 51-79.
6. Kravchenko Yu.A., Natskevich A.N. Model' resheniya zadachi klasterizatsii dannykh na osnove ispol'zovaniya bustinga algoritmov adaptivnogo povedeniya murav'inoi kolonii i k-srednikh [A model for solving the problem of data clustering based on the use of boosting algorithms for adaptive behavior of an ant colony and k-means] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 7 (192), pp. 90-102.
7. Ershov K.S., Romanova T.N. Analiz i klassifikatsiya algoritmov klasterizatsii [Analysis and classification of clustering algorithms], *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems], 2016, Issue 19, pp. 274-279.
8. Van D.M. and Engelbrecht A.P. Data clustering using particle swarm optimization, *Proceedings of The Congress on Evolutionary Computation*, 2003, pp. 215-220.
9. Kravchenko Yu.A., Natskevich A.N., Kursitys I.O. Busting bioinspirirovannykh algoritmov dlya resheniya zadachi klasterizatsii [Boosting bioinspired algorithms for solving the clustering problem] *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International Conference on Soft Computing and Measurements], 2018, Vol. 1, pp. 777-780.
10. Shelokar P.S., Jayaraman V.K. and Kulkarni B.D. An Ant Colony Approach for Clustering, *Analytica Chimica Acta*, 2004, Vol. 509, No. 2, pp. 187-195.
11. Yi-Tung Kao, Erwie Zahara and I-Wei Kao. A hybridized approach to data clustering, *Expert Systems with Applications*, 2008, Vol. 34, No. 3, pp. 1754-1762.
12. Changsheng Zhang, Dantong Ouyang and Jiaxu Ning. An artificial bee colony approach for clustering, *Expert Systems with Applications*, 2010, Vol. 37, No. 7, pp. 4761-4767.
13. Miao Wan, Lixiang Li, Jinghua Xiao, Cong Wang and Yixian Yang. Data clustering using bacterial foraging optimization, *Journal of Intelligent Information Systems*, 2012, Vol. 38, No. 2, pp. 321-341.
14. Kuliev E.V., Lezhebokov A.A., Kravchenko Yu.A. Roeffvoy algoritm poiskovoy optimizatsii na osnove modelirovaniya povedeniya letuchikh myshey [Swarm search engine optimization algorithm based on bat behavior modeling], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 7 (180), pp. 53-62.
15. Kursitys I., Kravchenko Y., Kuliev E., Natskevich A. A bioinspired algorithm for improving the effectiveness of knowledge processing, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, Vol. 1197 AISC, pp. 1491-1498.
16. Kuliev E.V., Zaporozhets D.Y., Kureichik V.V., Kursitys I.O. Wolf pack algorithm for solving vlsi design tasks, *Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference "Information Technologies in Business and Industry" - 1 - Microprocessor Devices, Telecommunication and Networking" 2019*, pp. 022009.
17. Kuliev E.V., Kureichik V.V., Kursitys I.O. Decision making in VLSI components placement problem based on grey wolf optimization, *2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2019*, 2019, pp. 8884371.
18. Kureychik V.V., Kuliev E.V., Kureychik V.V. Model' adaptivnogo povedeniya "obez'yan" dlya resheniya zadachi komponovki blokov EVA [Model of adaptive behavior of "monkeys" for solving the problem of EVA block layout], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2018, No. 4, pp. 31-37.

19. *Kuliev E., Kureichik V., Kureichik V. Monkey search algorithm for ece components partitioning // Journal of Physics: Conference Series, International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 - Enterprise Information Systems, 2018, pp. 042026.*
20. *Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V. Development of distributed information systems: ontological approach, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2015, Vol. 349, pp. 113-122.*

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

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

Запорожец Дмитрий Юрьевич – e-mail: duzaporozhets@sfedu.ru; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Кравченко Юрий Алексеевич – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Семенова Марина Максимовна – e-mail: bogomolova@sfedu.ru; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; студент.

Kuliev Elmar Valerievich – Southern Federal University; e-mail: ekuliev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

Zaporozhets Dmitriy Yurievich – e-mail: duzaporozhets@sfedu.ru; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

Kravchenko Yuriy Alekseevich – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

Semenova Marina Maximovna – e-mail: bogomolova@sfedu.ru; phone: +78634371651; the department of computer aided design; student.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-99-114

А.К. Фархун

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В НЕКАРТОГРАФИРОВАННОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

В данной работе применяется нейронная сеть глубокого обучения специальной структуры, которая позволяет мобильному роботу перемещаться без столкновения с препятствиями в неизвестной среде. Основными проблемами, на решение которых направлены усилия исследователей в области нейросетевых планировщиков движения, являются повышение производительности нейронных сетей, оптимизация их структуры и автоматизация процессов обучения. Основным результатом данной статьи является новый итерационный алгоритм разработки обучающего набора. На первой итерации разрабатывается стартовый обучающий набор и производится начальное обучение нейронной сети. В следующих итерациях обученная на предыдущем этапе нейронная сеть используется в качестве фильтра для следующих обучающих наборов. Фильтр выбирает траектории с коллизиями, обусловленными ошибками нейронной сети. В процессе обучения количество сверточных и полностью связанных слоев итеративно увеличивается. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет разработать как обучающий набор, так и архитектуру нейронной сети. Выполняется сравнение результатов обучения для отфильтрованных и нефилтрованных наборов. Подтверждена высокая эффективность фильтрации, в результате которой изменяется распределение примеров в обучающей выборке. Алгоритм может быть использован для разработки блока планирования системы управления мо-

бильными наземными роботами. В статье приводится пример обучения нейронной сети в среде моделирования Matlab. В примере проведено пять итераций обучения, в ходе которых достигнута точность более 90 %. Данная точность получена с использованием набранной статистики по движению мобильного робота в случайно генерируемой среде. Плотность заполнения среды препятствиями составляла до 40 %, что соответствует городским условиям. Проведено сравнение нейросетевых планировщиков, обученных с помощью предложенной итерационной процедуры и при обычном обучении. Сравнение показало, что применение итерационной процедуры повышает точность планирования до 12 – 15 %. При этом исходный объем обучающей выборки уменьшается в несколько раз за счет применяемой фильтрации.

Мобильный робот; планирование траектории; нейронная сеть; машинное обучение; глубокий обучения; архитектура сверточной нейронной сети.

A.K. Farhood

CONTROL OF A MOBILE ROBOT ON BASE OF NEURAL NETWORK FOR THE PATH PLANNING IN UNMAPPED OBSTRUCTED ENVIRONMENT

In this work, a neural network of deep learning of a special structure is used. The neural network allows a mobile robot to move without encountering obstacles in an unknown environment. The main problems that the efforts of researchers in the field of neural network traffic planners are aimed at solving are improving the performance of neural networks, optimizing their structure and automating learning processes. The main result of this article is a new iterative algorithm for developing a training set. At the first iteration, the initial training set is developed and the initial training of the neural network is performed. In the following iterations, the neural network trained at the previous stage is used as a filter for the following training sets. The filter selects trajectories with collisions caused by neural network errors. During the learning process, the number of convolutional and fully connected layers increases iteratively. Thus, the proposed algorithm makes it possible to develop both a training set and a neural network architecture. Training results are compared for filtered and unfiltered sets. The high efficiency of filtering has been confirmed, as a result of which the distribution of examples in the training sample changes. The algorithm can be used to develop a planning block for a mobile ground control system. The article provides an example of training a neural network in a Matlab modeling environment. In the example, five iterations of training were carried out, during which an accuracy of more than 90% was achieved. This accuracy was obtained using the collected statistics on the movement of the mobile robot in a randomly generated environment. The density of filling the environment with obstacles was up to 40%, which corresponds to urban conditions. The comparison of neural network planners trained using the proposed iterative procedure and with conventional training is carried out. The comparison showed that the use of an iterative procedure increases the accuracy of planning up to 12-15%. At the same time, the initial volume of the resulting sample is reduced several times due to the applied filtering.

Mobile robot; path planning; neural network; machine learning; deep learning; structure of neural network.

Введение. В последнее время широкое распространение получили системы планирования пути, базирующиеся на нейронных сетях [1, 2], которые являются эффективным средством адаптации. В этой связи нейронные сети применяются для планирования пути в неопределенной среде.

В работе [3] исследована проблема планирования движения группы роботов в некартографированной среде с препятствиями. Однако нейронная сеть не планирует полностью движение, а только настраивает коэффициенты системы управления. Это одно из частых применений нейронных сетей в адаптивных системах. При этом группа роботов прибывает в целевую область, поддерживая заданный строй и устраняя возникающие коллизии. В указанной статье рассмотрена ситуация, когда строй задан заранее, а движение осуществляется на плоскости.

В работе [4] исследуется проблема обследования неопределенной среды группой роботов. Децентрализованный нейросетевой алгоритм планирует совокупность траекторий движения группы роботов, основываясь на попарных коммуникациях. Разработанные алгоритмы реализованы в симуляционной среде, которая моделирует процесс обследования области природного бедствия группой роботов. Преимущества предложенного подхода демонстрируется путем численных экспериментов.

В работе [5] решается задача группового преследования убегающего объекта. Разработанная авторами нейронная сеть решает задачу построения траекторий преследования группы, учитывая ограничения и запаздывания в каналах связи. При этом нейронная сеть осуществляет прогнозирование положения убегающего объекта. Данный подход исследуется методами численного моделирования.

Авторы статьи [6] решают задачу группового детектирования и слежения за людьми и животными. Используемая нейронная сеть глубокого обучения осуществляет как распознавание и трекинг, так и планирование движения отдельного робота. Разработанная система исследована как численными методами, так и с помощью натуральных экспериментов.

В работе [7] рассмотрена децентрализованная система управления роботизированным складом, которая включает в себя две нейронные сети. Первая из этих нейронных сетей классифицирует состояние среда по пяти классам. Вторая нейронная сеть детектирует ошибки при планировании. Таким образом, нейронные сети являются в данной системе составными компонентами, погруженными в структуру конечного автомата.

Авторы [8] исследуют проблему планирования движения строя группы роботов. При этом под строем понимается оптимальное в смысле заданного критерия заполнение определенной заранее фигуры на плоскости. Для решения данной задачи применяется рекуррентная нейронная сеть. Задача формирования строя, решаемая нейронной сетью, формулируется в виде проблемы выпуклой оптимизации по негладкому критерию. Предложенная система исследуется как методами численного моделирования, так и с помощью натурального эксперимента.

В работе [9] представлена система управления движения колесного мобильного робота в неопределенной среде. Нейронная сеть глубокого обучения осуществляет в данной системе управления планирование маршрута робота. Предложена новая каскадная структура нейронной сети, в которой в различных ситуациях задействуются различные каскады для планирования траектории. Такая декомпозиция позволяет упростить структуру нейронной сети и процесс ее обучения. Результаты разработки подтверждаются методами численного моделирования и натурными экспериментами.

В статье [10] представлено исследование, посвященное применению нейронных сети для навигации мобильных роботов в частично неизвестной среде. Для решения данной задачи используется две нейронные сети для планирования траектории, свободной от столкновений. Первая нейронная сеть находит свободное пространство, используя сенсорные данные, а другая нейронная сеть находит безопасную траекторию, обеспечивая обход ближайшего препятствия.

В работе [11] решается задача одновременной локализации, картографирования и планирования пути на базе нейронной сети. При ее решении устраняются накапливаемые ошибки, вызванные погрешностями одометрии и неточной линеаризацией нелинейной функции SLAM. В указанной работе применяется нейронная сеть специальной структуры, которая позволяет мобильному роботу перемещаться без столкновения с препятствием в неизвестной среде. Как указывалось ранее, нейронные сети широко используются в гибридных системах управления. Так в [12]

представлена гибридная система, включающая нейронную сеть и алгоритм искусственных потенциальных полей, которые решают задачу планирования пути для группы роботов. Применение гибридного алгоритма позволяет получить гладкие траектории движения. В работе [13] также представлен гибридный подход к планированию пути, который базируется на применении нейронной сети и нечеткой логики, что позволяет использовать преимущества обоих подходов. Рассмотрена задача планирования траекторий группы роботов в среде со случайным расположением статичных препятствий. Показано, что применение гибридной схемы дает преимущества относительно не гибридных подходов. Авторы [14] также предложили гибридный подход для планирования пути мобильных роботов, сочетающий нечеткую логику с нейронной сетью. Нейронная сеть позволяет эффективно находить оптимальное количество активируемых нечетких правил, что сокращает число вычислений и позволяет работать планировщику в реальном времени.

Значительное число работ направлено на повышение эффективности процесса обучения и производительности нейронных сетей, выполняющих задачи планирования пути мобильных роботов. В работе [15] представлен метод автоматизированного обучения нейронной сети для планирования траекторий. Основная идея заключается в том, что при изменении сложности среды, количество слоев нейронной сети автоматически изменяется, что позволяет автоматически подобрать структуру сети, соответствующую сложности решаемой задачи. В работах [16–18] также рассматривается задача автоматизации процесса обучения нейронной сети. В указанных работах представлена итерационная процедура. В работе [23] исследуется проблема повышения производительности нейронных сетей при решении задач навигации мобильных роботов. Предложена модификация базовой нейронной сети, которая позволяет ускорить сходимость нахождения пути робота, движущегося в статической и динамической среде. В предлагаемом подходе применен ускоренный запуск нейронов на основе стратегии динамического порогового значения.

Несмотря на то, что во многих сферах практическое применение нейронных сетей ограничено, в силу сложности доказательства устойчивости таких систем, области применения ИНС постоянно растут. Они находят применение в задачах навигации морских роботов [19, 24], наземных роботов [20], шагающих роботов [21], роботов-манипуляторов [22] и беспилотных комплексов воздушного базирования [24].

В данной работе рассматривается метод планирования, базирующийся на использовании нейронной сети. Предлагается использовать нейронную сеть, которая обучается на примерах известных методов планирования пути, но осуществляет не полный расчет траектории движения, а только расчет текущего направления движения робота. Выдвигается гипотеза о том, что совокупность признаков для планирования направления движения, которую кодирует нейронная сеть при обучении, в вычислительном плане окажется менее затратной, чем вычисления в соответствии с известными алгоритмами поиска пути. Это позволит эффективно использовать нейросетевой планировщик в некартографированных или динамических средах, когда маршрут необходимо перестраивать в зависимости от ситуации.

Как известно [25] машинное обучение включает в себя методы контролируемого обучения, неконтролируемое обучение и обучение с подкреплением. При контролируемом обучении в нейронная сеть настраивается таким образом, чтобы наиболее точно повторять алгоритм, использующийся в качестве учителя. В такой постановке нейронная сеть может иметь преимущества перед остальными методами планирования только в вычислительной эффективности. При неконтролируемом обучении и обучении с подкреплением возможно решение задач, которые не решаются другими методами.

При обучении часть выборки от 70 до 90 % предъявляется нейронной сети. Оставшаяся часть выборки не предъявляется и используется при тестировании.

Особое внимание в последнее время уделяется глубокому обучению, которое заключается в применении нейронных сетей с большим числом скрытых слоев. Глубокое обучение, предъявляя значительные требования к вычислительным ресурсам, позволяет решать разнообразные задачи в области обработки сигналов и изображений [26, 27], распознавания объектов [28], распознавание речи [29].

Значительное снижение вычислительных затрат при обучении и функционировании нейронных сетей возможно при использовании сверточных сетей [30]. Архитектура сверточной нейронной сети включает входной слой, множество сверточных слоев, слои подвыборки и выходные полносвязные слои.

Таким образом, основными проблемами, на решение которых направлены усилия исследователей в области нейросетевых планировщиков движения, являются повышение производительности нейронных сетей, оптимизация их структуры и автоматизация процессов обучения. При применении нейронных сетей являются проблемами определения оптимальной для поставленной задачи структуры нейронной сети и создание обучающей выборки.

В части применения обучающихся и самообучающихся систем, основными направлениями исследований являются:

- 1) Разработка методов и алгоритмов выбора рациональной структуры нейронной сети, соответствующей решаемым задачам;
- 2) Автоматизация процесса обучения и формирование необходимой и достаточной выборки для обучения нейронной сети.

В данной работе проводится разработка метода, позволяющего получить нейронную сеть и создать обучающую выборку, которые позволят решать задачу планирования пути робота.

Формулировка задачи разработки нейросетевого планировщика движения. Рассматривается карта плоской среды, включающая в себя известные препятствия. Пример такой среды показан на рис. 1. Препятствия на карте обозначены красными прямоугольниками, начальная точка обозначена черной точкой, а целевая точка – черной звездой. При отсутствии карты среды она строится на основе данных системы технического зрения, как показано на рис. 2. При этом препятствия на карте дстраиваются по их видимой части в соответствии с описанием, представленным в работах [16–18].

В обоих случаях отличий в процедуре обучения робота нет.

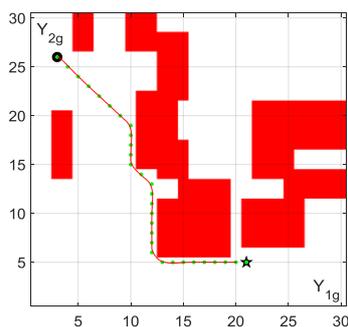


Рис. 1. Пример карты для обучения нейросетевого планировщика

В ходе исследования в качестве учителя используется алгоритм D*, который позволяет эффективно перестраивать маршрут. При необходимости, вокруг препятствий могут создаваться области с повышенной опасностью, на которые накла-

дываются штрафы при планировании с использованием алгоритма D*. Например, на рис. 3. представлен пример карты, на которой каждое препятствие окружено зонами, движение в которых штрафует. При этом, при удалении от препятствия значение штрафов уменьшается.

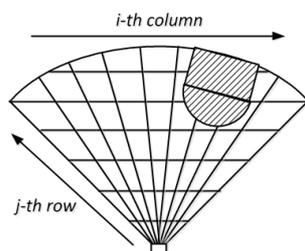


Рис. 2. Представление видимой части карты ячейками

Для нейронной сети карта среды подается в виде цветного изображения. Математически это означает, что на нейронную сеть подаются 3 матрицы, как показано на рис. 4. В первой матрице задаются занятые и свободные для движения ячейки. Вторая матрица содержит текущее положение робота, а третья матрица – целевой положение.

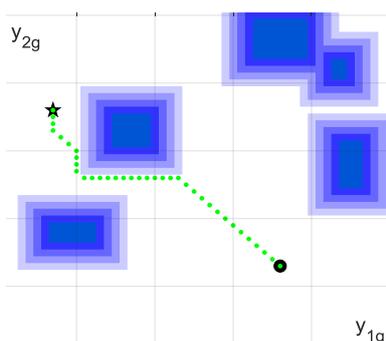


Рис. 3. Представление препятствий с учетом штрафов на движении непосредственно вблизи этих препятствий

Задача обучения нейронной сети классифицировать подаваемое на нее изображение на девять классов, восемь из которых соответствует направлению движения, как показано на рис. 5, а девятый класс соответствует отсутствию пути в целевую точку. При этом направление движения определяется алгоритмом D*.

Возможная вычислительная эффективность при использовании нейронной сети базируется на двух моментах:

- 1) при обучении на нейронную сеть подается карта среды и только текущее направление движения, вычисляемое алгоритмом D*, а не вся траектория движения;
- 2) нейронная сеть, в силу своей структуры хорошо подходит для параллельной обработки, в отличие от итерационных процедур оптимизации, которые требуют последовательных вычислений при попятном движении от целевой точки к начальной точке.

Итерационный метод обучение нейронной сети. Предлагаемый метод обучения нейронной сети базируется на схеме, включающей создание предварительной обучающей выборки и итерационной процедуры создания структуры нейронной сети и финальной обучающей выборки.

Процесс создания предварительной обучающей выборки представлен на рис. 6. Генератор карты создает моделируемую среду в виде матрицы с препятствиями, положением робота и целевой точкой. Карта поступает в алгоритм D*, который определяет класс перемещения в соответствии с секторами, показанными на рис. 5. Карта вместе с заданным классом перемещения поступает в генератор размеченных сцен, который создает изображения, помещаемые в предварительную выборку.

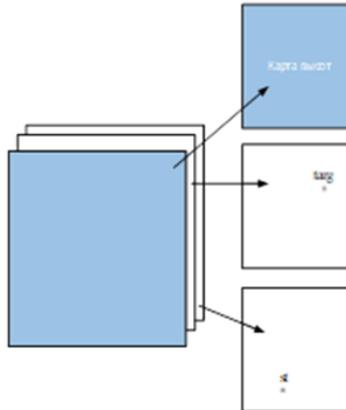


Рис. 4. Представление карты для нейронной сети

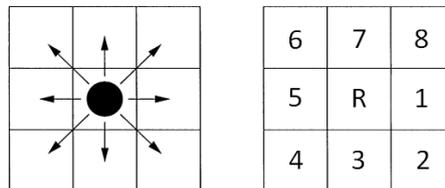


Рис. 5. Классификация среды по направлениям движения

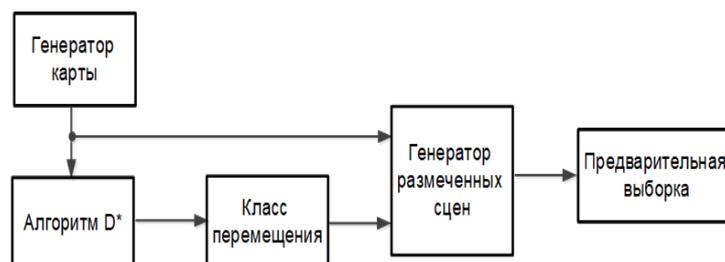


Рис. 6. Процесс создания предварительной выборки

На каждой итерации выбирается часть подвыборки и осуществляется стандартный процесс обучения с учителем, представленный на рис. 7. В ходе обучения из подвыборки, которая является частью предварительной выборки, генерируются примеры для обучения, которые поступают в нейронную сеть. Выход нейронной сети сравнивается с классом, определенным D* и на основании полученной ошибки осуществляется настройка весовых коэффициентов нейронной сети.

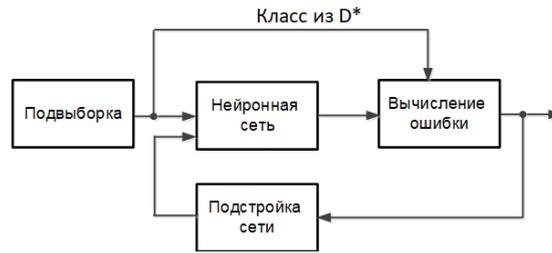


Рис. 7. Процесс обучения нейронной сети

В процессе первой итерации подвыборка формируется из предварительной выборки случайным образом. При этом выбранные для обучения примеры помечаются, чтобы повторно не добавляться в обучающую подвыборку на последующих итерациях. В процессе последующих итераций осуществляется дополнение обучающей подвыборки путем фильтрации с использованием обученной на предыдущей итерации нейронной сети. Данный процесс представлен на рис. 8.

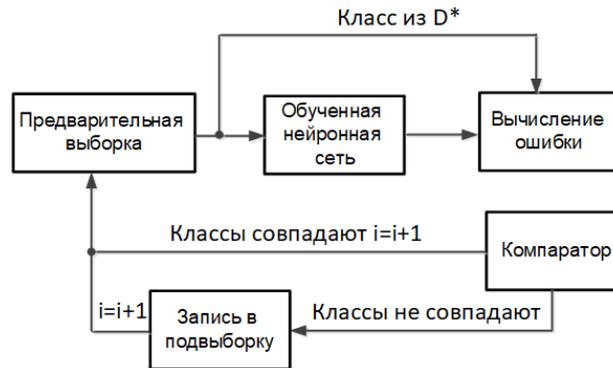


Рис. 8. Процесс фильтрации обучающих примеров

Описанная итерационная процедура обучения описывается следующей последовательностью шагов.

1) На k -й итерации генерируется пример P_{ki} . Рассматривается сеть со структурой NN_k .

2) Каждый пример P_{ki} является помеченным, т. е. для него известно правильное решение, сгенерированное алгоритмом D^* .

3) Если $k > 1$, то пример P_{ki} подается на обученную на предыдущем шаге нейронную сеть NN_{k-1} . Если выход нейронной сети совпадает с решением, сгенерированным алгоритмом D^* , то такой пример не добавляется в обучающую подвыборку. В противном случае пример P_{ki} записывается в обучающую подвыборку.

4) Проводится обучение нейронной сети NN_k в соответствии с процедурой обучения, представленной на рис. 8.

5) Если точность обучения нейронной сети NN_k на шаге k не увеличивается по сравнению с шагом $k-1$, то структура нейронной сети усложняется путем добавления числа слоев, ширины фильтров и пр.

6) Итерации продолжаются до тех пор, пока не достигается требуемая точность обучения.

Данная процедура фильтрации примеров обусловлена тем фактом, что обучающая выборка должна содержать достаточное для обучения нейронной сети число обучающих примеров, которые характеризуют различные ситуации. При

случайном генерировании разные ситуации могут появляться с разной частотой. Например, для среды с заполнением препятствиями 20–40 %, примеры, в которых робот двигается в узких проходах, возникают примерно в 10 раз реже, чем примеры, в которых робот двигается с последовательным обходом одного-двух препятствий. Аналогично дело состоит и при формировании обучающей выборки экспериментальным методом. Поэтому при случайном формировании обучающей выборки она будет содержать большее число часто встречающихся ситуаций, и значительно меньшее число редко встречающихся ситуаций. Однако, для обучения нейронной сети необходимо некоторое достаточное для обучения сети число примеров, характеризующих ситуацию, независимо от того, насколько часто она встречается на практике.

В этой связи накопление редких ситуаций возможно либо за счет их создания при участии оператора, либо за счет значительного увеличения обучающей выборки. Автоматизированное создание образцов для обучения – это сложный, сложный и трудоемкий процесс, особенно при большом разнообразии возможных ситуаций. Он связан с большим объемом не автоматизированной работы. Контроль накопления обучающей выборки также осуществляется вручную. Случайное накопление обучающей выборки приводит к значительному увеличению обучающей выборки.

Рассмотренная на рис. 8, процедура позволяет в автоматическом режиме отобрать те примеры, которые необходимы для достижения заданной точности. Эффект действия описанной процедуры фильтрации представлен на рис. 9, на котором приведена диаграмма распределения примеров в зависимости от расстояния до препятствия для среды, заполненной препятствиями до 30 %, при объеме выборки 45 000 примеров.

Среднеквадратичное отклонение числа ситуаций от среднего значения, равного 9000 для случайной и фильтрованной выборки равны:

$$S_1 = \frac{\sqrt{(3.3-9)^2+(4.5-9)^2+(12.1-9)^2+(15.5-9)^2+(6.4-9)^2+(3.2-9)^2}}{6} = 2,0 \text{ м}, \quad (1)$$

$$S_1 = \frac{\sqrt{(5.4-9)^2+(8.4-9)^2+(9.8-9)^2+(10.1-9)^2+(7.5-9)^2+(3.8-9)^2}}{6} = 1,22 \text{ м}. \quad (2)$$

Из рис. 9 хорошо видно, что фильтрация заметно изменяет распределение примеров в зависимости от расстояния до препятствия.

Аналогичный результат обнаружен и рассмотрении распределения числа примеров, в зависимости от направления движения, как следует из рис. 10.

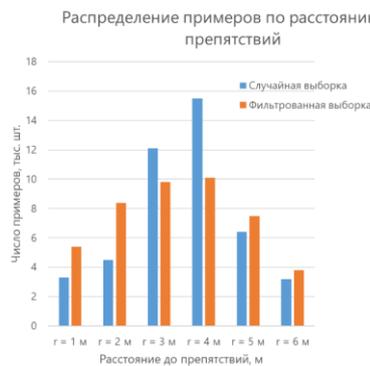


Рис. 9. Влияние фильтрации на распределение обучающих примеров по расстоянию до препятствий

В данном случае такая ситуация объясняется особенностями используемого как учитель планировщика D^* , который в неопределенных ситуациях отдает предпочтение движению по направлениям «Вперед», «Назад», «Влево» и «Вправо» по отношению к движению по диагоналям. Также существенное влияние оказывает тот факт, что ситуации, когда пути в целевую точку не существует, встречаются достаточно редко. Из рис. 10 видим, что включение процедуры фильтрации кратно увеличивает число ситуаций, в которых робот должен двигаться вдоль диагональных направлений. Особенно сильно увеличивается число примеров, в которых нет пути из текущего положения робота в целевую точку. В случайной выборке число таких примеров равно около 200, а в фильтрованной – около 2800.

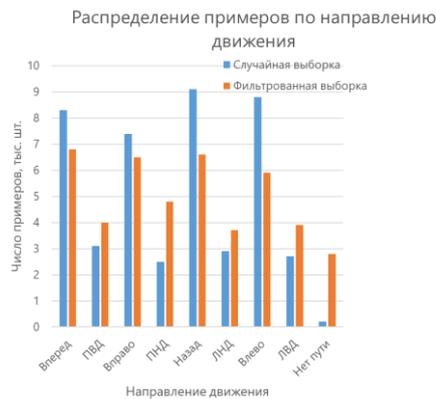


Рис. 10. Влияние фильтрации на распределение обучающих примеров по направлению движения

Таким образом, предложенная итерационная процедура фильтрации обучающей выборки позволяет сформировать обучающие примеры таким образом, чтобы число обучающих примеров, характеризующих различные ситуации, было достаточным. При этом вся процедура проводится автоматически.

Численное исследование. Проведено численное исследование предложенного итерационного алгоритма с использованием комплекса Matlab. В ходе исследования решалась задача обучения нейронной сети планировать маршрут таким же образом, что и алгоритм «учителя», в качестве которого выбран D^* .

Начальный вариант фильтрации выбран таким образом, при возникновении коллизии в фильтруемую выборку подается точка траектории, которая предшествовала коллизии, т.е. в которой нейронная сеть неправильно классифицировала ситуацию. Такой способ фильтрации оказался не эффективным, т.к. неверное решение, которое привело к коллизии, могло быть принято не непосредственно перед коллизией, а ранее. В этой связи процедура фильтрации примеров для обучения была модифицирована таким образом, чтобы при возникновении коллизии в обучающую выборку добавлялись карты с положением робота во всех точках его траектории. Это позволяет существенно повысить успешность достижения цели.

На первой итерации использована нейронная сеть NN1, включающая входной слой, 4 скрытых сверточных слоя с 16 фильтрами и 2 полносвязных слоя, содержащих 16 и 9 нейронов. Полносвязный слой с 9 нейронами является выходным слоем сети. Все скрытые слои применяют функцию активации ReLU, которая обеспечивает наиболее быстрое обучение. На первой итерации использована выборка, состоящая из 1000 изображений для каждого класса (всего 9 000 примеров). В качестве метода обучения используется стохастический градиентный поиск со сглаживанием (sgdm).

Результаты обучения нейронной сети с применением процедуры фильтрации и без нее представлены в табл. 1, в которой представлен объем выборки, оценка точности, полученная непосредственно при обучении и частота успешного (без коллизий) достижения цели, полученная путем моделирования движения робота с нейросетевым планировщиком. При моделировании дополнительно сгенерирована независимая выборка объемом 2000 тестовых ситуаций. При этом, на каждой карте нейронная сеть принимает решение о требуемом направлении движения несколько десятков раз, т. е. всего классифицируются десятки тысяч ситуаций. На первой итерации фильтрация выборки не производилась, поэтому в ней нет разделения точность при обычной и отфильтрованной выборках.

Таблица 1

Результаты обучения при точечном добавлении примеров

Итерация	Объем выборки	Оценка точности, %	Частота успешного достижения %
1	1000	–	–
2	4000, фильтрованная	79	50
	4000, обычная	83	43
3	10000, фильтрованная	84	79
	10000, обычная	88	70
4	12000, фильтрованная	89	85
	12000, обычная	93	75
5	13000, фильтрованная	94	92
	13000, обычная	96	80

Оценка точности работы сети на первой итерации не проводилась. На второй итерации с помощью сети NN1 произведена фильтрация выборки, в которую добавлялись только те ситуации, в которых возникали коллизии. При объеме созданной выборки равен 36 000 примеров, по 9 000 примеров для каждого класса. При этом получено, что оценка точности для нейронной сети, обученной с использованием процедуры фильтрации, составила 79 %. Для сравнения, оценка точности, полученная при обучении нейронной сети с той же структурой, составила 83 %. Однако при моделировании движения выяснилось, что частота успешного достижения цели для нейронной сети, обученной с использованием фильтрации, составляет 50 %, а для нейронной сети, обученной без фильтрации выборки – 43 %. Этот факт объясняется тем, что при оценке точности стандартными средствами обучения в Matlab используется часть обучающей выборки. Так как обучающие выборки в двух описанных случаях разные по сложности, то сравнивать их друг с другом не корректно. Именно для этого в качестве критерия успешности использована частота достижения цели без коллизий. При этом для проверки успешности обучения сетей использована специальная тестовая выборка, которая отличается от случайной тем, что в ней отсутствуют примеры, в которых между начальным положением робота и целью нет ни одного препятствия. Отсутствие таких ситуаций в обучающей выборке обусловлено тем, что в них не нужна нейронная сеть.

Типовой результат моделирования при планировании маршрута с использованием нейронной сети NN1 представлен на рис. 11, на котором зелеными точками показан маршрут, проложенный D*, черными точками – маршрут, проложенный нейронной сетью NN1, а сплошной линией – траектория движения робота. Из рис. 11 видим, что имеются коллизии.

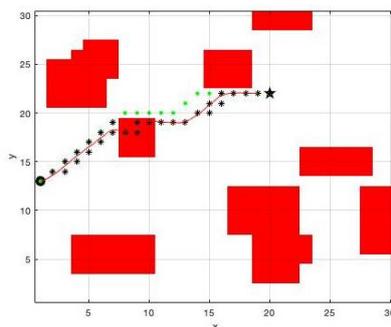


Рис. 11. Планирование маршрута нейронной сетью NN1

На третьей итерации обучается нейронная сеть NN2, которая включает входной слой, 5 сверточных слоев с 32 фильтрами и 3 полносвязных выходных слоя, содержащих 32, 16 и 9 нейронов. Объем выборки составил 90000 примеров – по 10000 примеров для каждого класса. Частота достижения целевой точки без коллизии составила 79 % для нейронной сети, обученной на отфильтрованной базе, и 70 % – для той же нейронной сети, но обученной на обычной выборке.

Результаты моделирования обученной сети NN2 представлены на рис. 12 из которого видно, что коллизии отсутствуют, однако имеются небольшие отклонения от оптимальной траектории, что приводит к увеличению ее длины.

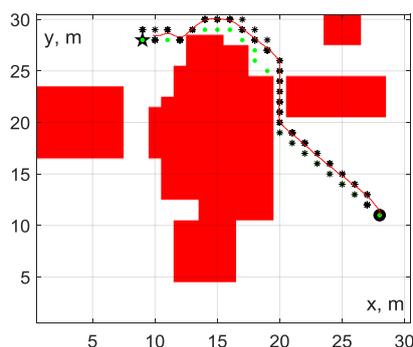


Рис. 12. Планирование маршрута нейронной сетью NN2

На четвертой итерации нейронная сеть NN2 использована для отбора примеров обучающей выборки. Обучаемая сеть NN3 включает входной слой, 9 скрытых сверточных слоев с 40 фильтрами и 3 полносвязных выходных слоя, содержащих 32, 16 и 8 нейронов. Частота достижения целевой точки без коллизии составила 85 % для нейронной сети, обученной на отфильтрованной базе, и 75 % – для той же нейронной сети, но обученной на обычной выборке.

На пятой итерации нейронная сеть NN3 использована для фильтрации обучающей выборки. Обучается сеть NN4, которая включает входной слой, 10 скрытых сверточных слоев с 40 фильтрами и 3 полносвязных выходных слоя, содержащих 32, 16 и 8 нейронов. Частота достижения целевой точки без коллизии составила 92 % для нейронной сети, обученной на отфильтрованной базе, и 80 % – для той же нейронной сети, но обученной на обычной выборке.

На рис. 13 представлен процесс обучения нейронной сети при числе эпох обучения 16 и параметре MinBatchSize=128.

Таким образом, из табл. 1 видно преимущество применения фильтрации при формировании обучающей выборки, которое заключается в повышении точности принятия решений на основе нейронной сети. При этом вычислительная сложность нейронной сети не увеличивается, т.к. изменяется только содержание обучающей выборки. Полученная в результате разница в точности составила 12 %.

На рис. 14 представлены результаты моделирования обученной нейронной сети NN4 в процессе планирования пути робота к целевой точке. Видно, что нейронная сеть планирует маршрут без коллизий и достаточно близко к D^* . При этом отличия в траекториях не приводят к увеличению длины планируемого пути.



Рис. 13. Процесс обучения нейронной сети

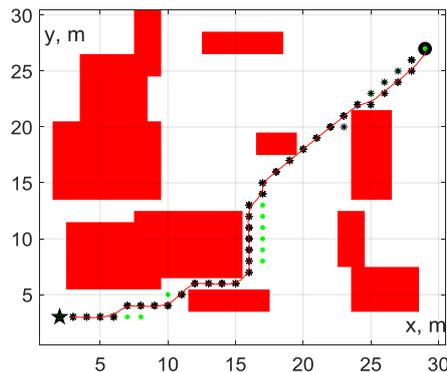


Рис. 14. Планирование маршрута нейронной сетью NN4

Отметим, что при отсутствии фильтрации частота успешного достижения целевой точки 92 % достигается нейронной сетью NN4 при объеме обучающей выборки 25000 примеров для каждого класса, т.е. снижение размера обучающей выборки составляет более чем в 2 раза.

Также было проведено сравнение времени расчета траектории движения с помощью нейронной сети и алгоритма D^* . При этом использовался стандартный персональный компьютер с процессором Intel Core 2,9 ГГц с оперативной памятью 8 Гбайт. При использовании карты проходимости получено среднее время расчета траектории 0,025 с для нейронной сети и 0,33 с для алгоритма D^* . Отметим, что данное преимущество получено без использования параллельных вычислений, которые имеют высокую эффективность в случае нейронных сетей.

Заключение. В данной статье предложен метод планирования траектории робота, отличающийся использованием нейронной сети, вырабатывающей текущее направление движения. В результате обучения нейронной сети она повторяет траек-

торию, формируемую алгоритмов D , но без непосредственного расчета всей траектории движения. Как показали численные исследования, метод позволяет сократить время планирования по сравнению с D^* , в среднем на 30 % для рассмотренной среды. Этот эффект достигается в неопределенных и динамических средах.

Также в данной работе предложен новый метод итерационного обучения нейронной сети. Данный метод позволяет на каждой последующей итерации отображать только те ситуации, в которых нейронная принимает неверные решения. Предложенный метод позволяет уменьшить объем обучающей выборки до 40 %, а также сократить время создания обучающей выборки за счет высокой степени автоматизации.

Acknowledges. Research is supported by Russian Science Foundation (grant 16-19-00001), and was executed in Southern Federal University.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Madan M. Gupta, Liang Jin, Noriyasu Homma.* Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory // John Wiley & Sons. – New Jersey, 2003.
2. *LeCun Ya., Yoshua B., and Geoffrey H.* Deep learning // Nature. – 2015. – Vol. 521.7553. – P. 436-444.
3. *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.
4. *Geng M., Xu K., Zhou X., Ding B., Wang H., Zhang L.* Learning to cooperate via an attention-based communication neural network in decentralized multi-robot exploration // Entropy. – 2019. – Vol. 21 (3).
5. *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.
6. *Price E., Lawless G., Ludwig R., Martinovic I., Bulthoff H.H., Black M.J., Ahmad A.* Deep Neural Network-Based Cooperative Visual Tracking Through Multiple Micro Aerial Vehicles // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2018. – Vol. 3 (4). – P. 3193-3200.
7. *Martínez-García E.A., Torres-Córdoba R., Carrillo-Saucedo V.M., López-González E.* Neural control and coordination of decentralized transportation robots // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2018. – Vol. 232 (5). – P. 519-540.
8. *Wang Y., Cheng L., Hou Z.-G., Yu J., Tan M.* Optimal Formation of Multirobot Systems Based on a Recurrent Neural Network // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2016. – Vol. 27 (2). – P. 322-333.
9. *Pshikhopov V., Medvedev M., Vasileva M.* Neural network control system of motion of the robot in the environment with obstacles // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11606. – P. 173-181.
10. *Janglova D.* Neural networks in mobile robot motion // Int J Adv Robot Syst. – 2004. – No. 1. – P. 15-22.
11. *Li Q.L., Song Y., Hou Z.G.* Neural network based Fast SLAM for automobile robots in unknown environments // Neurocomputing. – 2015. – Vol. 165. – P. 99-110.
12. *Na Y.K., Oh S.Y.* Hybrid control for autonomous mobile robot navigation using neural network based behavior modules and environment classification // Aut Robots. – 2003. – Vol. 15. – P. 193-206.
13. *Pothal J.K., Parhi D.R.* Navigation of multiple robots in a highly clutter terrains using adaptive neuro-fuzzy inference system // Robotics and Automation. – 2015. – Vol. 72. – P. 48-58.
14. *Abu Baker A.* A novel mobile robot navigation system using neuro-fuzzy rule-based optimization technique // Res J Appl Sci Eng Technol. – 2012. – Vol. 4 (15). – P. 2577-2583.
15. *Qiao J., Fan R., Han H., Ruan X.* Q-learning based on dynamical structures neural network for robot navigation in unknown environment // Advances in Neural Network. – 2009. – Vol. 553. – P. 188-196.
16. *Medvedev M., Kadhim A., Brosalin D.* Development of the Neural-Based Navigation System for a Ground-Based Mobile Robot // 2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, ICMRE 2021. – 2021. – P. 35-40, 9384825.

17. Medvedev M., Pshikhopov V. Path Planning of Mobile Robot Group Based on Neural Networks // *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. – 2020. – P. 51-62.
18. Гайдук А.П., Мартьянов О.В., Медведев М.Ю., Пишхопов В.Х., Хамдан Н., Фархунд А. Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. – Т. 21 (8). – С. 470-479.
19. Pal P.K., Kar A. Sonar-based mobile robot navigation through supervised learning on a neural net // *Aut Robots*. – 1996. – No. 3. – P. 355-734.
20. Medina-Santiago A., Campus-Anzueto J.L., Vazquez-Feijoo J.A., Hernandez-de Leon H.R., Mota-Grajales R. Neural control systems in obstacle avoidance in mobile robots using ultrasonic sensors // *J Appl Res Technol*. – 2014. – No. 2. – P. 104-110.
21. Syed U.A., Kunwar F., Iqbal M. Guided autowave pulse coupled neural network (GAPCNN) based real time path planning and an obstacle avoidance scheme for mobile robots // *Robot Autonom Syst*. – 2014. – Vol. 62. – P. 474-486.
22. Sun C., He W., Ge W., Chang C. Adaptive neural network control of biped robots // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. – 2017. – Vol. 47 (2). – P. 315-326.
23. Sun C., He W., Hong J. Neural network control of a flexible robotic manipulator using the lumped spring-mass model // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. – 2018. – Vol. 47 (8). – P. 1863-1874.
24. Zhu D., Tian C., Sun B., Luo C. Complete coverage path planning of autonomous underwater vehicle based on GBNN algorithm // *J Intell Robot Syst*. – 2018. – P. 1-13.
25. Zhang C., Hu H., Wang J. An adaptive neural network approach to the tracking control of micro aerial vehicles in constrained space // *Int J Syst Sci*. – 2017. – Vol. 48 (1). – P. 84-94.
26. Николенко С., Кадурич А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. – СПб.: Изд-во Питер, 2018.
27. Hyansu B., Gidong K., Jonguk K., Dianwei Q., Sukgyu L. Multi-Robot Path Planning Method Using Reinforcement Learning // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9 (15). – P. 30-57.
28. Визильтер Ю.В., Вишняков Б.В., Выголов О.В., Горбацевич В.С., Князь В.А. Технологии интеллектуальной обработки информации для задач навигации и управления беспилотными летательными аппаратами // *Тр. СПИИРАН*. – 2016. – Т. 45. – С. 26-44.
29. Redmon J., Divvala S., Farhadi A. You Only Look Once, Unified, Real-Time Object Detection // *Computer Vision Pattern Recognition*. – 2015.
30. Белоруцкий Р.Ю., Житник С.В. Распознавание речи на основе сверточных нейронных сетей // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2019. – № 4. – С. 47-52.

REFERENCES

1. Madan M. Gupta, Liang Jin, Noriyasu Homma. Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory, *John Wiley & Sons*. New Jersey, 2003.
2. LeCun Ya., Yoshua B., and Geoffrey H. Deep learning, *Nature*, 2015, Vol. 521.7553, pp. 436-444.
3. 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.
4. Geng M., Xu K., Zhou X., Ding B., Wang H., Zhang L. Learning to cooperate via an attention-based communication neural network in decentralized multi-robot exploration, *Entropy*, 2019, Vol. 21 (3).
5. 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.
6. Price E., Lawless G., Ludwig R., Martinovic I., Bulthoff H.H., Black M.J., Ahmad A. Deep Neural Network-Based Cooperative Visual Tracking Through Multiple Micro Aerial Vehicles, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, Vol. 3 (4), pp. 3193-3200.
7. Martínez-García E.A., Torres-Córdoba R., Carrillo-Saucedo V.M., López-González E. Neural control and coordination of decentralized transportation robots, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2018, Vol. 232 (5), pp. 519-540.
8. Wang Y., Cheng L., Hou Z.-G., Yu J., Tan M. Optimal Formation of Multirobot Systems Based on a Recurrent Neural Network, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, Vol. 27 (2), pp. 322-333.
9. Pshikhopov V., Medvedev M., Vasileva M. Neural network control system of motion of the robot in the environment with obstacles, *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, Vol. 11606, pp. 173-181.
10. Janglova D. Neural networks in mobile robot motion, *Int J Adv Robot Syst*, 2004, No. 1, pp. 15-22.

11. Li Q.L., Song Y., Hou Z.G. Neural network based Fast SLAM for automobile robots in unknown environments, *Neurocomputing*, 2015, Vol. 165, pp. 99-110.
12. Na Y.K., Oh S.Y. Hybrid control for autonomous mobile robot navigation using neural network based behavior modules and environment classification, *Aut Robots*, 2003, Vol. 15, pp. 193-206.
13. Pothal J.K., Parhi D.R. Navigation of multiple robots in a highly clutter terrains using adaptive neuro-fuzzy inference system, *Robotics and Automation*, 2015, Vol. 72, pp. 48-58.
14. Abu Baker A. A novel mobile robot navigation system using neuro-fuzzy rule-based optimization technique, *Res J Appl Sci Eng Technol.*, 2012, Vol. 4 (15), pp. 2577-2583.
15. Qiao J., Fan R., Han H., Ruan X. Q-learning based on dynamical structures neural network for robot navigation in unknown environment, *Advances in Neural Network*, 2009, Vol. 553, pp. 188-196.
16. Medvedev M., Kadhim A., Brosalin D. Development of the Neural-Based Navigation System for a Ground-Based Mobile Robot, *2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, ICMRE 2021*, 2021, pp. 35-40, 9384825.
17. Medvedev M., Pshikhopov V. Path Planning of Mobile Robot Group Based on Neural Networks, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2020, pp. 51-62.
18. Gayduk A.R., Mart'yanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Khamdan N., Farkhud A. Neyrosetevaya sistema upravleniya gruppoy robotov v neopredelennoy dvumernoy srede [Neural network control system for a group of robots in an indefinite two-dimensional environment], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, management], 2020, Vol. 21 (8), pp. 470-479.
19. Pal P.K., Kar A. Sonar-based mobile robot navigation through supervised learning on a neural net, *Aut Robots*, 1996, No. 3, pp. 355-734.
20. Medina-Santiago A., Campus-Anzueto J.L., Vazquez-Feijoo J.A., Hernandez-de- Leon H.R., Mota-Grajales R. Neural control systems in obstacle avoidance in mobile robots using ultrasonic sensors, *J Appl Res Technol.*, 2014, No. 2, pp. 104-110.
21. Syed U.A., Kunwar F., Iqbal M. Guided autowave pulse coupled neural network (GAPCNN) based real time path planning and an obstacle avoidance scheme for mobile robots, *Robot Autonom Syst.*, 2014, Vol. 62, pp. 474-486.
22. Sun C., He W., Ge W., Chang C. Adaptive neural network control of biped robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, Vol. 47 (2), pp. 315-326.
23. Sun C., He W., Hong J. Neural network control of a flexible robotic manipulator using the lumped spring-mass model, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, Vol. 47 (8), pp. 1863-1874.
24. Zhu D., Tian C., Sun B., Luo C. Complete coverage path planning of autonomous underwater vehicle based on GBNN algorithm, *J Intell Robot Syst.*, 2018, pp. 1-13.
25. Zhang C., Hu H., Wang J. An adaptive neural network approach to the tracking control of micro aerial vehicles in constrained space, *Int J Syst Sci.*, 2017, Vol. 48 (1), pp. 84-94.
26. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neyronnykh setey [Deep learning. Immersion in the world of neural networks]. Saint Petersburg: Izd-vo Piter, 2018.
27. Hyansu B., Gidong K., Jonguk K., Dianwei Q., Sukgyu L. Multi-Robot Path Planning Method Using Reinforcement Learning, *Applied Sciences*, 2019, Vol. 9 (15), pp. 30-57.
28. Vizil'ter Yu.V., Vishnyakov B.V., Vygolov O.V., Gorbatshevich V.S., Knyaz' V.A. Tekhnologii intellektual'noy obrabotki informatsii dlya zadach navigatsii i upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Intelligent information processing technologies for navigation and control of unmanned aerial vehicles], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAN], 2016, Vol. 45, pp. 26-44.
29. Redmon J., Divvala S., Farhadi A. You Only Look Once, Unified, Real-Time Object Detection, *Computer Vision Pattern Recognition*, 2015.
30. Belorutskiy R.Yu., Zhitnik S.V. Raspoznavanie rechi na osnove svertochnykh neyronnykh setey [Speech recognition based on convolutional neural networks], *Voprosy radioelektroniki* [Radio electronics issues], 2019, No. 4, pp. 47-52.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

Фархуд Азхар Кадим – Южный федеральный университет; e-mail: farhud@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89613176539; аспирант.

Azhar Kadhim Farhood – Southern Federal University; e-mail: azhar.kadhum@stu.edu.iq; Taganrog, Russia; phone: +79613176539; postgraduate student.

Е.Е. Полупанова, П.Е. Усов**ЭВРИСТИЧЕСКИЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ
ДИОФАНТОВЫХ УРАВНЕНИЙ**

Рассматривается задача решения диофантовых уравнений, которая может применяться в криптографии и криптоанализе. Кратко излагается описание генетического алгоритма решения диофантовых уравнений. Определяется правило вычисления значения целевой функции для хромосомы, описывается система кодирования в генетическом алгоритме. Упоминаются генетические операторы, используемые в алгоритме, определяются условия их выполнения. Описывается критерий останова генетического алгоритма. Анализируется один из недостатков генетического алгоритма – попытки решения любого диофантова уравнения, в том числе и такого, которое заведомо не имеет решений. Предлагается способ, позволяющий устранить этот недостаток в некоторых случаях, и, основанный на теории чисел. Дается пояснение, в каких случаях этот способ будет работать. Перед описанием этого способа дается определение вычета и невычета заданной степени по заданному модулю. После описания этого способа подробно описывается программная реализация алгоритма решения диофантовых уравнений и их систем. Затем приводятся результаты экспериментальных исследований времени и качества работы генетического алгоритма. Затем представляется результат работы алгоритма для уравнения, которое заведомо не имеет решений, и для системы уравнений, которая также заведомо не имеет решений, но в которой общее число неизвестных слишком велико для работы предлагаемого метода. Сравнивается время работы алгоритма при решении уравнения и при решении системы уравнений. Делается вывод о полезности применения предложенного способа при решении диофантовых уравнений и систем диофантовых уравнений.

Эвристика; генетический алгоритм; диофантово уравнение; вычет степени n по модулю m ; невычет степени n по модулю m .

E.E. Polupanova, P.E. Usov**HEURISTIC GENETIC ALGORITHM FOR DIOPHANTINE EQUATIONS
SOLVING**

The problem of diophantine equations solving is considered in this article. This problem can be applied in cryptography and cryptanalysis. The description of the genetic algorithm solving diophantine equations is stated briefly in the article. The rule of calculation the value of fitness function of chromosome is determined, the coding system in the genetic algorithm is described. The genetic operators used in the algorithm are mentioned and the conditions for their execution are determined. The criterion for stopping the genetic algorithm is described. One of the shortcomings of the genetic algorithm is analyzed. The shortcoming of the algorithm lies in its attempts to solve any diophantine equation, including one that has no solutions. A method eliminating this shortcoming in some cases is proposed. This method is based on number theory. An explanation is given in which cases this method will be used. The definition of residue and nonresidue of fixed power for fixed modulus is given before describing this method. After describing this method the implementation of the algorithm for solving diophantine equations and systems of them is described in detail. Then the results of experimental studies of the time and quality of the genetic algorithm are presented. Then the result of the algorithm is presented for an equation that has no solutions and for a system of equations that also has no solutions, but in which the total number of unknowns is too large for the proposed method to work. The algorithm running time is compared when solving an equation and when solving a system of equations. The conclusion is made about the usefulness of the proposed method in solving diophantine equations and systems of diophantine equations.

Heuristics; genetic algorithm; diophantine equation; residue of power n for modulus m ; nonresidue of power n for modulus m .

Постановка задачи решения диофантова уравнения. Диофантовым уравнением (ДУ) называется уравнение вида (1) [12, с. 7; 8; 9, 14].

$$D(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad (1)$$

где D – полином с целыми коэффициентами.

Задача решения ДУ хорошо известна и может применяться, например, при криптоанализе систем защиты информации, содержащих диофантовы трудности [15].

Решение ДУ состоит в нахождении всех наборов из n чисел x_1, x_2, \dots, x_n , при которых верна формула (1). Не существует универсального алгоритма решения в целых числах произвольного ДУ. Это следует из DPRM-теоремы [10, с. 46].

Решение диофантовых уравнений генетическим алгоритмом. Разработанный генетический алгоритм [1, 2, 3] состоит из последовательности шагов:

случайная генерация первого поколения хромосом [4, 7, 11];

1) применение последовательности односточечных операторов мутации;

2) формирование второго поколения хромосом путём попарного скрещивания хромосом первого поколения;

3) формирование третьего и всех последующих поколений путём попарного скрещивания первых $n1$ хромосом предыдущего поколения;

4) проверка критериев останова алгоритма.

Рассмотрим данную последовательность шагов подробнее.

Гены [13, 17, 20] хромосомы первого поколения являются случайными целыми числами из отрезка $[-10; 10]$. Генов в каждой хромосоме каждого поколения столько, сколько неизвестных в уравнении. Одно неизвестное кодируется одним геном. Генерируется всего $n1$ хромосом в первом поколении. Параметр $n1$ задаётся пользователем.

После генерации хромосом первого поколения над ними производится до трёх односточечных операторов мутации. Для этого вначале для каждой хромосомы вычисляется значение целевой функции. Целевая функция имеет вид $D(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где $D(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ – решаемое ДУ. Если значение целевой функции для данной хромосомы не равно нулю, то над ней выполняется первый оператор мутации. Он заключается в изменении значения случайно выбранного гена на случайное целое число из отрезка $[-1000; 1000]$. Если после первой мутации значение целевой функции для этой хромосомы не стало равным нулю, то над ней выполняется второй оператор мутации. Он заключается в изменении значения случайно выбранного гена на случайное целое число из отрезка $[med]; [sr]$, если $[med] < [sr]$, и из отрезка $[sr]; [med]$ в противном случае, где med – медиана набора всех чисел, фигурирующих в уравнении, sr – среднее арифметическое чисел в этом наборе, $[x]$ – целая часть числа x . Если и после второй мутации значение целевой функции для хромосомы не стало равным нулю, то над хромосомой выполняется третья мутация. Она заключается в изменении значения случайно выбранного гена на целое число из отрезка $[-5; 5]$. Далее хромосомы первого поколения с нулевым значением целевой функции добавляются во множество решений ДУ.

Хромосомы второго поколения получают из хромосом первого поколения путём попарного скрещивания последних. Таким образом, во втором поколении генерируется $\frac{n1*(n1-1)}{2}$ хромосом. При скрещивании применяется односточечный оператор кроссинговера. После генерации хромосом второго поколения они подвергаются операторам мутации по тому же правилу, что и хромосомы первого поколения. Хромосомы с нулевым значением целевой функции попадают во множество решений ДУ.

Каждое поколение получается путём попарного скрещивания первых $n1$ хромосом предыдущего поколения. При скрещивании применяется одноточечный оператор кроссинговера. После генерации над каждой хромосомой очередного поколения выполняются мутации по тому же правилу, что и в первом поколении. Хромосомы с нулевым значением целевой функции попадают во множество решений уравнения. Генерируется всего max_gen поколений. Параметр max_gen задаётся пользователем. Алгоритм может завершиться досрочно, если на очередной итерации не нашлось новых решений, но до этого нашлось хотя бы одно решение.

Способ упрощения решения ДУ. Недостаток разработанного генетического алгоритма в том, что он пытается решать любые диофантовы уравнения, в том числе и те, которые заведомо не имеют корней. В связи с этим был реализован способ упрощения задачи решения ДУ, основанный на свойствах степеней целых чисел.

Целое число a называется квадратичным вычетом по модулю m , если существует целое число x такое, что число x^2 при делении на m даёт в остатке a [16, с. 302, 6, 18, 19]. В противном случае число a называется квадратичным невычетом по модулю m [16, с. 302]. Аналогично можно определить вычет степени n по модулю m и невычет степени n по модулю m . Из этого определения следует, что квадратичными вычетами по модулю 9 являются числа 0, 1, 4 и 7, вычетами степени 3 по модулю 9 являются числа 0, 1 и 8, вычетами степени 4 по модулю 9 являются числа 0, 1, 4 и 7, вычетами степени 5 по модулю 9 являются числа 0, 1, 2, 4, 5, 7 и 8, вычетами степени 6 по модулю 9 являются числа 0 и 1, вычетами степени 7 по модулю 9 являются числа 0, 1, 2, 4, 5, 7 и 8. Видно, что вычетов степени 2, 3, 4 и 6 по модулю 9 меньше, чем невычетов этих степеней по модулю 9. В связи с вышеизложенным, реализованный способ упрощения решения ДУ вида (1) состоит в том, что перед запуском генетического алгоритма программа определяет, какие остатки при делении на 9 может давать полином $D(x_1, \dots, x_n)$. Определение всех возможных остатков при делении на 9 у полинома $D(x_1, \dots, x_n)$ выполняется методом полного перебора всех возможных вариантов остатков при делении на 9 у переменных x_1, \dots, x_n . Таким образом, программа перебирает всего 9^n вариантов для уравнения вида (1). Этот перебор выполняется только в том случае, если в уравнении не более шести неизвестных. В противном случае перебор не выполняется, и программа сразу запускает генетический алгоритм.

Программная реализация алгоритма решения диофантовых уравнений и их систем. Программа разработана в среде PyCharm и представляет собой сценарий на языке Python версии 3.7. При запуске сценарий создаёт окно с пользовательским интерфейсом. Вид окна представлен на рис. 1.



Рис. 1. Интерфейс программы

Для запуска генетического алгоритма пользователю необходимо ввести диофантово уравнение или систему в первое поле сверху в окне на рис. 1. Во второе поле сверху необходимо ввести число хромосом в первом поколении $n1$ – натуральное число. В третье поле сверху необходимо ввести максимальное число поколений max_gen – натуральное число. Требуется, чтобы каждое вводимое диофантово уравнение имело вид (2), а уравнения в системе разделялись запятой.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = g(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

где $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – полином произвольной степени с целыми коэффициентами; $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – полином произвольной степени с целыми коэффициентами.

Программа сама приводит каждое введённое диофантово уравнение к виду (1). При вводе уравнения или системы допускается, чтобы неизвестные состояли из латинских букв (строчных или прописных), цифр и знаков подчёркивания и содержали любое конечное число символов. При этом требуется, чтобы первым символом каждого неизвестного была латинская буква или знак подчёркивания. Также требуется, чтобы общее число неизвестных в уравнении или системе было не меньше двух. Числовые константы в уравнении должны быть целыми. В уравнениях также допускается использовать круглые скобки.

После ввода уравнения или системы пользователю нужно нажать кнопку «Готово», чтобы запустить генетический алгоритм. Перед решением уравнения или системы уравнений с помощью генетического алгоритма программа проверяет правильность ввода. Для этого проводится лексический анализ каждого введённого уравнения. Если он прошёл успешно, то программа проверяет наличие ровно одного знака равенства в каждом уравнении, иначе сообщает об ошибке. Если в каждом уравнении есть ровно один знак равенства, то программа проверяет наличие непустой левой и непустой правой частей в каждом уравнении, иначе сообщает об ошибке. Если в каждом уравнении есть непустая левая и непустая правая части, то программа преобразует каждое уравнение к виду (1). После этого программа составляет сумму квадратов левых частей полученных уравнений вида (1) и приравнивает её к нулю.

Далее полученное таким образом диофантово уравнение решается генетическим алгоритмом. Однако ГА запускается не во всех случаях. Если общее число неизвестных в уравнении или системе не больше шести, то программа переводит в обратную польскую нотацию левые части полученных уравнений вида (1) и по полученной обратной польской записи вычисляет множества остатков при делении на 9 значений левых частей уравнений. Если хотя бы в одном множестве нет значения 0, то вся система не имеет решений, о чём программа сообщает, даже не запуская генетический алгоритм. В противном случае программа запускает генетический алгоритм, предварительно проверив правильность ввода его параметров. Если же общее число неизвестных в уравнении или системе больше шести, то программа сразу запускает генетический алгоритм, предварительно проверив правильность ввода его параметров.

Результат работы программы (список решений уравнения или системы, либо утверждение, что решений нет, либо утверждение, что не удалось найти решения) выводится на экран в поле под кнопкой «Готово» (рис. 1).

Экспериментальные исследования. Были проведены экспериментальные исследования времени и качества работы генетического алгоритма. Под качеством работы алгоритма понимается статистическая вероятность нахождения алгоритмом хотя бы одного решения заданного диофантова уравнения или системы диофантовых уравнений. На рис. 2 представлен график зависимости качества работы алгоритма от числа хромосом в первом поколении при $max_gen=400$, где

max_gen – максимальное число генерируемых поколений. В качестве линейного уравнения использовалось уравнение $32 * x + 45 * y = 779$, квадратного – $x^2 + y^2 = z * (x + y)$, кубического – $x^3 = y^2 + z$, уравнения четвёртой степени – $9 * x^4 + 7 * y = 16$, пятой степени – $x^5 + 13 * y = 14$, шестой степени – $x^6 + y = 65$.

По рис. 2 видно, что все уравнения, кроме линейного, решаются в среднем во всех случаях при $n1 = 25, 30, 35, 40, 45, 50$. Это может быть связано с тем, что в линейном уравнении фигурируют самые большие по модулю числа. В пользу этого может говорить тот факт, что, например, линейное уравнение $10 * x + 7 * y = 19$, а также уравнения $10 * x^2 + 7 * y = 19$, $10 * x * y * z + 7 * t = 17$ решаются в среднем в 100 процентах случаев при $n1 = 25, 30, 35, 40, 45, 50$. Шаг изменения параметра $n1$ был выбран равным пяти, так как этого было достаточно для исследования. Чем меньше значение $n1$, тем меньше хромосом алгоритм перебирает и тем меньше времени он работает. Поэтому оптимальное значение $n1$ равно 45 – наименьшему из исследуемых значений, при котором все рассматриваемые уравнения решались в среднем во всех случаях.

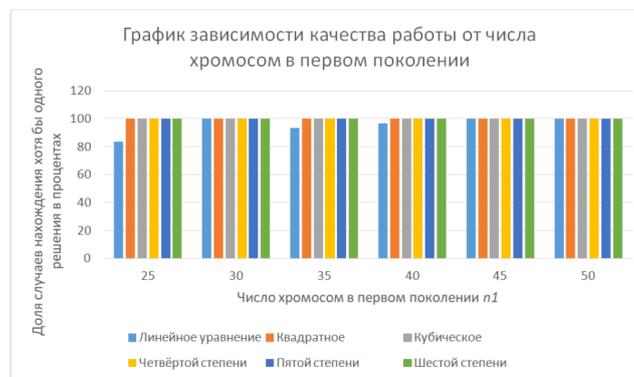


Рис. 2. График зависимости качества работы алгоритма от числа хромосом в первом поколении

Оптимальное значение параметра max_gen (максимально возможное число поколений) по результатам экспериментальных исследований составило 300. В этих исследованиях значение параметра $n1$ было принято равным 45 и в качестве линейного уравнения использовалось уравнение $10 * x + 7 * y = 19$, квадратного – $10 * x^2 + 7 * y = 19$, кубического – $10 * x * y * z + 7 * t = 17$, уравнения четвёртой степени – $9 * x^4 + 7 * y = 16$, пятой степени – $x^5 + 13 * y = 14$, шестой степени – $x^6 + y = 65$. Все уравнения, кроме линейного, решались в среднем в 100 процентах случаев при $max_gen=250, 300, 350, 400$. Шаг изменения значения параметра max_gen был выбран равным 50, так как этого было достаточно для исследования. Время работы алгоритма прямо пропорционально максимально возможному числу поколений, а 300 оказалось наименьшим из исследуемых значений, при котором все рассматриваемые уравнения решались в среднем во всех случаях. Время выполнения алгоритма при $n1 = 45, max_gen=300$ при решении вышеуказанных шести уравнений было не более 1 секунды. Было также экспериментально установлено, что имеется квадратичная зависимость между временной сложностью алгоритма и общим числом генерируемых хромосом.

Кроме того, было экспериментально установлено, что предложенный способ упрощения решения диофантовых уравнений позволяет в ряде случаев сократить время работы программы. Например, на рис. 3 представлен результат работы про-

граммы для уравнения $x^3 + y^3 + z^3 = 4$. Это уравнение содержит три неизвестных, поэтому программа сначала определит, какие остатки при делении на 9 может давать значение полинома $x^3 + y^3 + z^3 - 4$. Также это уравнение не имеет целочисленных решений, так как сумма трёх кубов не может при делении на 9 давать в остатке 4 или 5. На рис. 4 представлен результат работы программы для системы уравнений, состоящей из ДУ $x^3 + y^3 + z^3 = 4$, $t^3 + u^3 + v^3 = 5$ и $v^2 + w^2 = 3$. В этой системе в общей сложности больше шести неизвестных, поэтому программа сразу запустит генетический алгоритм. Также эта система не имеет решений, так как не имеют решений первое и второе уравнение этой системы.

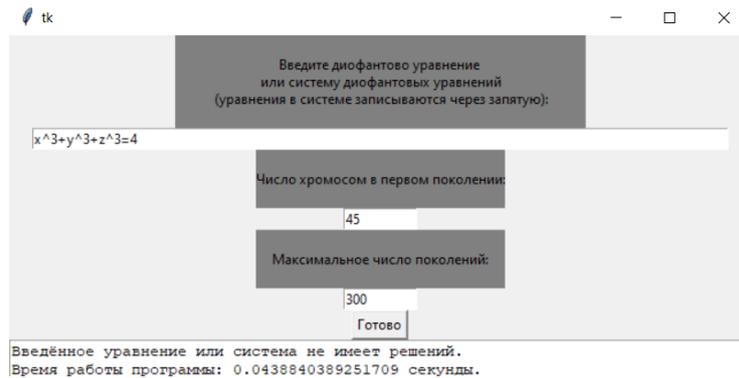


Рис. 3. Результат работы программы для уравнения

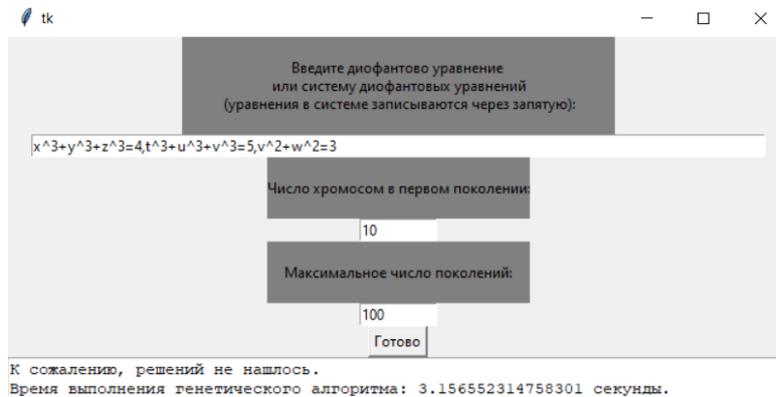


Рис. 4. Результат работы программы для системы уравнений

По рис. 3 и 4 видно, что в случае предварительного определения возможных остатков при делении на 9 значений полинома $x^3 + y^3 + z^3 - 4$ программа работает быстрее приблизительно на 3.11 секунды, чем без такого определения даже с меньшими значениями параметров генетического алгоритма, которые прямо пропорциональны времени работы алгоритма.

На рис. 5 представлен график зависимости времени работы алгоритма от числа хромосом. Можно сделать вывод, что разработанный ГА обладает квадратичной временной сложностью.

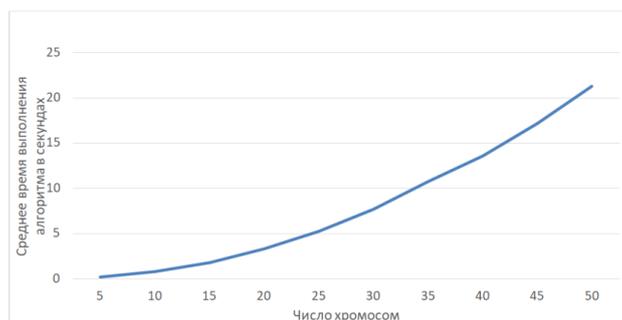


Рис 5. График зависимости времени работы алгоритма от числа хромосом в первом поколении

Проведённые экспериментальные исследования показали, что время и качество работы генетического алгоритма зависят от числа хромосом в первом поколении, максимального числа генерируемых поколений, а также от корней уравнения.

Заключение. В данной статье был предложен ГА решения ДУ, адаптированный для решения систем ДУ. Также был программно реализован способ, упрощающий в ряде случаев решение ДУ путём определения некоторых уравнений, заведомо не имеющих решений. В результате экспериментальных исследований выяснилось, что этот способ может уменьшить время работы программы. Также выяснилось, что имеется квадратичная зависимость между временной сложностью алгоритма и общим числом генерируемых хромосом. Также были определены оптимальные значения параметров генетического алгоритма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдулджаббар И.А., Абдулла С.М. Эволюционный алгоритм решения проблемы планирования расписания академических курсов. – URL: <https://bsj.uobaghdad.edu.iq/index.php/BSJ/article/view/5309/3677> (дата обращения: 29.10.2021).
2. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2006. – 320 с.
3. Голдберг Д.Э. Генетические алгоритмы поиска, оптимизации и машинного обучения. – Изд. компании «Эддисон-Уэсли», 1989.
4. Делкатани Д., Озкан Э., Устун О., Торкуль О. Эволюционные алгоритмы для многоцелевого гибкого планирования ячеек рабочих мест. – URL: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1568494621008127?token=B450EEE1CF1DDA0740952A46F8D57C861AD0F25F848BC39EAAFC2CD99565128625281A46285BAEAF57055ED57155F17D&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211029073249> (дата обращения: 29.10.2021).
5. Дэвенпорт Х. О проблеме Уоринга для кубов // Acta Mathematica. – 1939. – Т. 71.
6. Кавамура С., Комано Ю., Симидзу Х., Йонемура Т. Алгоритмы Монтгомери с использованием квадратичной остаточности. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13389-018-0195-8.pdf> (дата обращения: 29.10.2021).
7. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
8. Крейцберг П., Серанг О. О решении вероятностных линейных диофантовых уравнений. – URL: <https://jmlr.org/papers/volume22/17-474/17-474.pdf> (дата обращения: 29.10.2021).
9. Ман Ю.К. Перспективный подход к решению линейного диофантова уравнения. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/0020739X.2020.1745915> (дата обращения: 28.10.2021).
10. Манин Ю.И. Вычислимое и невычислимое. – М.: Советское радио, 1980. – 128 с.
11. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. – М.: Изд-во «ДМК Пресс», 2020. – 1002 с.

12. *Матиясевиц Ю.В.* Десятая проблема Гильберта. – М.: Физматлит, 1993. – 224 с.
13. *Митчелл М.* Введение в генетические алгоритмы. – Лондон: Первое издание издательства Массачусетского технологического института в мягкой обложке, 1998. – 158 с.
14. *Осипов Н.Н., Кытманов А.А.* Алгоритм решения семейства диофантовых уравнений четвертой степени, удовлетворяющих условию Рунге. – URL: <https://events.rudn.ru/event/20/papers/178/files/445-Osipov-Kytmanov-CA-2019.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).
15. *Осиян В.О.* Разработка математической модели дисимметричной биграммной крипто-системы на основе параметрического решения многостепенной системы диофантовых уравнений // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 6.
16. *Фороузан Б.А.* Криптография и безопасность сетей: учеб. пособие: пер. с англ. / под ред. А.Н. Берлина. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 784 с.
17. *Холланд Д.Х.* Генетические алгоритмы. – URL: <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/holland.GAIntro.htm> (дата обращения: 30.10.2021).
18. *Чанг К.-С., Ли К.-Т., Чен К.* Сохранение конфиденциальности и обратимое сокрытие информации на основе арифметики квадратичных вычетов. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8679991> (дата обращения: 29.10.2021).
19. *Чэнь Ю.-Г., Ян Х.-Х.* Гипотеза Шаркози о квадратичных вычетах. – URL: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0022314X21001402?token=B17EF4980D92E71F5CA05919D590CE859BA43F68FD937D66C630F36D032BCDB1A6541630B232868DE20F772B14520015&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211029110553> (дата обращения: 29.10.2021).
20. *Шарифу М.Р., Акбарифард С., Кадепи К., Мададу М.Р.* Сравнительный анализ некоторых эволюционных моделей в оптимизации работы водохранилищ плотины. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-95159-4.pdf> (дата обращения: 29.10.2021).

REFERENCES

1. *Abdulzhabbar I.A., Abdulla S.M.* Evolyutsionnyy algoritm resheniya problemy planirovaniya raspisaniya akademicheskikh kursov [An evolutionary algorithm for solving academic courses timetable scheduling problem]. Available at: <https://bsj.uobaghdad.edu.iq/index.php/BSJ/article/view/5309/3677> (accessed 29 October 2021).
2. *Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M.* Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit, 2006, 320 p.
3. *Goldberg D.E.* Geneticheskie algoritmy poiska, optimizatsii i mashinnogo obucheniya [Goldberg Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning]. Izd. kompaniya «Eddison-Uesli», 1989.
4. *Delikatash D., Ozkan E., Ustun O., Torkul' O.* Evolyutsionnye algoritmy dlya mnogotselevogo gibkogo planirovaniya yacheek rabochikh mest [Evolutionary algorithms for multi-objective flexible job shop cell scheduling]. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1568494621008127?token=B450EEE1CF1DDA0740952A46F8D57C861AD0F25F848BC39EAAFC2CD99565128625281A46285BAEAF57055ED57155F17D&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211029073249> (accessed 29 October 2021).
5. *Devenport Kh.* O probleme Uoringa dlya kubov [On Waring's problem for cubes], *Acta Mathematica*, 1939, Vol. 71.
6. *Kavamura S., Komano Yu., Simidzu Kh., Yonemura T.* Algoritmy Montgomeri s ispol'zovaniem kvadrachnoy ostatochnosti [Montgomery algorithms using quadratic residuals]. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13389-018-0195-8.pdf> (accessed 29 October 2021).
7. *Karpenko A.P.* Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: a textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014, 446 p.
8. *Kreysberg P., Serang O.* O reshenii veroyatnostnykh lineynykh diofantovykh uravneniy [On solving probabilistic linear diophantine equations]. Available at: <https://jmlr.org/papers/volume/22/17-474/17-474.pdf> (accessed 29 October 2021).

9. *Man Yu.K.* Perspektivnyy podkhod k resheniyu lineynogo diofantova uravneniya [A forward approach for solving linear Diophantine equation]. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/0020739X.2020.1745915> (accessed 28 October 2021).
10. *Manin Yu.I.* Vychislimoe i nevychislimoe [Computable and non-computable]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980, 128 p.
11. *Saymon D.* Algoritmy evolyutsionnoy optimizatsii [Evolutionary optimization algorithms]. Moscow: Izd-vo «DMK Press», 2020, 1002 p.
12. *Matiyasevich Yu.V.* Desyataya problema Gil'berta [Hilbert's tenth problem]. Moscow: Fizmatlit, 1993, 224 p.
13. *Mitchell M.* Vvedenie v geneticheskie algoritmy [An introduction to genetic algorithms]. London: Pervoe izdanie izdatel'stva Massachusetskogo tekhnologicheskogo instituta v myagkoy oblozhke, 1998, 158 p.
14. *Osipov N.N., Kytmanov A.A.* Algoritm resheniya semeystva diofantovykh uravneniy chetvertoy stepeni, udovletvoryayushchikh usloviyu Runge [An algorithm for solving a family of fourth-degree diophantine equations that satisfy Runge's condition]. Available at: <https://events.rudn.ru/event/20/papers/178/files/445-Osipov-Kytmanov-CA-2019.pdf> (accessed 28 October 2021).
15. *Osipyay V.O.* Razrabotka matematicheskoy modeli disimmetrichnoy bigrammnoy kriptosistemy na osnove parametricheskogo resheniya mnogostepennoy sistemy diofantovykh uravneniy [Development of a mathematical model of a disymmetric bigram cryptosystem based on a parametric solution of a multistep system of diophantine equations], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2020, No. 6.
16. *Forouzan B.A.* Kriptografiya i bezopasnost' setey: ucheb. posobie [Cryptography and network security: a textbook]: transl. from Engl., ed. by A.N. Berlin. Moscow: Internet-Universitet Informatsionnykh Tekhnologiy: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010, 784 p.
17. *Kholland D.Kh.* Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Available at: <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/holland.GAIIntro.htm> (accessed 30 October 2021).
18. *Chang K.-S., Li K.-T., Chen K.* Sokhraneniye konfidentsial'nosti i obratimoye sokrytie informatsii na osnove arifmetiki kvadratichnykh vychetov [Privacy-preserving reversible information hiding based on arithmetic of quadratic residues]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8679991> (accessed 29 October 2021).
19. *Chen' yu.-G., Yan Kh.-Kh.* Gipoteza Sharkozi o kvadratichnykh vychetakh [A conjecture of Sárközy on quadratic residues]. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0022314X21001402?token=B17EF4980D92E71F5CA05919D590CE859BA43F68FD937D66C630F36D032BCDB1A6541630B232868DE20F772B14520015&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211029110553> (accessed 29 October 2021).
20. *Sharifi M.R., Akbarifard S., Kaderi K., Madadi M.R.* Sravnitel'nyy analiz nekotorykh evolyutsionnykh modeley v optimizatsii raboty vodokhranilishch plotiny [Comparative analysis of some evolutionary-based models in optimization of dam reservoirs operation]. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-95159-4.pdf> (accessed 29 October 2021).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ф.Г. Хисамов.

Полупанова Елена Евгеньевна – Кубанский государственный университет; e-mail: jiienka@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79284013301; кафедра вычислительных технологий; к.т.н.; доцент.

Усов Павел Евгеньевич – e-mail: lyova-pavel.usov@yandex.ru; тел.: +79186374835, кафедра вычислительных технологий; магистрант.

Polupanova Elena Evgenievna – Kuban State University; e-mail: jiienka@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79284013301, the department of computational technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Usov Pavel Evgenievich – e-mail: lyova-pavel.usov@yandex.ru; phone: +79186374835, the department of computational technologies; master's degree student.

Х.С. Аламир, Е.В. Заргарян, Ю.А. Заргарян

**МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА
НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ТРАФИКА
НА ДОРОГАХ**

В связи с индустриализацией современного общества, ростом транспортных систем нашей страны, увеличения определенных необходимых для развития потребностей граждан нашей страны количество транспортных средств разных видов и типов с каждым годом продолжает увеличиваться с большой скоростью, вызывая огромные пробки на транспортных дорогах, особенно в больших городах и мегаполисах. Таким образом, прогнозирование транспортных потоков является важным и необходимым компонентом оптимального управления трафиком в современных условиях развития транспортной сети. В качестве решения этой проблемы данная статья нацелена на анализ и описание применения методов искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей, что представляет современный подход к моделированию в сложных и нелинейных ситуациях, возникающих при прогнозировании модели транспортного потока. Показанный метод точности основан на разработке нейронной сети для прогнозирования дневного потока трафика. Затем ожидаемый транспортный поток сравнивается с реальным набором данных, записанным на участке дороги и предоставленным менеджером инфраструктуры. Фактически, нейронные сети способны извлекать уроки из прошлых возникших ситуаций и предсказывать будущие ситуации на транспортной сети. В этом исследовании были изучены различные структуры нейронной сети, и результаты моделирования показали, что лучшие прогнозы были получены с использованием многослойной архитектуры перцептрон, которая имеет хорошую систему обобщения со средней общей квадратичной ошибкой 0,00927 при текущем наборе транспортных средств. Первая часть статьи посвящена определению различных концепций, относящихся к текущей области исследований, включая обзор литературы по прогнозированию трафика и нейронным сетям. Вторая часть посвящена описанию проблемы перегрузки трафика с помощью задач прогнозирования и представлению предлагаемого метода решения с акцентом на искусственные нейронные сети, как средство прогнозирования спроса и его различных структур. Затем численные эксперименты проиллюстрированы анализом результатов прогноза после формирования и тестирования различных архитектур нейронных сетей.

Нейронные сети; моделирование транспортного потока; метод точности; многослойная архитектура; искусственный интеллект.

H.S Alamir, E.V. Zargaryan, Yu.A. Zargaryan

**TRANSPORT FLOW FORECASTING MODEL BASED ON NEURAL
NETWORKS FOR TRAFFIC PREDICTION ON ROADS**

In connection with the industrialization of modern society, the growth of the transport systems of our country, an increase in certain necessary for the development of the needs of the citizens of our country, the number of vehicles of various types continues to increase every year very fast, causing huge traffic jams on transport roads, especially in large cities and megacities. Thus, forecasting traffic flows is an important and necessary component of optimal traffic control in modern conditions of transport network development. As a solution to this problem, this article aims to analyze and describe the application of artificial intelligence methods, in particular neural networks, which represent a modern approach to modeling in complex and nonlinear situations that arise when predicting a traffic flow model. The shown accuracy method is based on the development of a neural network to predict the daily traffic flow. The expected traffic flow is then compared with the actual dataset recorded on the road section and provided by the infrastructure manager. In fact, neural networks are able to learn from past situations and predict future situations on the transport network. In this study, various neural network structures were examined,

and the simulation results showed that the best predictions were obtained using the multilayer perceptron architecture, which has a good generalization system with a root mean square error of 0.00927 with the current set of vehicles. The first part of the article is devoted to defining various concepts related to the current research area, including a review of the literature on traffic prediction and neural networks. The second part is devoted to describing the problem of traffic congestion using forecasting problems and presenting the proposed solution method with an emphasis on artificial neural networks as a means of forecasting demand and its various structures. Then, numerical experiments are illustrated by analyzing the forecast results after the formation and testing of various neural network architectures.

Neural networks; traffic flow modeling; precision method; multilayer architecture; artificial intelligence.

Введение. В связи с постоянным ростом количества транспортных средств на дорогах городов, мегаполисов страны, трасс и с ограниченными бюджетами и земельными участками для строительства новой дорожной инфраструктуры, постоянными ремонтами, основные транспортные артерии страны и междугородные трассы разрушаются и загружаются под воздействием транспортных пробок. Пробки на дорогах особенно заметны в часы пик и вызывают экономические, социальные и экологические проблемы. Это образует огромные затраты с точки зрения потерянного времени водителей и пассажиров, по сравнению с обычным временем в пути, увеличивается количество аварий, затраты на использование топлива, загазованность местности и т.п.

В литературе многие авторы предоставляют исчерпывающий набор методов прогнозирования трафика. Первые прогнозы трафика появились с конца 1970-х годов [1] и касались прогнозирования транспортных потоков на основе подходов временных рядов с использованием различных методов с использованием математических и статистических инструментов [2–4].

В настоящее время появление интеллектуальных транспортных систем (ИТС) является важным направлением исследований, поскольку они позволяют применять новые информационные технологии в сфере прогнозирования транспортных потоков: обнаружение дорожных событий, коммуникация участников движения, обработка информации, работа с пользователями используемых программных приложений. Поэтому способность точно прогнозировать характер транспортного потока - одно из важнейших требований к системам управления трафиком дорожного движения. Интеллектуальные транспортные системы могут использоваться для улучшения использования транспортной инфраструктуры и повышения безопасности дорожного движения.

Основной целью этой работы является изучение модели прогнозирования транспортного потока на основе нейронных сетей для предсказания трафика на дорогах, за счет анализа данных собранных наблюдений. Набор данных, используемый в нашем исследовании, состоит из обучения, тестирования и проверки ежедневных данных о трафике, предоставляемых менеджером инфраструктуры дорожного потока.

Первая часть статьи посвящена определению различных концепций, относящихся к текущей области исследований, включая обзор литературы по прогнозированию трафика и нейронным сетям. Вторая часть посвящена описанию проблемы перегрузки трафика с помощью задач прогнозирования и представлению предлагаемого метода решения с акцентом на искусственные нейронные сети, как средство прогнозирования спроса и его различных структур. Затем численные эксперименты проиллюстрированы анализом результатов прогноза после формирования и тестирования различных архитектур нейронных сетей [5, 6].

Основная часть

1. Проблемы возникновения пробок на дорогах. Заторы на дорогах возникают из-за некоторых ограничений на конкретной транспортной сети. Согласно Нагатани [7], пробки подразделяется на два типа: частые, большой загруженности (6–10 баллов), которые имеют определенную периодичность, или случайные и внезапные события малой загруженности (1–5 баллов), которые непредсказуемы и вызваны внешним событием, например: погодные условия, автомобильные аварии, временные строительные работы, и т.п. После возникновения этих событий образуется узкое место, предотвращающее естественный поток транспортных средств и увеличивающее время в пути.

Активное предсказание и управление транспортным потоком способствует лучшему использованию дорожной инфраструктуры. В настоящее время ИТС включают сбор, обработку и анализ данных для обеспечения эффективного инструмента принятия решений.

Прогнозирование транспортного потока стало неотъемлемой частью ИТС, однако данные о трафике очень нелинейны и зависят от времени суток и других влияющих факторов. Было разработано несколько методов для изучения и прогнозирования покрытия транспортных потоков:

Параметрические методы основаны на статистическом анализе данных, таких как линейная и нелинейная регрессия и авторегрессионное интегрированное скользящее среднее [7–9]. Однако эти модели более сложны для визуализации и требуют дополнительных вычислений.

Непараметрические методы, позволяющие аппроксимировать любую нелинейную функцию. Последние разработки привлекают использование искусственной нейронной сети [1], которая обеспечивает гибкость параметров на этапах проектирования и реализации. Этот метод оказался хорошим для краткосрочного прогнозирования транспортного потока [1, 10–12].

2. Искусственная нейронная сеть для прогнозирования трафика. Основные понятия. В качестве метода искусственного интеллекта искусственные нейронные сети (ИНН) «вдохновлены» работой человеческого мозга. Фактически, человеческий мозг или биологическая нейронная сеть содержит примерно 1011 нейронов и тысячи миллиардов (от 1014 до 1015) соединений. Кроме того, существует несколько типов нейронов, каждый из которых обладает тремя функциональными свойствами: получение сигнала от других нейронов или внешней среды, манипулирование этими сигналами для получения информации, передача информации другим нейронам.

Как показано на рис. 1, в области искусственных нейронных сетей это отражается в нескольких элементах, также называемых нейронами, где дендриты, аксоны и синапсы называются, соответственно, весами входов и выходов.

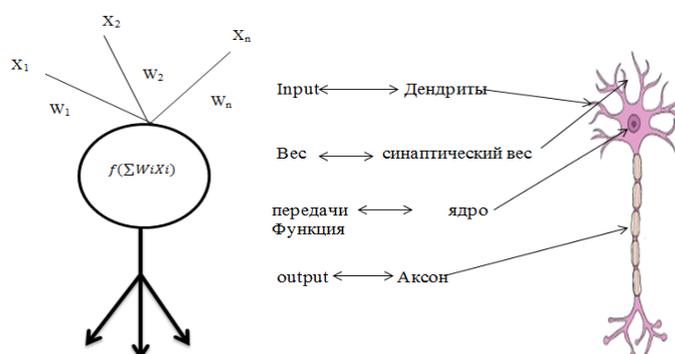


Рис. 1. Аналогия между искусственным и биологическим нейроном

Нейрон принадлежит к одному из трех типов слоев: входному слою, скрытому слою или выходному слою. Эти уровни связаны между собой связями, количественно определяемыми синаптическими весами.

Искусственный интеллект для нейронных сетей может использоваться, как решение различных задач, таких как моделирование и симуляция, оптимизация, классификация или прогнозирование [13–15]. Кроме того, производительность искусственной нейронной сети зависит от синаптических весов, которые адаптируются и изменяются на этапе обучения. Основная цель на этапе обучения – уменьшить общую ошибку сети и увеличить скорость обучения путем вычисления ошибки между фактическим и полученным выходом. Более того, другие критические параметры влияют на производительность нейронной сети, включая количество скрытых слоев, количество нейронов в скрытых слоях, использование нейронов смещения, наличие связей между выходным и входным слоями, скорость обучения и передаточная функция.

В этой статье предлагается использовать искусственную нейронную сеть в качестве решения проблем дорожного трафика путем прогнозирования суточного транспортного потока. Ожидаемый транспортный поток сравнивается с реальным набором данных, измеренным на определенном участке дороги.

Предлагаемый метод решения состоит из использования многоуровневой архитектуры нейронных сетей. При использовании метода проб и ошибок выполняются следующие шаги (непоследовательным образом), чтобы найти подходящую архитектуру нейронной сети с оптимальной производительностью прогнозирования:

1. Набор данных и выбор переменных.

Набор данных содержит информацию о транспортном потоке на конкретной автомагистрали, регистрируемую ежедневно за 2018, 2009, 2020 и 2021 годы и разбитую по классификации типов транспортных средств (легкие автомобили: класс 1, грузовики: класс 2, автомобили с тремя или более осями: класс 3). Образец сформированных данных представлен в табл. 1.

Этот первый шаг состоит из изучения проблемы и подбора входных переменных, а затем извлечения и сбора данных.

Предлагаемая нейронная сеть содержит входной слой из 18 значений. Выходные данные представляют ожидаемый поток трафика на день. Входные значения объяснены ниже:

а) разнообразная календарная информация (рабочий день/выходные, национальный праздник/религиозный праздник, школьный праздник, хронологический порядок дня (например, первый день религиозного праздника или последний день школьного праздника), забастовка сотрудников дорожной компании;

б) статистика усредненных потоков дневного трафика за предыдущие дни (трафик года – 365, 3 недели – 21, 2 недели – 14, неделя – 7, 6 дней, 5 дней, 4 дня, 3 дня, 2 дня и 1 день).

После этого формулируются наборы для обучения и тестирования, в которых сеть представлена как набор желаемых значений «вход / выход».

Таблица 1

Классификация суточного трафика на основе почасовой суммы

Регион	День	Час	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Общий трафик
Ростов н/Д, р-он Западный	06/04/2018	09:00	1367	128	71	1566
Ростов н/Д, р-он Западный	25/08/2019	17:00	1342	149	25	1516
Ростов н/Д, р-он Западный	30/12/2020	16:00	1981	185	132	2298
Ростов н/Д, р-он Западный	08/06/2021	01:00	389	116	97	602

2. Нормализация или предварительная обработка входных и выходных данных [16].

Нейронная сеть обучается только на предварительно обработанных данных, где входные значения находятся в интервале $[-1, 1]$, а выходные значения находятся в интервале $[0, 1]$.

3. Обучение и тестирование

Для обеспечения правильной работы нейронной сети необходимы правильные выходные данные (эталонные) для сравнения полученных результатов с полученными выходными данными, а затем для вычисления общей ошибки сети. Чтобы уменьшить ошибку нейронных сетей, определяемую как разницу между желаемым и полученным выходом, требуется этап обучения. На этом этапе выполняется корректировка сети, чтобы определить соответствующее значение соединений для того, чтобы результат сети был как можно ближе к фактическим эталонным выходным данным.

4. Выбор нужной нейронной сети

Как упоминалось ранее, на этапе обучения нейронной сети требуется пара желаемых значений «вход / выход», чтобы обеспечить лучший результат с минимальной ошибкой. В нашем случае мы используем сеть с тремя нейронами на входном уровне и одним нейроном на выходном уровне. Количество скрытых слоев и нейронов в каждом слое значение экспериментальное.

Эксперименты и результаты

1. Построение: этап обучения. Основным результатом данной работы является реализация системы прогнозирования на основе нейронной сети для прогнозирования суточного потока трафика. Более того, необходимо передать в нейронную сеть реальные данные за предыдущие четыре года, как дневной поток трафика в городе. Ожидаемый поток трафика представляет собой выходные сети (рис. 2).

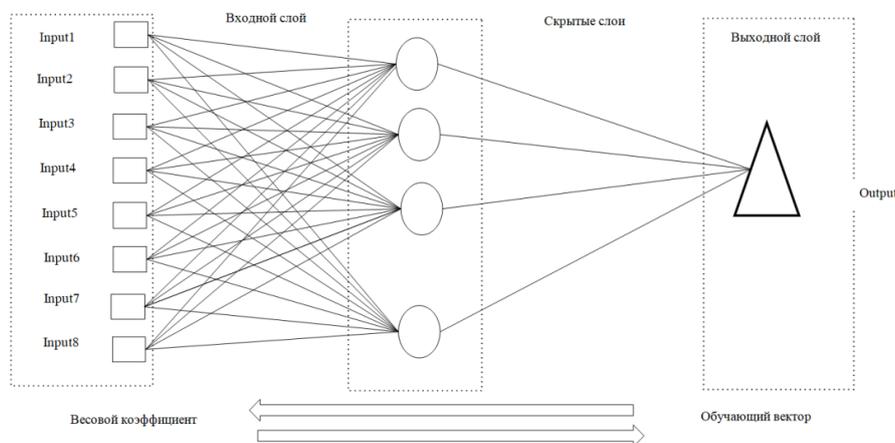


Рис. 2. Предлагаемый подход к поиску архитектуры нейронной сети

В этом исследовании различные модели искусственных нейронных сетей тестируются для прогнозирования потока трафика, включая радиальную базисную функцию (РБФ), перцептрон, многослойный перцептрон, адаптивный линейный нейрон и сверточная нейронная сеть (рис. 2). Однако наилучшие результаты прогнозирования получаются при использовании структуры многослойного перцептрона. Следовательно, результаты, представленные в данной статье, относятся только к архитектуре многослойного перцептрона (MLP – Multilayered perceptron).

Обучающий набор был составлен с использованием ежедневных данных о трафике за первые три года, включая 2018, 2019 и 2020. Набор тестов составлен из ежедневных данных о трафике за 2021 год. Поэтому выбранные шаблоны используются соответственно на этапах обучения и тестирования. Более того, чтобы найти подходящую структуру сети, которая даст наилучшие прогнозы трафика за несколько попыток, применяется изменение количества скрытых слоев и количества нейронов в этих скрытых слоях.

2. Полученные прогнозы и анализ результатов. Наилучшие прогнозы потока трафика во время экспериментов были получены с многослойным персептроном из трех скрытых слоев: первый скрытый слой состоит из пяти нейронов, второй – из восьми нейронов, а третий – из двух нейронов. Кроме того, передаточной функцией является сигмовидная и обратное распространение в качестве алгоритма обучения при наличии нейрона смещения.

Наилучший результат достигается при общей среднеквадратической ошибке 0,00927 в наборе транспортных средств и 0,01321 в наборе тестовых данных. Обзор результатов прогнозирования трафика представлен в следующей таблице (см. табл. 2).

Из результатов, полученных для серии тестов, можно сделать вывод, что искусственную нейронную сеть можно с легкостью использовать для прогнозирования трафика с приемлемой точностью.

Таблица 2

Результаты прогнозирования трафика с наилучшей топологией MLP (скрытые слои 5-8-2)

День	Актуальный трафик	Предсказанный трафик	Различие
08/01/2021	23147	22902	245
09/01/2021	25816	25448	368
17/01/2021	27739	28176	-437
28/02/2021	27471	28347	-876
24/05/2021	25080	24587	493

Выводы. В этой статье представлен обзор различных работ, связанных с моделированием и решением проблем заторов на дорогах и более точным прогнозированием транспортного потока, который является ключевым компонентом повседневной работы и планирования действий по управлению дорожным движением.

Основным выводом данной статьи является реализация инструмента прогнозирования трафика на основе искусственного интеллекта, в частности, использование модели нейронной сети. Ожидаемый транспортный поток сравнивается с реальным набором данных, зафиксированным на участке дороги и предоставленным ответственным за сбор данных. Результаты показывают, что наилучшей топологией для этого тематического исследования являются трехуровневые скрытые слои персептроном (5-8-2) общей среднеквадратической ошибке 0,00927 в наборе транспортных средств и 0,01321 в наборе тестовых данных.

В будущем направление исследований будет заключаться в сравнении эффективности прогнозирования искусственных нейронных сетей с другими традиционными или интеллектуальными моделями прогнозирования, такими как ARMA, ARIMA или ANFIS. Интересно применить предложенный подход с использованием рекуррентных нейронных сетей в глубоком обучении, основанном на использовании петель обратной связи для обработки серии данных, которые информируют конечный результат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lana I., Del Ser J., Velez M., et Vlahogianni E.I.* Road Traffic Forecasting: Recent Advances and New Challenges // IEEE Intell. Transp. Syst. Mag. – 2018. – Vol. 10, No. 2. – P. 93-109.
2. *Заргарян Е.В., Аконджанян Ж.Ж.* Исследование автоматизации коллаборативных роботов и способы их применения // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2020: Матер. X Международной научно-технической конференции. – 2020. – С. 218-223.
3. *Заргарян Ю.А.* Задача управляемости в адаптивной автоматной обучаемой системе управления // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2020: Матер. X Международной научно-технической конференции. – 2020.
4. *Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Dmitrieva I.A., Sakharova O.N. and Pushnina I.V.* Modeling design information systems with many criteria. Information Technologies and Engineering – APITECH - 2020 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 2085 (3). – P. 032057(1-7). – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032057.
5. *Kamarianakis Y. et Prastacos P.* Forecasting Traffic Flow Conditions in an Urban Network: Comparison of Multivariate and Univariate Approaches // Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board. – Janv. 2003. – Vol. 1857, No. 1. – P. 74-84.
6. *Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Kapc I.V., Sakharova O.N., Kalyakina I.M and Dmitrieva I.A.* Method of estimating the Pareto-optimal solutions based on the usefulness // International Conference on Advances in Material Science and Technology - CAMSTech-2020: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 919 (2). – P. 022027 (1-8). – DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022027.
7. *Nagatani T.* The physics of traffic jams // Rep. Prog. Phys. – Sept. 2002. – Vol. 65, No. 9. – P. 1331-1386.
8. *Jiber M., Lamouik I., Ali Y., et Sabri M.A.* Traffic flow prediction using neural network // in 2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), Fez, 2018. – P. 1-4.
9. *Zhang Y. et Liu Y.* Comparison of Parametric and Nonparametric Techniques for Non-peak Traffic Forecasting. – 2009. – Vol. 3, No. 3. – P. 7.
10. *Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E.* The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12, No. 23. – С. 6762-6772.
11. *Zargarjan E.V., Zargarjan Ju.A., Finaev V.I.* Information support for the training of fuzzy production account balance in the conditions of incomplete data. Innovative technologies and didactics in teaching (ITDT-2016) // Collected papers. – 2016. – P. 128-138.
12. *Ahmed M.S. et. Cook A.R.* Analysis of Freeway Traffic Time-Series Data by Using Box-Jenkins Techniques. – P. 9.
13. *Финаев В.И., Заргарян Ю.А., Заргарян Е.В., Соловьев В.В.* Формализация групп подвижных объектов в условиях неопределённости для выбора управляющих решений // Информатизация и связь. – 2016. – № 3. – С. 56-62.
14. *Slimani I., Farissi I. El., et Achchab S.* Artificial Neural Networks for Demand Forecasting: Application Using Moroccan Supermarket Data. – 2015.
15. *Slimani I., Farissi I. El., et Achchab S.* Configuration and implementation of a daily artificial neural network-based forecasting system using real supermarket data // Int. J. Logist. Syst. Manag. – 2017. – Vol. 28, No. 2. – P. 144-163.
16. *Пушнина И.В.* Система управления подвижным объектом в условиях неопределенности // Наука и образование на рубеже тысячелетий: Сб. научно-исследовательских работ. – Кисловодск, 2018. – С. 65-74.
17. *Wang X., Wang C.* Time series data cleaning: A survey // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 1866-1881. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962152.
18. Data-driven smart cities: Big Data, analytics, and security. – 2018. – URL: <https://skelia.com/articles/data-driven-smart-cities-big-data-analytics-and-security/> (дата обращения: 14.09.2020).
19. *Kim J., Tae D., Seok J.* A survey of missing data imputation using generative adversarial networks // Proc. of the 2020 Int. Conf. on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC 2020. – P. 454-456. – DOI: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065044.

20. Dmitrieva I.A., Milesheko L.P., Begun O.V., Berezhnaya A.V. Information Modernization of The General Theory Of Environmental Safety Ensuring // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific Conference. Krasnoyarsk, 2021. – P. 12072.
21. Ivanova N.A., Begun O.V., Dmitrieva I.A., Milesheko L.P., Sklifus R.V. Impact Of Road Transport On The Environmental Situation In The Urban Environment // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences EpSBS. Krasnoyarsk, Russia, 2021. – P. 2600-2606.

REFERENCES

1. Lana I., Del Ser J., Velez M., et Vlahogianni E.I. Road Traffic Forecasting: Recent Advances and New Challenges, *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, 2018, Vol. 10, No. 2, pp. 93-109.
2. Zargaryan E.V., Akopdzhanyan Zh.Zh. Issledovanie avtomatizatsii kollaborativnykh robotov i sposoby ikh primeneniya [Research of automation of collaborative robots and methods of their application], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2020: Mater. X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technologies for the development of information systems TRIS-2020. Materials of the X International Scientific and Technical Conference], 2020, pp. 218-223.
3. Zargaryan Yu.A. Zadacha upravlyaemosti v adaptivnoy avtomatnoy obuchaemoy sisteme upravleniya [The problem of controllability in an adaptive automaton learning control system], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2020: Mater.X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technologies for the development of information systems TRIS-2020. Materials of the X International Scientific and Technical Conference], 2020.
4. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Dmitrieva I.A., Sakharova O.N. and Pushnina I.V. Modeling design information systems with many criteria. *Information Technologies and Engineering – APITECH – 2020, Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 2085 (3), pp. 032057(1-7). DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032057.
5. Kamarianakis Y. et Prastacos P. Forecasting Traffic Flow Conditions in an Urban Network: Comparison of Multivariate and Univariate Approaches, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, Janv. 2003, Vol. 1857, No. 1, pp. 74-84.
6. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Kapc I.V., Sakharova O.N., Kalyakina I.M and Dmitrieva I.A. Method of estimating the Pareto-optimal solutions based on the usefulness, *International Conference on Advances in Material Science and Technology - CAMSTech-2020: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919 (2), pp. 022027 (1-8). DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022027.
7. Nagatani T. The physics of traffic jams, *Rep. Prog. Phys.*, Sept. 2002, Vol. 65, No. 9, pp. 1331-1386.
8. Jiber M., Lamouik I., Ali Y., et Sabri M.A. Traffic flow prediction using neural network, in *2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), Fez, 2018*, pp. 1-4.
9. Zhang Y. et Liu Y. Comparison of Parametric and Nonparametric Techniques for Non-peak Traffic Forecasting, 2009, Vol. 3, No. 3, pp. 7.
10. Beloglazov D., Shapovalov I., Soloviev V., Zargaryan E. The hybrid method of path planning in non-determined environments based on potential fields, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, Vol. 12, No. 23, pp. 6762-6772.
11. Zargarjan E.V., Zargarjan Ju.A., Finaev V.I. Information support for the training of fuzzy production account balance in the conditions of incomplete data. Innovative technologies and didactics in teaching (ITDT-2016), *Collected papers*, 2016, pp. 128-138.
12. Ahmed M.S. et. Cook A.R. Analysis of Freeway Traffic Time-Series Data by Using Box-Jenkins Techniques, pp. 9.
13. Finaev V.I., Zargaryan Yu.A., Zargaryan E.V., Solov'ev V.V. Formalizatsiya grupp podvizhnykh ob"ektov v usloviyakh neopredelennosti dlya vybora upravlyayushchikh resheniy [Formalization of groups of mobile objects in conditions of uncertainty for the choice of control decisions], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2016, No. 3, pp. 56-62.
14. Slimani L., Farissi I.E.I., et Achchab S. Artificial Neural Networks for Demand Forecasting: Application Using Moroccan Supermarket Data, 2015.

15. Slimani I., Farissi I. El, et Achchab S. Configuration and implementation of a daily artificial neural network-based forecasting system using real supermarket data, *Int. J. Logist. Syst. Manag.*, 2017, Vol. 28, No. 2, pp. 144-163.
16. Pushnina I.V. Sistema upravleniya podvizhnym ob"ektom v usloviyakh neopredelennosti [The control system of a moving object in conditions of uncertainty], *Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletiy: Sb. nauchno-issledovatel'skikh rabot* [Science and education at the turn of the millennium: A collection of research papers]. Kislovodsk, 2018, pp. 65-74.
17. Wang X., Wang C. Time series data cleaning: A survey, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 1866-1881. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962152.
18. Data-driven smart cities: Big Data, analytics, and security, 2018. Available at: <https://skelia.com/articles/data-driven-smart-cities-big-data-analytics-and-security/> (accessed 14 september2020).
19. Kim J., Tae D., Seok J. A survey of missing data imputation using generative adversarial networks, *Proc. of the 2020 Int. Conf. on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC 2020*, pp. 454-456. DOI: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065044.
20. Dmitrieva I.A., Mileshko L.P., Begun O.V., Berezhnaya A.V. Information Modernization of The General Theory Of Environmental Safety Ensuring, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, 2021, pp. 12072.
21. Ivanova N.A., Begun O.V., Dmitrieva I.A., Mileshko L.P., Sklifus R.V. Impact Of Road Transport on The Environmental Situation In The Urban Environment, *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences EpSBS*. Krasnoyarsk, Russia, 2021, pp. 2600-2606.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент Н.А. Иванова.

Аламир Хайдер Сагбан Хуссейн – Южный федеральный университет; e-mail: alamir@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

Заргарян Елена Валерьевна – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Заргарян Юрий Артурович – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Alamir Haider Sagban Hussein – Southern Federal University, e-mail: alamir@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; postgraduate student.

Zargaryan Elena Valerevna – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zargaryan Yuri Arturovich – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 658.512

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-132-140

В.И. Данильченко, Е.В. Данильченко, В.М. Курейчик

МЕТАЭВРИСТИКА НА ОСНОВЕ ПОВЕДЕНИЯ КОЛОНИИ БЕЛЫХ КРОТОВ

Алгоритмы оптимизации, вдохновленные миром природы, превратились в мощные инструменты для решения сложных задач. Однако у них все же есть некоторые недостатки, требующие исследования новых и более совершенных алгоритмов оптимизации. В связи с этим, при решении NP полных задач появляется необходимость в разработке новых методик решения данного класса задач. Одним из таких методик может стать метаэвристика на основе поведения колонии белых кротов. В этой статье предлагается новый метаэвристический алгоритм, называемый алгоритмом слепых белых кротов. Этот алгоритм был разработан на основе социального поведения слепых кротов в поисках пищи и защиты колонии от

вторжений. Предлагаемое решение сможет преодолеть многие недостатки обычных алгоритмов оптимизации, включая попадание в ловушку локальных минимумов или низкую скорость сходимости. Цель данной работы заключается в разработке алгоритма оптимизации сложной целевой функции. Научная новизна заключается в разработке генетического алгоритма на основе поведения колонии белых кротов для решения NP полных задач. Постановка задачи в данной работе заключается в следующем: оптимизировать поиск решения сложных функций путем применения, алгоритма на основе поведения колонии белых кротов. Практическая ценность работы заключается в создании новой архитектуры поиска, позволяющей использовать разработанный алгоритм для эффективного решения NP полных задач, а также проводить сравнительный анализ с существующими аналогами. Принципиальное отличие от известных подходов в применении новой структуры бионспирированного поиска на основе поведения колонии белых кротов, которое позволит исключить попадание в локальный минимум или низкую скорость сходимости. Приведенные результаты вычислительного эксперимента, показали преимущества предложенного в работе многомерного подхода к решению задач размещения элементов СБИС по сравнению с существующими аналогами. Таким образом, проблема создания методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения NP полных задач в настоящее время является актуальной задачей.

Генетические алгоритмы; графы и гиперграфы; эволюционные вычисления; САПР; многомерные вычисления; производства электронных средств; мета-эвристический алгоритм; алгоритм оптимизации; алгоритм белых кротов.

V.I. Danilchenko, Y.V. Danilchenko, V.M. Kureichik

METAHEURISTICS BASED ON THE BEHAVIOR OF A COLONY OF WHITE MOLES

Optimization algorithms inspired by the natural world have turned into powerful tools for solving complex problems. However, they still have some disadvantages that require the study of new and more advanced optimization algorithms. In this regard, when solving NP complete problems, there is a need to develop new methods for solving this class of problems. One of these methods can be metaheuristics based on the behavior of a colony of white moles. This paper proposes a new metaheuristic algorithm called the blind white moles algorithm. This algorithm was developed based on the social behavior of blind moles in search of food and protecting the colony from intruders. The proposed solution will be able to overcome many disadvantages of conventional optimization algorithms, including falling into the trap of local minima or a low convergence rate. The purpose of this work is to develop an algorithm for optimizing a complex objective function. The scientific novelty lies in the development of a genetic algorithm based on the behavior of a colony of white moles for solving NP complete problems. The problem statement in this paper is as follows: to optimize the search for solutions to complex functions by applying an algorithm based on the behavior of a colony of white moles. The practical value of the work lies in the creation of a new search architecture that allows using the developed algorithm for the effective solution of NP complete problems, as well as conducting a comparative analysis with existing analogues. The fundamental difference from the known approaches is in the application of a new bioinspired search structure based on the behavior of a colony of white moles, which will allow to exclude falling into a local minimum or a low convergence rate. The presented results of the computational experiment showed the advantages of the proposed multidimensional approach to solving the problems of placing VLSI elements in comparison with existing analogues. Thus, the problem of creating methods, algorithms and software for solving NP complete problems is currently of particular relevance.

Genetic algorithms; graphs and hypergraphs; evolutionary calculations; CAD; multidimensional calculations; electronic means production; meta-heuristic algorithm; optimization algorithm; white moles algorithm.

Введение. Мета-эвристические алгоритмы были в основном получены из поведения биологических систем (например, генетический алгоритм, оптимизация роя частиц) или физические системы (например, имитация отжига). Возможно, основной причиной выбора и разработки этих алгоритмов является простота в формулировке и понимание их развития.

Среди известных алгоритмов оптимизации можно упомянуть генетический алгоритм. Этот алгоритм представляет собой метод оптимизации, впервые предложенный Холландом 1975 [1]. Этот алгоритм основан на идее эволюции в природе и рассматривает проблему на полностью случайной основе. Этот метод основан на некоторых биологических методах подобно генетике и мутации, поиск осуществляется для того, чтобы найти лучшие ответы в каждом поколении по сравнению с предыдущим. Среди особенностей генетических алгоритмов их способность работать параллельно и способность искать очень большие и сложные пространства [2–4]. Другим хорошо известным алгоритмом оптимизации является оптимизация роя частиц [5], который был разработан для задач оптимизации, и его возможности до сих пор доказали свою полезность как для непрерывных, так и для дискретных функций. В этом алгоритме каждая частица рассматривается как член общества, использующий опыт своей предыдущей частицы, а также опыт других для достижения конечной цели. Этот алгоритм способен находить глобальный оптимум рассматриваемой функции на последующих итерациях [5–7]. Алгоритм имитационного отжига был представлен в основном с целью моделирования между минимизацией целевой функции задачи и охлаждением до тех пор, пока она не будет минимизирована [7–9]. В этом алгоритме первый ответ является важным параметром и играет важную роль и изменяется в зависимости от типа задачи. Алгоритм искусственной пчелиной колонии разработан на основе социального поведения медоносных пчел в их колониях, ищущих источники питания. Этот алгоритм имеет много преимуществ и некоторые недостатки, вызванные тем, что некоторые ограничения и параметры были определены для того, чтобы устранить недостатки этого метода и увеличить скорость сходимости в различных задачах, что привело к лучшей производительности [11]. Среди ключевых компонентов интеллекта роя можно назвать самоорганизацию и разделение труда. Групповое сотрудничество является ключом к достижению оптимального и идеального ответа в кратчайшие сроки.

В этой работе используется разработанный алгоритм колонии белых кротов для оптимизации числовой функций, Тесты проделались на бенчмарке (функции Розенброка), чтобы доказать лучшую производительность этого алгоритма по сравнению с другими хорошо известными оптимизационными алгоритмами. Сравнения показали лучшую скорость сходимости и большую точность в достижении оптимального отклика по сравнению с другими алгоритмами оптимизации.

Колония слепых кротов. Слепые голые кроты живут в подземных туннелях в жарких странах и в зеленых зонах с почти фиксированной температурой и влажностью. Температура в туннелях, где живут слепые голые кроты, всегда должна быть от 30 до 35°C. Каждый туннель имеет длину почти три километра [11]. Эти животные-единственные мелкие млекопитающие, которые живут в сообществе и в больших колониях, точно так же, как пчелиные и муравьиные колонии. Каждая колония состоит из трех групп кротов следующим образом:

1. Королева в сопровождении одного-трех самцов.
2. Кроты – рабочие, которые ищут источники пищи и строят подходящие гнезда для королевы и потомства.
3. Солдаты – кроты, которые отвечают за очистку туннелей и защиту колонии от вторжений.

В реальной колонии количество кротов - солдат намного выше, чем рабочих кротов. Туннели, в которых живут кроты, строятся с уникальной регулярностью. В этих туннелях есть определенные помещения, построенные для специальных назначения: кухонное помещение, используется для сбора пищи, туалетное помещение используется для размещения отходов, а когда они заполняются, для этой

цели выкапывается еще одна камера. Есть также несколько комнат-лабиринтов. Когда захватчики входят в туннель, солдаты быстро блокируют их прорыв в туннель своими отходами. Там, где их скорость для этого процесса невелика, один из солдат жертвует своей жизнью, чтобы помочь другим солдатам найти достаточное время, чтобы остановить прорыв захватчиков.

Алгоритм колонии слепых кротов. Это алгоритм оптимизации, разработанный на основе социального поведения слепых голых кротов в большой колонии. Процесс исследования начинается с центра колонии, где живут королева и потомство. Стоит отметить, что в целях упрощения рабочие кроты и кроты солдаты помещены в одну единственную группу, которая здесь называется рабочими кротами. Вначале с производством исходной популяции слепых голых кротов колония начинает работать во всем проблемном пространстве совершенно случайным образом. В алгоритме учитывается, что численность населения в два раза превышает количество источников пищи, и каждый из источников пищи представляет собой ответ на проблемное пространство. Давайте определим некоторые параметры следующим образом:

$$\text{Популяция} = [M_1, M_2, \dots, M_N], \quad (1)$$

где N это число членов, связанных с числом неизвестных параметров задачи. Исходный поиск источников питания в территориальных границах определяется следующим образом:

$$x_i = x_i^{Min} + \beta(x_i^{Max} - x_i^{Min}), \\ i = 1, \dots, S, \quad (2)$$

где x_i представляет собой i источник питания и β это случайная величина в интервале $[0, 1]$ и S представляет количество источников пищи.

Таким образом, источники пищи (результат поиска) в процессе поиска рассматриваются как цели, которые должны быть найдены рабочими кротами (например, поиск местоположения источников пищи и их соседей, определение объема обогащения, выгрузка источников пищи и хранение их в кухонном помещении).

Хаотичное движение рабочих кротов начинается от центра колонии к источникам пищи и их соседям. Кроме того, рабочие кроты выполняют процесс рытья лабиринтных туннелей, чтобы найти источники пищи. Условия источников питания с точки зрения температуры, а влажность всегда должна быть подходящей и почти стабильной.

Эти условия рассматриваются в алгоритме как коэффициент затухания в виде случайной величины в интервале $[0, 1]$ для определения движения используемых кротов от целевых источников питания в сторону их соседей. Кроме того, необходимо учитывать подземную температуру в алгоритме, определяемом следующим образом:

$$H(x) = \rho(x)C(x) \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta t} \\ (\rho C) = f_s(\rho C)_s + f_a(\rho C)_s + f_w(\rho C)_w \\ f_s + f_s + f_w = 1, \quad (3)$$

где H представляет изменение температуры почвы с глубины x как его переменная. $\rho(x)$ и $C(x)$ являются тепловыми свойствами грунта, т.е. плотностью и удельной теплоемкостью соответственно. ρ и C связанные переменные, во время движения переменные изменяются с изменением расстояния, однако из-за упрощения

алгоритма ρ и C рассматривались как постоянные (должен быть в диапазоне [2 4]). $\frac{\Delta T(x,t)}{\Delta t}$ показывает скорость изменения температуры в течении времени и обновляется на каждом шаге алгоритма. Символ f представляет вклад (в процентах) каждого рабочего крота, в то время как подстрочные индексы s, a, w указывают на компоненты почвы, например песок, воздух и воду соответственно. Их сумма равна единице, чтобы иметь среднюю сумму для получения $g C$. При переходе к поиску источников пищи коэффициент затухания A должен обновляться на каждой итерации. При достижении нулевой температуры (например, в реальных условиях, когда температура склоняется к 30°C) поиск окрестностей источников пищи осуществляется с меньшей интенсивностью, а при приближении температуры к среднему значению в интервале [0, 1] проход окрестностей источников пищи осуществляется с большей интенсивностью. Рассмотрим этот факт по следующему уравнению [16]:

$$A_i^t = A_i^t \left[1 - \exp\left(\frac{-\alpha t}{T}\right) \right], \quad (4)$$

где T выводится из уравнения (3) и α является случайной величиной в интервале [0, 1], $\alpha = 0.95$ как фиксированный параметр, и t -шаг итерации.

Далее для каждого источника питания посылаются два рабочих крота, таким образом, количество источников питания составляет половину от числа рабочих кротов в колонии. После поиска продуктов их первоначальное качество и путь к ним сохранились в памяти. Возвращаясь в колонию, рабочие кроты, которые несут информацию об источниках пищи, делятся информацией с другими и с королевой. Найденные источники питания классифицируются с вероятностью P королевой в таблице, отсортированной от самых высоких до самых низких значений, на основе как качества этих источников питания, так и расстояние до источников питания из центра колонии. Вероятность P вычисляется следующим образом:

$$P_i = \frac{F_i = FS_i \cdot R_i}{\sum_{j=1}^n F_i}, \quad (5)$$

где F_i оценивается по используемым кротам, FS_i это показатель основного источника пищи, R_i это критерий минимального маршрута до источника пищи и N это количество источников пищи, которое составляет половину от числа рабочих кротов.

Перспективный источник пищи с наибольшей вероятностью выбирается королевой. Затем два рабочих крота, которые несут информацию об этом источнике пищи, отбираются для продвижения к источнику пищи. Добравшись до этого источника пищи, один из двух нанятых кротов, который является главой группы, случайным образом выбирает случайную рабочую особь и руководит процессом сбора пищи. Другой рабочий крот становится во главе другой группы и, выбрав несколько других особей, начинает обыскивать окрестности источника пищи. Все сопровождающие кроты будут нести информацию о наличии пищевых ресурсов в районе, прилегающем к основному источнику пищи. Процесс сбора пищи из продовольственных ресурсов и одновременный поиск их соседей позволит сократить время выхода на оптимальное решение при реализации предложенного алгоритма и, следовательно, повысить скорость поиска. Этот процесс повторяется для всех продовольственных ресурсов вместе с их окрестностями до тех пор, пока не останется ни одного продовольственного ресурса. Следует отметить, что поиск соседей в районе каждого источника питания осуществляется в разных направлениях. Направления находятся в 45 градусах друг от друга. Существует 8 направлений поиска соседей источника пищи.

Следующая часть реализации алгоритма включает в себя рассмотрение защиты колонии и предотвращения проникновения захватчиков в туннели. При реализации предложенного алгоритма те точки низкой стоимостью определяются на каждой итерации и рассматриваются как захватчики и исключаются из процесса реализации (т.е. не рассматриваются как члены всей колонии). Число исключенных точек в каждой итерации увеличивается по отношению к числу исключенных точек в предыдущей итерации на коэффициент. Он вычисляется по следующему уравнению [16]:

$$B_i^t = \varphi \cdot B_i^{t-1}, \quad (6)$$

где $\varphi \geq 1$ является фактором, который задается разработчиком и B_i^t – количество выбывших точек функции; i^{th} источник питания в итерации t .

Заметим, исключенные точки заменяются новыми случайно выбранными. Используя такую замену, осуществляется мутация в алгоритме, так что новые члены, имеющие новую информацию, предотвратят попадание алгоритма в ловушку локальных минимумов. Псевдокод алгоритма выглядит следующим образом:

Алгоритм 1 – Псевдокод алгоритма поведения колонии белых кротов

```

Begin
f(x), X = [x1, x2, ..., xN]^T // целевая функция
Xi, { i=1, L, N}, Bi, { i=1, ..., N}. // инициализация популяции.
Define  $\alpha, \beta, \varphi$ , // близкий сосед и дальний сосед от потенциального источника пищи.
while ( t < Максимальное количество итераций)
//Генерировать новое решение по уравнению (2).
    if ( rand < Ai ) // Выбор решения из числа наилучших решений по уравнению (5).
        //Создание локального решение (соседи вокруг источника пищи)
        end if
        Создание нового решения путем случайного поиска
        if ( rand < Bi & f(x_i^t) < f(x_optimum^t))
            //Анализ и сохранение нового решения в памяти крота
            end if // поиск новых решений в текущей итерации и сравните с решениями в предыдущей
        end
    while end (получите оптимальный отклик алгоритма)

```

Экспериментальные результаты. Для того чтобы оценить эффективность предложенного алгоритма по сравнению с другими введенными алгоритмами оптимизации, мы сравнили эффективность и точность алгоритма поведения колонии белых кротов с известными алгоритмами, описанными в этой работе. Для теста выбрана функция Розенброка. Для тестовой функций, 50 независимых запусков были применены различные случайные переменные для генерации случайных переменных, каждая из которых содержит 5000 итераций, и численность населения была установлена в 100 особей. Более 50 особей (размер > 50) производительность алгоритма оптимизации уменьшается потому, что алгоритм будет сталкиваться с несколькими оптимальными решениями. В этом случае необходимо распределить полученные решения в рассматриваемом пространстве, это также добавляет сложности при вычислении оптимального решения.

Рассмотрена производительность алгоритма колонии белых кротов и проведен сравнительный тест на функции Розенброка.

Каждый алгоритм был выполнен 50 независимых раз и каждый раз с различными случайными значениями для генерации случайных решений. На рис. 1 показан результат теста.

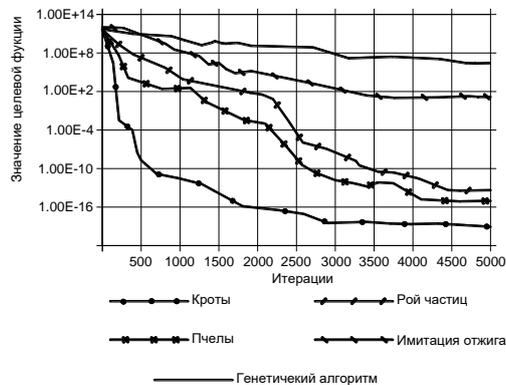


Рис. 3. Результат теста на функции Розенброка

Тест показал, что алгоритм колонии белых кротов имеет лучшую сходимость, чем другие алгоритмы оптимизации. Другими словами, это доказывает, что предложенный алгоритм имеет способность выхода из локального минимума в проблемном пространстве и достигает глобального минимума. Таким образом, за счет применения нового алгоритма, получаем лучшую производительность, используя предлагаемый алгоритм для оптимизации мультимодальных и многомерных функций и задач.

Заключение. Предложен новый метаэвристический алгоритм для решения глобальных оптимизационных задач. Новый алгоритм основан на социальном поведении слепых белых кротов в поиске источников пищи и защите колонии от вторжения. Проведен тест на функции Розенброка и полученные результаты по сравнению с другими оптимизационными алгоритмами. Тест показал лучшую производительность предложенного алгоритма.

Поддержка. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90151 и при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 437ГУЦЭС8-Д3/62058 от 05 октября 2020 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
2. Yang X-S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization // Stud. Comput. Intell. – 2010. – Vol. 284. – P. 65-74.
3. Данильченко В.И., Курейчик В.М. Генетический алгоритм планирования размещения СБИС // Известие ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 75-79.
4. Данильченко В.И., Курейчик В.М. Классификация и анализ методов решения задачи размещения СБИС // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2018. – Вып. 1.
5. Danilchenko V.I., Danilchenko Y.V., Kureichik V.M. Bio-inspired Approach to Microwave Circuit Design // IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM. EWDTs 2020. – P. 362-366. – DOI: 10.1109/EWDTs 50664.2020.9224737.
6. Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Добуш И.М., Бабак Л.И. Структурно-параметрический синтез СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов // Доклады ТУСУРа. – Декабрь 2012. – № 2 (26). – Ч. 2. – С. 104-112.

7. *Tang Maolin and Yao Xin.* A memetic algorithm for VLSI floorplanning // IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics–Part B: Cybernetics. – 2007. – No. 37 (1).
8. *Горяинов А.Е., Добуш И.М., Бабак Л.И.* Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P.
9. *Kokolov A.A., Salnikov A.S., Sheyerman F.I. and Babak L.I.* Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric MBaluns // Int. Conf. “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017 (accepted for publication).
10. *Akay B., Karaboga D.* A modified Artificial Bee Colony algorithm for real-parameter optimization // Inf. Sci. – 2010. – Vol. 192. – P. 20-142.
11. *Taherdangko M., Shirzadi M.H., Bagheri M.H.* A novel meta-heuristic algorithm for numerical function optimization: blind, naked mole-rats (BNMR) algorithm // Scientific Research and Essays. – 2012. – No. 7 (41). – P. 3566-3583.
12. *Bocklemann D.E. and Eisenstadt W.R.* Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – July 1995. – Vol. MTT-43, No. 7. – P. 520-523.
13. *Yang Y., Kamel M.S.* An aggregated clustering approach using multi-ant colonies algorithms // Pattern Recognition. – 2006. – Vol. 39 (7). – P. 1278-1289.
14. *Zhabin D.A., Garays D.V., Kalentyev A.A., Dobush I.M. and Babak L.I.* Automated Synthesis of Low Noise Amplifiers Using S-parameter Sets of Passive Elements // Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2017), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017 (accepted for publication).
15. *Kalentyev A.A., Garays D.V. and Babak L.I.* Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases // European Microwave Week 2014, Rome, Italy, October 2014. – P. 520-523.
16. *Babak L.I., Kokolov A.A. and Kalentyev A.A.* A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis // European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, November 2012. – P. 520-523.
17. *Mann G.K.I., Gosine R.G.* Three-dimensional min–max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning // Fuzzy Sets and Systems. – 2005. – Vol. 156. – P. 300-323.
18. *Голыцын Г.А. Петров В.М.* Информация и биологические принципы оптимальности: Гармония и алгебра живого. – М.: КомКнига 2005.
19. *Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.* Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учеб.-метод. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
20. *Abraham A., Grosan G., Ramos V.* Swarm Intelligence in Data Mining. – Berlin. Heidelberg: SpringerVerlag, 2007. – 267 p.

REFERENCES

1. *Tarasov V.B.* Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika [From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow: Editorial URSS, 2002, 352 p.
2. *Yang X-S.* A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, *Stud. Comput. Intell.*, 2010, Vol. 284, pp. 65-74.
3. *Danilchenko V.I., Kureychik V.M.* Geneticheskii algoritm planirovaniya razmeshcheniya SBIS [Genetic algorithm of VLSI placement planning], *Izvestie YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2, pp. 75-79.
4. *Danilchenko V.I., Kureychik V.M.* Klassifikatsiya i analiz metodov resheniya zadachi razmeshcheniya SBIS [Classification and analysis of methods for solving the VLSI placement problem], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Computer science, computer engineering and engineering education], 2018, Issue 1.
5. *Danilchenko V.I., Danilchenko Y.V., Kureichik V.M.* Bio-inspired Approach to Microwave Circuit Design, *IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM. EWDTS 2020*, pp. 362-366. DOI: 10.1109/EWDTS 50664.2020.9224737.
6. *Kalentyev A.A., Garays D.V., Dobush I.M., Babak L.I.* Strukturno-parametricheskii sintez SVCh tranzistornykh usiliteley na osnove geneticheskogo algoritma s ispol'zovaniem modeley monolitnykh elementov [Structural-parametric synthesis of microwave transistor amplifiers based on a genetic algorithm using models of monolithic elements], *Doklady TUSURa* [Reports of TUSUR], December 2012, No. 2 (26), Part 2, pp. 104-112.

7. *Tang Maolin and Yao Xin*. A memetic algorithm for VLSI floorplanning, *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics–Part B: Cybernetics*, 2007, No. 37 (1).
8. *Goryainov A.E., Dobush I.M., Babak L.I.* Postroenie parametricheskikh modeley passivnykh komponentov SVCh monolitnykh integral'nykh skhem s ispol'zovaniem programmy Extraction-P [Construction of parametric models of passive components of microwave monolithic integrated circuits using the Extraction-P program].
9. *Kokolov A.A., Salnikov A.S., Sheyerman F.I. and Babak L.I.* Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric MBaluns, *Int. Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017* (accepted for publication).
10. *Akay B., Karaboga D.* A modified Artificial Bee Colony algorithm for real-parameter optimization, *Inf. Sci.*, 2010, Vol. 192, pp. 20-142.
11. *Taherdangkoo M., Shirzadi M.H., Bagheri M.H.* A novel meta-heuristic algorithm for numerical function optimization: blind, naked mole-rats (BNMR) algorithm, *Scientific Research and Essays*, 2012, No. 7 (41), pp. 3566-3583.
12. *Bocklemann D.E. and Eisenstadt W.R.* Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, July 1995, Vol. MTT-43, No. 7, pp. 520–523.
13. *Yang Y., Kamel M.S.* An aggregated clustering approach using multi-ant colonies algorithms, *Pattern Recognition*, 2006, Vol. 39 (7), pp. 1278-1289.
14. *Zhabin D.A., Garays D.V., Kalentyev A.A., Dobush I.M. and Babak L.I.* Automated Synthesis of Low Noise Amplifiers Using S-parameter Sets of Passive Elements, *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2017), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017* (accepted for publication).
15. *Kalentyev A.A., Garays D.V. and Babak L.I.* Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases, *European Microwave Week 2014, Rome, Italy, October 2014*, pp. 520-523.
16. *Babak L.I., Kokolov A.A. and Kalentyev A.A.* A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis, *European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, November 2012*, pp. 520-523.
17. *Mann G.K.I., Gosine R.G.* Three-dimensional min–max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning, *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, Vol. 156, pp. 300-323.
18. *Golitsyn G.A. Petrov V.M.* Informatsiya i biologicheskie printsipy optimal'nosti: Garmoniya i algebra zhivogo [Information and biological principles of optimality: Harmony and algebra of the living]. Moscow: KomKniga 2005.
19. *Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B.* Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy: ucheb.-metod. Posobie [Modeling of systems. Dynamic and hybrid systems: an educational and methodological guide]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006.
20. *Abraham A., Grosan G., Ramos V.* Swarm Intelligence in Data Mining. Berlin. Heidelberg: SpringerVerlag, 2007, 267 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент Ю.П. Волощенко.

Данильченко Евгения Владимировна – Южный Федеральный университет; e-mail: lipkina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел: +79525691761; кафедра САПР.

Данильченко Владислав Иванович – e-mail: vdanilchenko@sfedu.ru; тел: +79526088561; кафедра САПР.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; тел: +79282132730; кафедра САПР; д.т.н.; профессор.

Danilchenko Yevgenia Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: lipkina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525691761; the department of computer-aided design.

Danilchenko Vladislav Ivanovich – e-mail: vdanilchenko@sfedu.ru; phone: +79526088561; the department of computer-aided design.

Kureichik Viktor Mikhailovich – e-mail: kur@tgn.sfedu.ru; phone: +79282132730; the department of computer-aided design; dr. of eng. sc.; professor.

Раздел III. Моделирование процессов и систем

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-141-150

Д.Е. Губарев, Ю.В. Юханов

РАЗРАБОТКА ЧЕТЫРЕХСТУПЕНЧАТОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА ДЛЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ

В рамках НИР «Линза» проводимой на предприятии АО «ТНИИС» разработана конструкция четырехступенчатой линзы Люнеберга на основе однородного ступенчатого диэлектрика, изготовлен макет с внешним диаметром 210 мм (материал диэлектрика полистирол ПТ-3 $\epsilon=2,6$), удовлетворяющий симфазности и равномерному амплитудному распределению лучей на выходе апертуры линзы. Ширина ДН составила от 10 -14 град. Уровень боковых лепестков на частотах f_w, f_{cp}, f_n не превышает -13 дБ по уровню, масса 0.3 кг. По этим параметрам на заданных частотах линза отличается от разработанных ранее аналогов. Цель работы разработать конструкцию и изготовить макет четырехступенчатой линзы Люнеберга на основе однородного ступенчатого диэлектрика, который будет по своим характеристикам не уступать зарубежным аналогам, что позволит обеспечить возможность импортозамещения. А также одной из целей работы — это упростить согласование такой линзы с фидерным трактом и приемопередающей аппаратурой, производство которой было бы экономически целесообразной по сравнению с аналогами. Также необходимо провести экспериментальное исследование диаграммообразующего устройства на основе данной линзы с целью получения диаграмм направленности центрального луча и в всех 7-ми выходных лучей линзы Люнеберга на заданных трех частотах.

Диаграмма направленности; линза Люнеберга (ЛЛ); диаграммообразующие устройства (ДОУ); антенная решетка; динамический диапазон.

D.E. Gubarev, Yu.V. Yukhanov

DEVELOPMENT OF A FOUR-STAGE LUNEBERG LENS FOR ANTENNA ARRAYS OF RADIO DIRECTORS

As part of the research and development work "Lens" carried out at the enterprise JSC "TNIIS", a design of a four-stage Luneberg lens was developed on the basis of a homogeneous stepped dielectric, a model with an external diameter of 210 mm was made (dielectric material PT-3 distribution of rays at the exit of the lens aperture. The width of the BP ranged from 10 -14 degrees. The level of side lobes at frequencies f_w, f_{av}, f_n does not exceed -13 dB in level, weight 0.3 kg. According to these parameters at the given frequencies, the lens differs from previously developed analogs. The purpose of the work is to develop a design and manufacture a model of a four-stage Luneberg lens based on a homogeneous stepped dielectric, which will not be inferior in its characteristics to foreign counterparts, which will provide the possibility of import substitution. And also one of the goals of the work is to simplify the coordination of such a lens with a feeder path and transceiver equipment, the production of which would be economically feasible in comparison with analogs. It is also necessary to conduct an experimental study of the beamforming device based on this lens in order to obtain the directional patterns of the central beam and in all 7 output beams of the Luneberg lens at the given three frequencies.

Directional diagram; Luneberg lens (LL); diagram-forming devices (DFD); antenna array; dynamic range.

Введение. Для осуществления приема-передачи электромагнитных волн одновременно в нескольких направлениях могут применяться устройства для фокусировки, такие как линза Люнеберга, представляющие собой сферическую, либо цилиндрическую линзы из диэлектрика, в которых диэлектрическая проницаемость является переменной и изменяется по следующему закону (1) [1].

$$\varepsilon(r) = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (1)$$

где r – расстояние от центра линзы; R – радиус сферы.

В [4–6] изложены принципы работы апертурных антенн с равномерным и косинусоидальным распределением амплитуды поля по апертуре. В статьях [1–7] показано как именно осуществляется возможность коррекции неравномерного фазового распределения по апертуре при помощи диэлектрической линзы.

В статье [8] авторов: А.М. Бобрешов, Г.К. Усков, П.А. Кретов, Н.А. Лысенко, Н.С. Сбитнев был предложен подход реализации сканирования луча и управление параметрами диаграммы направленности с помощью одной антенны. Описанный способ управления лучом, является более простым по исполнению с способами, предложенными в [4–6]. Он заключается в модификации ТЕМ-рупора таким образом, чтобы возникала возможность изменять направление главного лепестка его диаграммы направленности путем переключения нескольких входов антенны, каждый из которых соответствует конкретному направлению излучения. Основным недостатком является проблема фокусировки луча в двух плоскостях. Поэтому одной из задач статьи это исследовать способ, которым можно упростить согласование такой линзы с фидерным трактом и приемопередающей аппаратурой, при этом производство которого было бы экономически целесообразным.

В статьях [7–11] представлены результаты разработки и экспериментального исследования цилиндрической линзы Люнеберга сантиметрового и миллиметрового диапазона, выполненной средствами 3D печати, на основе однородного ступенчатого и перфорированного диэлектрика. Авторы статьи [9]: А.А. Кузиков, Р.С. Орехов, Ю.П. Саломатов, М.И. Сугак описывают способ изготовления линзы Люнеберга с помощью 3D-печати, что обеспечивает относительную дешевизну производства, а возможность регулировать процент заполнения слоя хорошо согласуется с требуемым характером структуры. Это является новым подходом в разработке линзовых структур. Однако в статьях [7–11] описаны линзы Люнеберга у которых уровень боковых лепестков выше по сравнению с четырех ступенчатой линзой на частотах f_v, f_{cp}, f_n описанной в данной работе. А также в статьях [7-10] нету описания расчета геометрии линзы и как именно осуществляется симфазность и равномерное амплитудное распределению лучей на выходе апертуры линзы.

На основании полученных данных из статей можно сделать вывод [1–13], что решением основных недостатков описанных линзовых структур является разработка новой упрощенной конструкции четырехступенчатой линзы Люнеберга на основе однородного ступенчатого диэлектрика для заданных частот f_v, f_{cp}, f_n , которая позволит обеспечить фокусировку луча в двух плоскостях, упростит согласование такой линзы с фидерным трактом и приемопередающей аппаратурой и производство которой было бы экономически целесообразной по сравнению с аналогами описанными в [1–13].

Расчет основных параметров линзы Люнеберга. У диэлектрической ЛЛ показатель преломления не является постоянным, а изменяется по некоторому закону в зависимости от расстояния от центра в сферических или от оси в цилиндрических линзах [1].

Коэффициент преломления сферической неоднородной линзы Люнеберга должен меняться по закону (2) [1]:

$$n = n_R \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} = n_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (2)$$

где n_R, n_0 – коэффициенты преломления соответственно при $r=R$ и при $r=0$, соответственно.

Чтобы минимизировать отражения и преломление на выходе линзы, коэффициент преломления выбирается [6] $n_R=1$. Для того, чтобы понимать, как именно должен изменяться закон преломления (2) наглядно показан ход лучей в линзе Люнеберга на рис. 1.

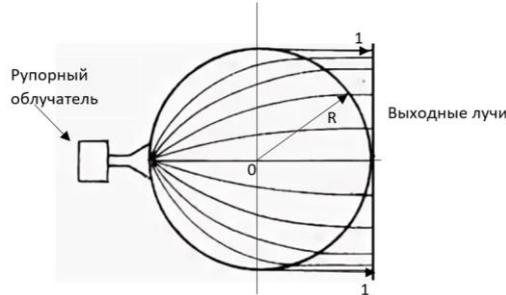


Рис. 1. Траектория лучей в линзе Люнеберга

Как видно, на выходе линзы получается параллельный пучок лучей. Данная линза позволяет изменять положение луча в пределах 360° без искажений диаграммы направленности при перемещении облучателя по поверхности сферы.

За основу разработки в данной работе бралась традиционная технология изготовления таких линз, связанных с разработкой набора сфер с n слоями, изменяющимся по закону (2), при изготовлении «дырчатых» (искусственных) диэлектриков [10].

Кроме того, при построении цилиндрических линз и формировании диаграмм направленности на горизонтальной и вертикальной или круговой поляризациях зависимость коэффициента преломления связана с длиной волны (λ). Закон изменения коэффициента преломления можно рассчитать по формуле (2) [9–12].

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\lambda}{2B_R}\right)^2}, \quad (2)$$

где v – расстояние между металлическими плоскостями (см. рис. 2);

ε – диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Были проведены исследования линзы Люнеберга, изготовленной по «дырчатой» технологии для частот $f_n=0.76*f_0$ ГГц, $f_{cp}=0.92*f_0$ ГГц, $f_v=1.38*f_0$ ГГц., где f_0 -центральная частота сантиметрового диапазона волн в котором проводился эксперимент. Проводилось это исследование при возбуждении наклонным (45°) открытым концом волновода [14, 15]. Данные исследования занесены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры линзы

f частота	Ширина ДН в град.	Уровень бок. лепестков в дБ	Коэффициент эллиптичности
f_v	10	-3	0.5
f_{cp}	10	-13	0.5
f_n	14	-13	0.16

Как видно из табл. 1, в коротковолновом диапазоне резко возрастает уровень боковых лепестков, причем в большей степени для горизонтальной поляризации, а в длинноволновом краю ухудшается соотношение поляризаций из-за различных фазовых скоростей в линзе для Н и Е волн. Диапазонность такой линзы составляет примерно 40%, при приемлемых параметрах. В литературе [9–11] описана линза Люнеберга, в которой фазовая скорость V_{ϕ} от радиуса линзы r изменяется с изменением расстояния (δ) между металлическими обкладками (рис. 2), однако как было обнаружено [6] диапазонные свойства такой линзы, будут такими же, как и для «дырочного» диэлектрика.

При исследовании линзы Люнеберга для Е волны мы получили метод расчета изменения коэффициента преломления за счет разной толщины диэлектрика $t(r)$, расположенного между двумя металлическими пластинами (рис. 2).

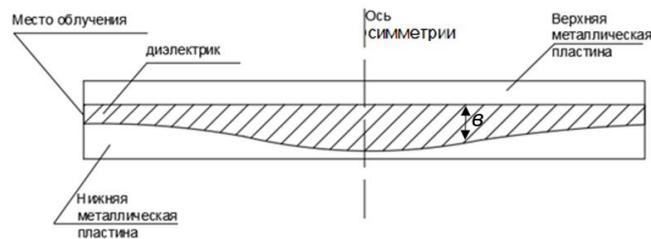


Рис. 2. Продольное сечение цилиндрической линзы Люнеберга

Рассматривая данную систему как конденсатор с двойным диэлектриком, можно определить эффективное значение диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{эф}}$ [9, 10].

$$C_{\text{эф}} = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2}, \quad (3)$$

где

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 * S}{4\pi t_1} \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{\epsilon_2 * S}{4\pi t_2},$$

где t_1 – толщина линзы;

t_2 – расстояние в центре зазора между диэлектриком и металлической поверхностью (см. рис. 3).

После подстановки получим [9]:

$$\epsilon_{\text{эф}} = t * \left[\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{t_1(\epsilon_2 - \epsilon_1) + \epsilon_1 t_1} \right]. \quad (4)$$

С другой стороны, $\epsilon_{\text{эф}}$ для линзы Люнеберга равно (5) [10]:

$$n = \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \quad (5)$$

при $n_R=1$

Приравнявая уравнения (4) и (5), обозначив $\left[2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] = a$ и приняв $\epsilon_2=1$, получим толщину диэлектрика t_1 (см.рис. 3), равную:

$$t_1 = \frac{a-1}{\epsilon-1} * \frac{\epsilon_1}{a} * t. \quad (6)$$

Формула (6) получена впервые. В соответствии с уравнением (6) была изготовлена линза. В качестве диэлектрика был использован полистирол ПТ-3 ($\epsilon_1=2,6$) [16]. Из уравнения (6) видно, что параметры линзы не зависят от частоты [17, 18].

Основываясь на формулах (4–6), показано, что в разработанной линзе закон изменения коэффициента преломления выполнялся за счет разной толщины диэлектрика в зависимости от радиуса r , диэлектрик был выполнен дискретно 4-мя ступенями, показанный на рис. 3, при расстоянии между обкладками 13 мм. Расстояние в центре зазора между диэлектриком и металлической поверхностью составил 6 мм.

Данное конструкторское решение позволило получить максимум диэлектрической проницаемости в центре линзы и минимум на ее краях. Это так же позволило получить симфазность лучей на выходе апертуры линзы и равномерное амплитудное распределение.

Внешний диаметр составил 210 мм, зная диаметр линзы минимальный разнос излучателей между друг другом составил 15° , а максимальное количество облучателей 7. Возбуждалась линза 7 открытыми концами волновода 23×10 мм (рис. 3).

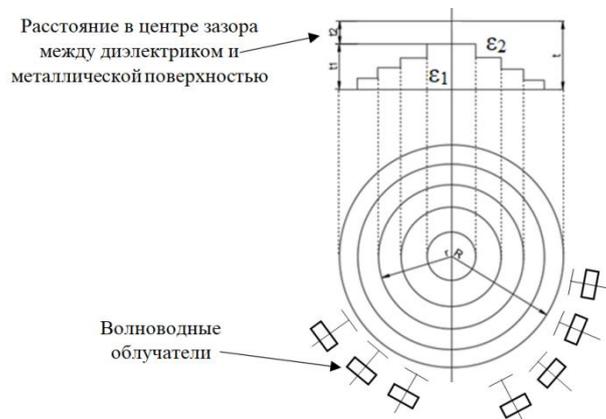


Рис. 3. Ступенчатая линза Люнеберга

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 4. Для настройки антенны использовался генератор аналоговых сигналов E8257D-540, кронштейн для закрепления антенны, антенна измерительная типа П6-128 [19]. Расстояние между антеннами составляет 10 м. Платформа вращалась в пределах $\pm 80^\circ$. Точность установки платформы $\pm 1^\circ$. Угловая скорость вращения платформы может устанавливаться в пределах от 0,6 до 12 град/сек.

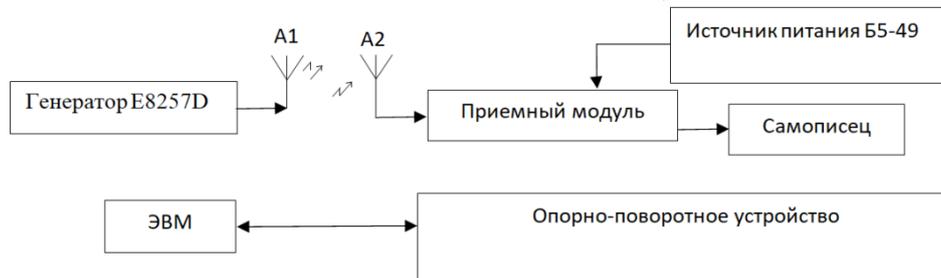


Рис. 4. Структурная схема экспериментальной установки

На этом рисунке обозначено:

A1-измерительная излучающая антенна типа П6-128 [19];

A2-Измеряемая многолучевая антенна.

В качестве приемника использован приемник прямого усиления М42135 6Ш2.030.273ТУ.

На рис. 5 представлена диаграмма направленности центрального луча в горизонтальной плоскости на f_v -верхней частоте, на рис. 6–9 ДН в горизонтальной плоскости для 7-ми входов линзы и Д.Н. в вертикальной плоскости для f_n , f_{cp} , f_v , где на оси Оу отложен уровень ДН в дБ [12, 14, 15].

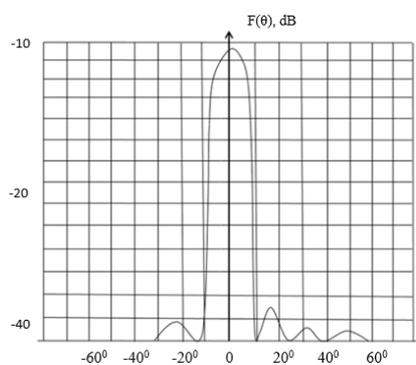


Рис. 5. ДН в горизонтальной плоскости на f_v для центрального луча

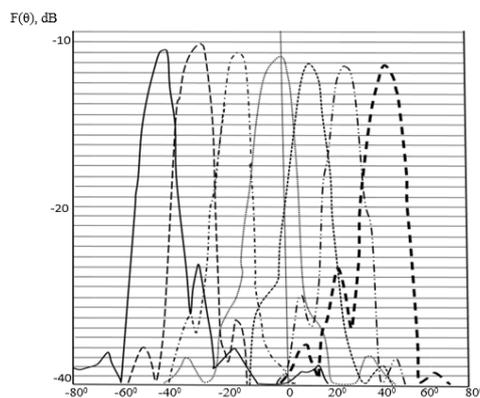


Рис. 6. ДН в горизонтальной плоскости для 7-ми входов линзы Люнеберга на f_n

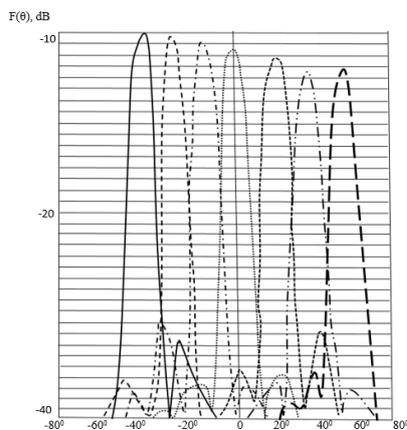


Рис. 7. Д.Н. в горизонтальной плоскости для 7-ми входов линзы Люнеберга на f_{cp}

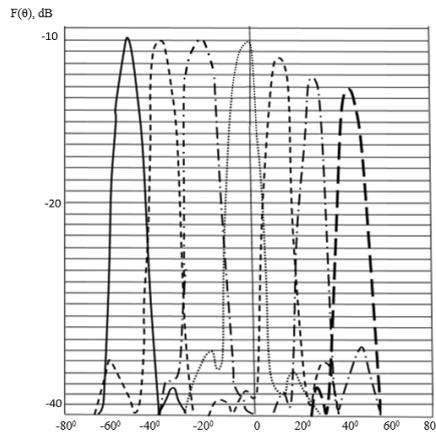


Рис. 8. Д.Н. в горизонтальной плоскости для 7-ми входов линзы Лунеберга на f_v

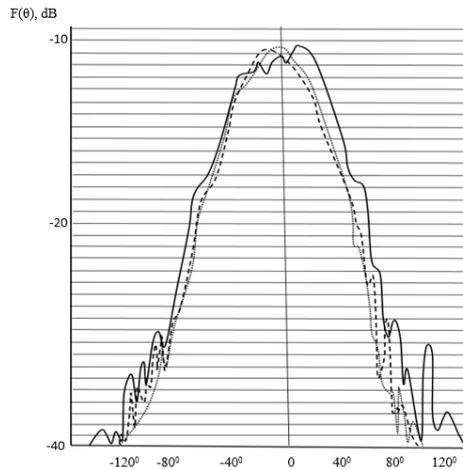


Рис. 9. Д.Н. в вертикальной плоскости $-f_n$, f_{cp} , $--f_v$. (см. табл. 1)

Как видно из диаграмм направленности при сканировании уровень пересечения соседних лучей изменяется от 0,1 до 0,4, что связано с большими размерами возбуждающих волноводов. Для обеспечения требуемого пересечения скажем не хуже 3дБ необходимо использовать по две таких линзы, расположенных друг над другом или рядом с разворотом осей диаграмм направленности друг относительно друга.

Основные отличия такой линзы от аналогов [1-13] состоит в следующем:

1. Уровень боковых лепестков на частотах f_v, f_{cp}, f_n не превышает -13 дБ по уровню.
2. Позволяет обеспечить фокусировку луча в двух плоскостях.
3. Ширина ДН составила от 10 -14 град.
4. Масса конструкции 0.3 кг.

Заключение. Как видно из рис. 5–9 симфазность лучей на выходе апертуры линзы и равномерное амплитудное распределение сохраняется. При разработке радиооптической ЛЛ были рассчитаны основные параметры и предложена конструкция четырехступенчатой линзы «Е» и «Н» поляризации со ступенчатым ди-

электриком для использования в радиопеленгаторах. Были получены характеристики, позволяющие использовать такую линзу для построения многолучевых антенных решеток.

Разработана конструкция четырехступенчатой линзы Лüneберга на основе однородного ступенчатого диэлектрика, изготовлен макет с внешним диаметром 210 мм (материал диэлектрика полистирол ПТ-3 $\epsilon=2,6$), удовлетворяющий симфазности и равномерному амплитудному распределению лучей на выходе апертуры линзы. Ширина ДН составила от 10 -14 град. Уровень боковых лепестков на частотах f_b, f_{cp}, f_n не превышает -13 дБ по уровню, масса 0.3 кг.

При необходимости сканирования 360° может быть использована схема с двумя линзами, включенными совместно через направленные ответвители с коэффициентом ответвления мощности 0,5 Вт. Конструктивно направленные ответвители выполняются в виде двух связанных линий передачи [20, 21].

В процессе дальнейших работ необходимо провести исследование с помощью возбудителя с малыми размерами: вибратор, волновод, заполненный диэлектриком, и т.д. А также изучить влияние взаимных связей таких возбудителей на параметры линзы Лüneберга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wu X., Laurin J.-J. Fan-Beam Millimeter-Wave Antenna Design Based on the Cylindrical Luneberg Lens // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – September 2007. – Vol. 55 (8). – P. 2147-2156.
2. Park Y. and Wiesbeck W. Angular Independency of a Parallel-Plate Luneburg Lens with Hexagonal Lattice and Circular Metal Posts // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – February 2002. – No. 1 (1). – P. 128-130.
3. Fuchs B., Le Coq L., Lafond O. Design Optimization of Multishell Luneburg Lenses // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2014. – Vol. 55, No. 2.
4. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. – М.: Советское радио, 1974. – 280 с.
5. Гладышев В.О., Терешин А.А. Линза Лüneберга В подвижной системе координат. – 2016.
6. By Ollie Holt. Technology Survey a Sampling of RWRs and ESM Systems // The Journal Electronic Defense, Yune 2015. – P. 39-46.
7. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
8. Бобришов А.М., Усков Г.К., Кретов П.А., Лысенко Н.А., Сбитнев Н.С. Многолучевая ТЕМ-рупорная антенна с формированием направления линзой Лüneберга.. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГУ», 2018.
9. Кузиков А.А., Орехов Р.С., Саломатов Ю.П., Сугак М.И. Исследование печатной цилиндрической линзы Лüneберга // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018.
10. Конструкции антенн на основе линзы Лüneбурга. – 2018. – URL: <http://farragsat.meximas.com/homearab.html>.
11. Ахияров В.В., Калошин В.А., Никитин Е.А. Исследование широкополосных планарных линз Лüneбурга // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 1.
12. Ашихмин А.В., Негрбов В.В., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М. Исследование конструкций сверхширокополосных излучающих структур на основе плоской линзы Лüneберга // Радиотехника. – 2012. – № 5. – С. 14-17.
13. Дьяченко П.Н. Градиентная фотонно-квизикристаллическая линза Лüneберга // Сб. докладов Молодежной научной школы по нанофотонике (30 июня 2012 г.) 20-го международного конгресса Nanostructures: Physics and Technology.
14. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Антенно-фидерные устройства. Ч. 2. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1959.
15. Фрадин А.З. Антенны СВЧ. – М.: Сов.радио, 1957.
16. Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н и др. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.

17. *Morgan S.P.* General Solution of the Luneberg Lens Problem // *J. Appl. Phys.* – 1958. – Vol. 29, No. 9. – P. 1358.
18. *Панченко Б.А., Денисов Д.В., Мусин А.М., Скумошенко И.О.* Тензорные функции Грина для расчета электромагнитных полей от слоистых сферических структур // *Вестник СибГУТИ.* – 2016. – № 2. – С. 18-24.
19. *Асламбеков В.В., Горин А.М., Гринько Е.А.* Многолучевая линзовая антенна с плоской защитной диафрагмой // *Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия ОВР.* – 2015. – Вып. № 1. – С. 64-69.
20. *Ахияров В.В., Калошин В.А., Никитин Е.А.* Исследование широкополосных планарных линз Лüneбурга // *Журнал радиоэлектроники.* – 2014. – № 1.
21. *Garcia-Ortiz C.E., Cortes R., Gómez-Correa J.E., Pisano E., Fiutowski J., Garcia-Ortiz D.A., Ruiz-Cortes V., Rubahn H.-G., and Coello V.* Plasmonic metasurface Luneburg lens // *Photonics Research.* – October 2019. – No. 7 (10).

REFERENCES

1. *Wu X., Laurin J.-J.* Fan-Beam Millimeter-Wave Antenna Design Based on the Cylindrical Luneberg Lens, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, September 2007, Vol. 55 (8), pp. 2147-2156.
2. *Park Y. and Wiesbeck W.* Angular Independency of a Parallel-Plate Luneburg Lens with Hexagonal Lattice and Circular Metal Posts, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, February 2002, No. 1 (1), pp. 128-130.
3. *Fuchs B., Le Coq L., Lafond O.* Design Optimization of Multishell Luneburg Lenses, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2014, Vol. 55, No. 2.
4. *Zelkin E.G., Petrova R.A.* Linzovye anteny [Lens antennas]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 280 p.
5. *Gladyshev V.O., Tereshin A.A.* Linza Lyuneberga V podvizhnoy sisteme koordinat [The Luneberg lens in a movable coordinate system], 2016.
6. *By Ollie Holt.* Technology Survey a Sampling of RWRs and ESM Systems, *The Journal Electronic Defense*, Yune 2015, pp. 39-46.
7. *Zhuk M.S., Molochkov Yu.B.* Proektirovanie linzovykh, skaniruyushchikh, shirokodiapazonnykh antenn i fidernykh ustroystv [Design of lens, scanning, wide-band antennas and feeder devices]. Moscow: Energiya, 1973, 440 p.
8. *Bobreshov A.M., Uskov G.K., Kretov P.A., Lysenko N.A., Sbitnev N.S.* Mnogoluchevaya TEM-rupornaya antenna s formirovaniem napravleniya linzoy Lyuneberga [Multipath TEM-horn antenna with direction shaping by a Luneberg lens]. Voronezh: FGBOU VO «VGU», 2018.
9. *Kuzikov A.A., Orekhov R.S., Salomatov Yu.P., Sugak M.I.* Issledovanie pechatnoy tsilindricheskoy linzy Lyuneberga [Investigation of the printed cylindrical lens of Luneberg], *Elektronika i mikroelektronika SVCh* [Electronics and microelectronics of microwave], 2018.
10. *Konstruktsii antenn na osnove linzy Lyuneberga* [Antenna designs based on the Luneberg lens], 2018. Available at: <http://farragsat.meximas.com/homearab.html>.
11. *Akhiyarov V.V., Kaloshin V.A., Nikitin E.A.* Issledovanie shirokopolosnykh planarnykh linz Lyuneberga [Investigation of broadband planar lenses of Luneberg], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radioelectronics], 2014, No. 1.
12. *Ashikhmin A.V., Negrobov V.V., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M.* Issledovanie konstruktsiy sverkhshirokopolosnykh izluchayushchikh struktur na osnove ploskoy linzy Lyuneberga [Investigation of designs of ultra-wideband radiating structures based on a flat Luneberg lens], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2012, No. 5, pp. 14-17.
13. *D'yachenko P.N.* Gradientnaya fotonno-kvazikristallicheskaya linza Lyuneberga [Gradient photonic-quasi-crystalline lens of Luneberg], *Sb. dokladov Molodezhnoy nauchnoy shkoly po nanofotonike (30 iyunya 2012 g.) 20-go mezhdunarodnogo kongressa Nanostructures: Physics and Technology* [Collection of reports of the Youth Scientific School on Nanophotonics (June 30, 2012) of the 20th International Congress of Nanostructures: Physics and Technology].
14. *Fel'd Ya.N., Benenson L.S.* Antenno-fidernye ustroystva [Antenna-feeder devices]. Part 2. Moscow: VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1959.
15. *Fradin A.Z.* Antenny SVCh [Microwave antennas]. Moscow: Sov.radio, 1957.
16. *Bakharev S.I., Vol'man V.I., Lib Yu.N i dr.* Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv [Handbook on the calculation and design of microwave strip devices], ed. by V.I. Vol'mana. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 328 p.

17. *Morgan S.P.* General Solution of the Luneberg Lens Problem, *J. Appl. Phys.*, 1958, Vol. 29, No. 9, pp. 1358.
18. *Panchenko B.A., Denisov D.V., Mucin A.M., Skumotenko I.O.* Tenzornye funktsii Grina dlya rascheta elektromagnitnykh poley ot sloistykh sfericheskikh struktur [Green tensor functions for calculating electromagnetic fields from layered spherical structures], *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2016, No. 2, pp. 18-24.
19. *Aslambekov V.V., Gorin A.M., Grin'ko E.A.* Mnogoluchevaya linzovaya antenna s ploskoy zashchitnoy diafragmoy [Multipath lens antenna with a flat protective diaphragm], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya OVR* [Questions of special radio electronics. OVR Series], 2015, Issue No. 1, pp. 64-69.
20. *Akhiyarov V.V., Kaloshin V.A., Nikitin E.A.* Issledovanie shirokopolosnykh planarnykh linz Lyuneburga [Investigation of broadband planar lenses of Luneburg], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2014, No. 1.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

Губарев Дмитрий Егорович – Южный федеральный университет; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра АиРПУ; аспирант.

Юханов Юрий Владимирович – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; кафедра АиРПУ; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Gubarev Dmitriy Egorovich – Southern Federal University; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; the department of A&RPU; Taganrog, Russia; post-graduate student.

Yukhanov Yuriy Vladimirovich – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; the department of A&RPU; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 617.7; 535.34; 539.211

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-150-159

З.А. Коков, О.А. Молоканов, Л.О. Карданова, М.Р. Кушхов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ

Производители интраокулярных линз постоянно совершенствуют параметры искусственных хрусталиков, функционально приближая их к природному аналогу. В работе проведено экспериментальное исследование ряда важных физико-технических параметров интраокулярных линз ведущих мировых производителей, влияющих на качество зрения оперированных пациентов. Были исследованы спектры пропускания оптического излучения интраокулярных линз в диапазоне 200–800 нм. В коротковолновой части результаты измерений показали высокую эффективность защитных свойств интраокулярных линз от ультрафиолетового излучения. Показано, что излучение с длиной волны до 350 нм полностью поглощается материалом линзы, а пропускание волн с длиной 400 нм составляет 20 %. Далее до длины волны 550 нм наблюдается рост коэффициента пропускания исследуемой интраокулярной линзы до 100 %, после чего плавно снижается к концу видимого диапазона до 85 %. В работе также исследовано влияние качества обработки поверхности интраокулярных линз на вероятность развития вторичной катаракты в отдаленном периоде. Согласно послеоперационной статистике, вероятность возникновения вторичной катаракты достигает 20–35 %. Появление областей оптической непрозрачности обусловлено различными факторами, одним из которых – качество обработки поверхности интраокулярных линз. Гладкость поверхностного профиля линзы зависит от модели, технологии изготовления и материала искусственного хрусталика. Исследование качества обработки поверхности мягких и жестких интраокулярных линз было проведено методом атомно-силовой силовой микроскопии. Анализ результатов сканирования поверхности интраокулярных линз и проведенный статистический анализ 630 клинических случаев возникновения вторичной катаракты в отдаленном послеоперационном периоде (6 месяцев и

больше) показали их взаимосвязь. В случае увеличения высоты неровностей (выступов) на поверхности линз до 70 нм и более, вероятность возникновения вторичной катаракты в послеоперационный период возрастает с 6 до 15 %.

Атомно-силовая микроскопия; интраокулярная линза; катаракта; оптический спектр пропускания; шероховатость поверхности.

Z.A. Kokov, O.A. Molokanov, L.O. Kardanova, M.R. Kyshkhov

STUDY OF OPTICAL TRANSMISSION SPECTRA AND SURFACE TREATMENT PARAMETERS OF INTRAOCULAR LENSES

Manufacturers of intraocular lenses are constantly improving the parameters of artificial lenses, functionally bringing them closer to their natural counterpart. In this work, an experimental study of a number of important physical and technical parameters of intraocular lenses of the world's leading manufacturers, affecting the quality of vision of operated patients, was carried out. The transmission spectra of optical radiation of intraocular lenses in the range of 200–800 nm were investigated. In the short-wavelength part, the measurement results showed a high efficiency of the protective properties of intraocular lenses from ultraviolet radiation. It is shown that radiation with a wavelength of up to 350 nm is completely absorbed by the lens material, and the transmission of waves with a wavelength of 400 nm is 20 %. Further, up to a wavelength of 550 nm, an increase in the transmittance of the studied intraocular lens to 100 % is observed, after which it gradually decreases to the end of the visible range to 85%. The work also investigated the influence of the quality of the surface treatment of intraocular lenses on the likelihood of secondary cataract development in the long-term period. According to postoperative statistics, the likelihood of secondary cataract is 20–35 %. The appearance of areas of optical opacity is due to various factors, one of which is the quality of the surface treatment of intraocular lenses. The smoothness of the surface profile of the lens depends on the model, manufacturing technology and material of the artificial lens. The study of the quality of surface treatment of soft and hard intraocular lenses was carried out by atomic force microscopy. An analysis of the results of scanning the surface of intraocular lenses and a statistical analysis of 630 clinical cases of secondary cataract in the long-term postoperative period (6 months or more) showed their relationship. If the height of irregularities (protrusions) on the lens surface increases to 70 nm or more, the likelihood of secondary cataract in the postoperative period increases from 6 to 15 %.

Atomic force microscopy; cataracts; intraocular lens; optical transmittance spectrum; surface roughness.

Введение. Хрусталик в оптической системе зрительного аппарата человека играет важнейшую роль. При всей сложности строения и функций глаза, с оптической точки зрения глаз можно рассматривать как природный аналог фотокамеры, в котором хрусталик выполняет функцию фокусирующей линзы (объектива). Устройство человеческого глаза схематически показано на рис. 1 [1].

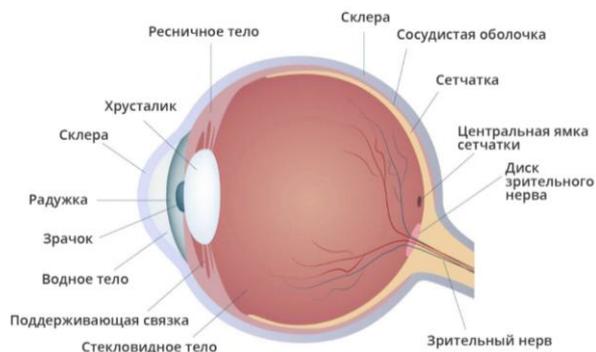


Рис. 1. Строение глаза человека

Наиболее часто из встречаемых заболеваний органа зрения в старшем возрасте является катаракта, при которой наблюдается частичное или полное помутнение хрусталика глаза и, как следствие, потеря светового потока и четкости изображения на сетчатке [2, 3]. Возникающая в силу возрастных изменений [4] и ряда патологических процессов [5] деградация хрусталика приводит к катастрофическому и необратимому снижению качества зрения.

Из рис. 1 видно, что анатомическое устройство глаза и пространственное положение хрусталика позволяет ставить вопрос, в случае необходимости, о замене естественной биологической линзы прозрачным биологически совместимым полимерным имплантом [6, 7], который мог бы выполнять оптическую функцию естественного хрусталика.

Первая операция по имплантации интраокулярной линзы (ИОЛ) была выполнена 29 ноября 1949 года Гарольдом Ридли (Harold Ridley) [6]. В настоящее время в мире ежегодно проводится десятки миллионов операций по имплантации интраокулярных линз (ИОЛ) [8]. В отличие от естественного хрусталика, ИОЛ не может изменять свое фокусное расстояние. Преодолеть этот недостаток позволило создание бифокальных и мультифокальных линз [9, 10]. В качестве материала для изготовления ИОЛ используется различные оптически прозрачные полимерные материалы – твердые линзы создаются на основе полиметилметакрилата [6, 11, 12], полумягкие на основе акрилов [12, 13], а мягкие на основе силиконов [11, 14].

Производители ИОЛ постоянно совершенствуют параметры искусственных хрусталиков, приближая их к природному аналогу. Интраокулярные линзы различаются по конструкции, материалу, оптическим свойствам, наличию фильтров, способности формировать один или несколько фокусов, типу имплантации и расположению внутри глаза.

Объекты исследования. В работе проведено экспериментальное исследование важных физико-технических параметров, влияющих на качество зрения прооперированных пациентов, для ИОЛ ведущих зарубежных производителей (табл. 1). Были изучены:

- 1) спектр пропускания на спектрофотометре СФ-26;
- 2) профиль поверхности (качества обработки) на сканирующем микроскопе Solver P47 [15].

Таблица 1

Набор исследованных ИОЛ

№	ИОЛ	Производитель	Примечание
1.	Bi-Flex HB 877 FAB - 877 FABY	MEDICONTUR (Швейцария)	однокомпонентная асферическая
2.	MX-60	enVista (США)	монофокальная безабберрационная асферическая
3.	ADAPT AO	AKREOS (США)	монофокальная безабберрационная асферическая
4.	MI60 AO	AKREOS (США)	двояковыпуклая асферическая
5.	Z-Flex 860FAB - 860FABY Monofocal	MEDICONTUR (Швейцария)	двояковыпуклая асферическая
6.	Torica aAY	HumanOptics AG (Германия)	моноблочная торическая асферическая

Исследование спектра пропускания. Изучение спектра пропускания интраокулярной линзы проводилось с помощью спектрофотометра СФ-26 [16]. Спектральная область исследования с коротковолновой стороны ограничивалась спектральной границей поглощения ультрафиолетового излучения атмосферой, в которой излучение с длиной волны короче 200 нм полностью поглощается кислородом. С длинноволновой стороны спектр изучался до 800 нм, поскольку красная граница чувствительности человеческого глаза составляет ~ 760 нм. Таким образом, исследование включало область спектра от ближней ультрафиолетовой до ближней инфракрасной. Спектрофотометр СФ-26 обеспечивает нормальное падение светового пучка на образец. Входная и выходная щели спектрометра конструктивно составляют одно целое, и в измерениях их ширина устанавливалась равной 0,5 мм для синей части и 0,1 мм для остальной части исследуемого спектра.

Интраокулярная линза до исследования хранилась в заводской упаковке. После разгерметизации заводской упаковки исследуемый образец помещался в специально изготовленную кассету, которая устанавливалась в держатель образцов в камере объектов. В ходе измерений время пребывания образца вне заводской среды хранения не превысило 60 минут.

Нами проведено исследование [17] спектра пропускания интраокулярной линзы TORICA-aAY HumanOptics AG [18]. На рис. 2 приведен спектр пропускания указанной выше линзы. Как видно из рисунка, излучение с длиной волны до 350 нм полностью поглощается материалом линзы, а пропускание волн с длиной 400 нм составляет 20 %. Далее до длины волны 550 нм наблюдается рост коэффициента пропускания исследуемой интраокулярной линзы до 100 %, после чего плавно снижается к концу видимого диапазона до 85 %.

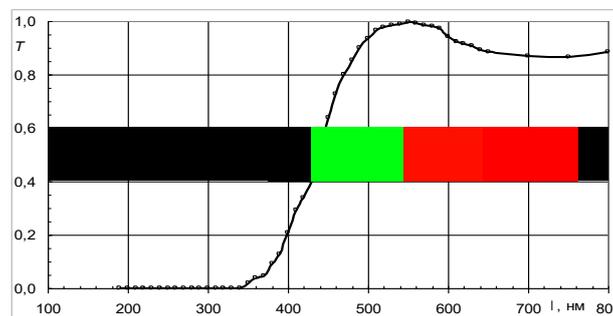


Рис. 2. Спектр пропускания интраокулярной линзы TORICA-aAY HumanOptics AG

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных измерений можно сделать вывод, что материал исследованной интраокулярной линзы TORICA-aAY HumanOptics AG достаточно эффективно защищает сетчатку и другие структуры глаза от деструктивного действия ультрафиолетового излучения. В то же время коэффициент пропускания изученной интраокулярной линзы в видимой части спектра составляет не менее 85 %, а в центральной части, вблизи максимума кривой относительной чувствительности человеческого зрения ослабляющее действие ИОЛ не проявляется совсем.

Исследование качества обработки поверхности ИОЛ методом СЗМ. Согласно послеоперационной статистике, после имплантации ИОЛ могут возникать осложнения в виде помутнения (непрозрачности) задней части капсулы хрусталика [19]. Это проявление так называемой вторичной катаракты, вероятность возникновения которой достигает 20–35 %. Появление областей оптической непрозрачности обусловлено различными факторами. Частота возникновения вторичной

катаракты после операции во многом зависит от модели, технологии изготовления и материала искусственного хрусталика. Важным фактором является качество обработки (поверхностной морфологии) ИОЛ.

На базе ООО Глазной клиники «ЛЕНАР» им. академика С.Н. Федорова (КБР, г. Нальчик) нами было проведено исследование качества обработки поверхности интраокулярных линз методом атомно-силовой микроскопии на отечественном сканирующем микроскопе Solver P47 компании NT-MDT в полуконтактном режиме сканирования [20, 21]. Были исследованы как жесткие (Appalens, Storz), так и мягкие (IDEA, CENTAFLEX, AcrySof Natural, AcrySof MultiPiece) интраокулярные линзы.

Проведенная серия сканирований выявила, что для различных ИОЛ высоты неровностей поверхности могут сильно варьироваться. Поверхности мягких линз оказались более гладкими по сравнению с поверхностями жестких интраокулярных линз.

Так, передняя поверхность линзы компании Storz наиболее гладкая, в отличие от Appalens. Высоты выступов в случае линзы Storz достигают 60 нм, в случае линзы Appalens достигают 100 нм, кроме того, число резких выступов на единицу поверхности в 7–8 раз больше во втором случае.

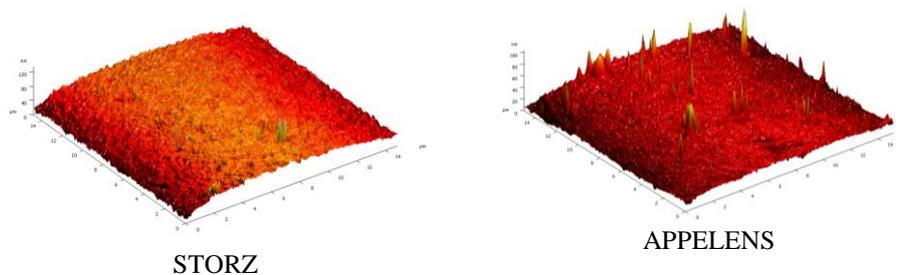


Рис. 3. Сканы передней поверхности жестких ИОЛ

Задние поверхности жестких линз имеют большую шероховатость. Высоты выступов достигают 200–250 нм. При этом худшие показатели вновь у линзы Appalens. На линзах обоих производителей обнаружены характерные дугообразные полосы в виде гряд высотой 40–50 нм и протяженностью 400 нм.

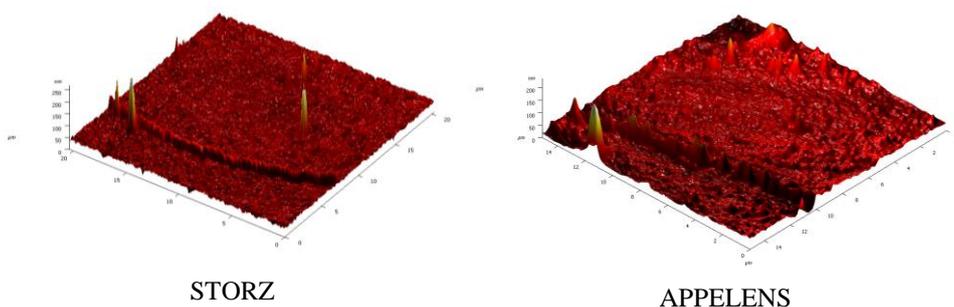


Рис. 4. Сканы задней поверхности жестких ИОЛ

В случае мягких линз, наиболее качественно обработаны поверхности линзы IDEA. Высоты выступов на передней и задней поверхностях не превышают 25 нм. Высоты шероховатостей передних поверхностей линз AcrySof Natural и AcrySof MultiPiece достигают 30 нм. Причем число резких выступов на единицу площади

гораздо больше в случае линз AcrySof MultiPiece. Задняя поверхность линзы AcrySof Natural (выступы до 30 нм) более гладкая чем задняя поверхность линзы AcrySof MultiPiece (выступы до 40 нм).

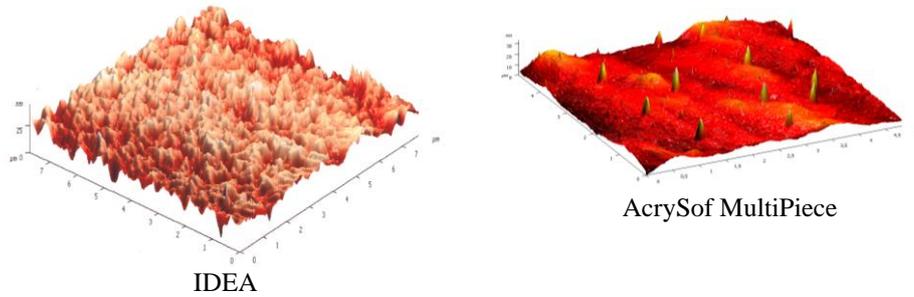


Рис. 5. Сканы передней поверхности мягких ИОЛ

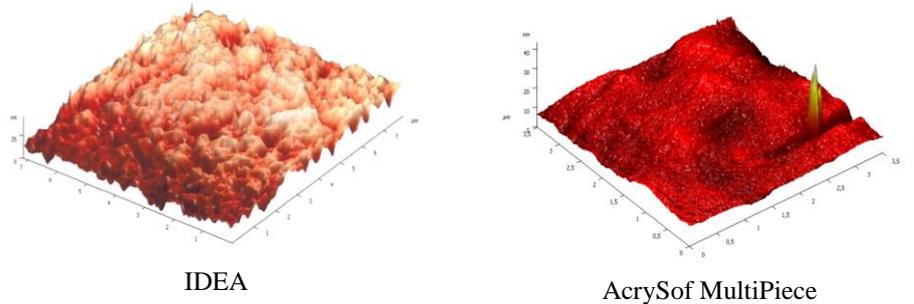


Рис. 6. Сканы задней поверхности мягких ИОЛ

Поверхности линзы CENTAFLEX имеют наибольшую шероховатость: высоты выступов на передней поверхности достигают 40 нм, на задней – 60 нм.

Таким образом, из представленных образцов наиболее гладкая поверхность у линз компании IDEA, а наименее – у линзы Appalens.

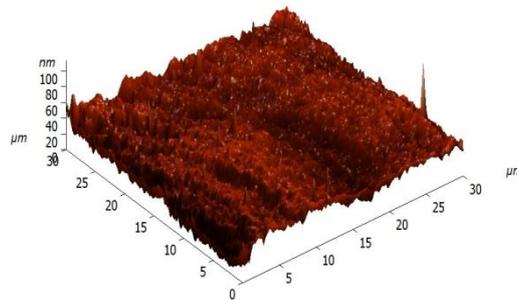


Рис. 7. Скан передней стенки ИОЛ Torica aY компании HumanOptics AG

На рис. 7 приведен профиль передней поверхности более современной акриловой ИОЛ Torica aY компании HumanOptics AG, площадь сканирования 30×30 мкм. Высоты неровностей профиля линзы находятся в пределах 65 нм, что говорит о достаточно хорошей технологии обработки поверхности линзы, применяемой при ее изготовлении

Статистическая обработка медицинских карт. Совместно с сотрудниками ГК «ЛЕНАР» было изучено и обработано более 15 000 медицинских карт пациентов. Выявлено 630 клинических случаев возникновения вторичной катаракты у больных, которым были имплантированы указанные в табл. 2 интраокулярные линзы.

Таблица 2

Распределение клинических случаев вторичной катаракты от вида ИОЛ

ИОЛ	Жесткие		Мягкие			
	Appalens	Storz	IDEA	CENTAFLEX	AcrySof Natural	AcrySof MultiPiece
Число случаев вторичной катаракты	60	60	250	100	100	60

Анализ клинических данных показал, что наиболее часто вторичная катаракта возникала после имплантации жесткой интраокулярной линзы Appalens – в 15 % случаев (рис. 8). Развитие вторичной катаракты в случае имплантации линзы Storz было обнаружено только в 6,7 % случаев.

Среди эластичных линз наихудшие показатели у хрусталика CENTAFLEX – вторичная катаракта развилась в 1,7 % случаев. Реже всего вторичная катаракта возникала после имплантации интраокулярной линзы IDEA – 0,8 % случаев. После имплантации линзы AcrySof Natural вторичная катаракта была обнаружена в 1 % случаев. У пациентов с имплантацией линзы AcrySof MultiPiece осложнения были выявлены в 2 % случаев.

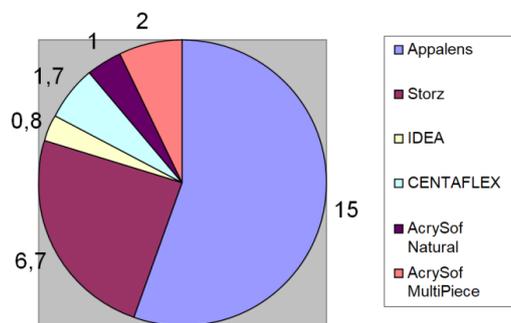


Рис. 8. Частота развития вторичной катаракты после имплантации ИОЛ различных производителей (%)

Таким образом, наиболее редко вторичная катаракта развивалась у пациентов с имплантацией линзы IDEA, чаще возникала после имплантации линзы Appalens. Отметим также, что прослеживается прямая зависимость между качеством обработки поверхностей ИОЛ и их стоимостью. Чем выше стоимость, тем лучше качество обработки поверхности, и, следовательно, реже возникает послеоперационное осложнение. Так, например, стоимость жесткой ИОЛ фирмы Appalens меньше ИОЛ Storz почти в 2 раза.

Выводы. Результаты экспериментальных измерений спектра пропускания интраокулярных линз позволяют сделать вывод, что материал исследованных линз достаточно эффективно защищает сетчатку и другие структуры глаза от воздействия ионизирующего ультрафиолетового излучения. В тоже время коэффициент пропускания изученных ИОЛ в видимой части спектра составляет не менее 70-85 %.

Проведенные сканирование ИОЛ методом атомно-силовой микроскопии и статистический анализ случаев возникновения вторичной катаракты в отдаленном послеоперационном периоде (6 месяцев и более) показали их корреляцию. В случае увеличения высоты выступов неровностей на поверхности линз до 70 нм и более, вероятность возникновения в послеоперационный период вторичной катаракты возрастает с 6 до 15 % [20].

Благодарности. Исследование поверхностной морфологии ИОЛ методом СЗМ было проведено в ЦКП «Нанотехнологии» ЮФУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анатомия глаза: строение и функции. – URL: <https://www.oum.ru/literature/anatomiya-cheloveka/anatomiya-glaza-stroenie-i-funktsii/>.
2. *Steinmetz Jaimie D. et al.* Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study // *The Lancet Global Health.* – Vol. 9, Issue 2, e144 - e160. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30489-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30489-7).
3. *Bourne Rupert et al.* Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study // *The Lancet Global Health.* – Vol. 9, Issue 2, e130-e143. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30425-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30425-3).
4. Катаракта старческая. Клинические рекомендации // Общество офтальмологов России. – 2019. – 51 с. – https://www.oog.ru/files/uveity/katarakta_starcheskaya.pdf.
5. *Белый Ю.А., Терещенко А.В., Романко Ю.С., Абакушина Е.В., Гречанинов В.Б.* Факторы возникновения, патогенез развития лучевой катаракты // *Вестник офтальмологии.* – 2015. – Vol. 131 (4). – P. 97-101. – <https://doi.org/10.17116/oftalma2015131497-101>.
6. *Apple D.J., and Sims J.* Harold Ridley and the Invention of the Intraocular Lens // *Survey of ophthalmology.* – 1996. – Vol. 40, No. 4. – Pp. 279-292. – URL: https://rayner.com/wp-content/uploads/2019/02/Invention_of_the_IOL.pdf.
7. *Ridley H.* Intra-ocular acrylic lenses – past, present and future // *Transactions of the Ophthalmological Societies of the United Kingdom.* – 1964. – Vol. 84. – P. 5-14. – PMID: 5227439. – [https://doi.org/10.1016/S0039-6257\(96\)82003-0](https://doi.org/10.1016/S0039-6257(96)82003-0).
8. *de Silva S.R., Evans J.R., Kirthi V., Ziaei M., Leyland M.* Multifocal versus monofocal intraocular lenses after cataract extraction // *Cochrane Database Syst. Rev.* – 2016 Dec. 12; 12 (12): CD003169. – DOI: 10.1002/14651858.CD003169.pub4. PMID: 27943250; PMCID: PMC6463930.
9. *Carson D., Hil, W.E., Hong X., & Karakelle M.* Optical bench performance of AcrySof® IQ ReSTOR®, AT LISA® tri, and FineVision® intraocular lenses // *Clinical ophthalmology (Auckland, N.Z.).* – 2014. – No. 8. – P. 2105-2113. – DOI: <https://doi.org/10.2147/OPHTH.S66760>. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4206402/pdf/oph-8-2105.pdf>.
10. *Diego Zamora-de La Cruz, Karla Zúñiga-Posse, John Bartlett, Mario Gutierrez, Samuel A Abariga.* Trifocal intraocular lenses versus bifocal intraocular lenses after cataract extraction among participants with presbyopia // *Cochrane Database of Systematic Reviews.* – 2020. – No. 6. – 43 p. – <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012648.pub2>.
11. *Choyce D.P.* Discussion to Barraquer: Anterior chamber plastic lenses. Results of and conclusions from five years experience // *Transactions of the Ophthalmological Societies of the United Kingdom.* – 1959. – Vol. 79. – P. 393-494. – <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13797034/>.
12. *Gozum N., Safgonul Unal E., Altan-Yaycioglu R. et al.* Visual performance of acrylic and PMMA intraocular lenses // *Eye.* – 2003. – Vol. 17 (2). – P. 238-242. – <https://doi.org/10.1038/sj.eye.6700290>.
13. *Oshika T, Shiokawa Y.* Effect of folding on the optical quality of soft acrylic intraocular lenses // *Journal of Cataract and Refractive Surgery.* – 2002. – Vol. 28. – P. 1141-1152. – DOI: 10.1016/s0886-3350(96)80098-8.
14. *Jagger J.* Soft Implant Lenses in Cataract Surgery // *Br. J/Ophthalmol.* – 1987 Aug. – Vol. 71 (8). – 641 p. – PMCID: PMC1041252.
15. Сканирующий зондовый микроскоп Solver P47PRO. – https://www.ntmdt-si.ru/data-media/files/products/ntegra/solver_p47-pro.pdf.

16. Спектрофотометр СФ-26. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – ЛОМО, 1981. – 36 с.
17. Кушков М.Р., Молоканов О.А. Спектральные коэффициенты пропускания интраокулярной линзы // Перспектива-2020: Матер. Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2020. – Т. III. – С. 181-186.
18. TORICA® - аАУ YELLOW (торическая, гидрофильная, моноблочная, заднекапсулярная ИОЛ) // Каталог офтальмологической продукции. – <https://eyeexpress.ru/item.aspx?256>.
19. Сороколетов Г.В., Зуев В.К., Туманян Э.Р., Бессарабов А.Н., Вещикова В.Н. Частота развития вторичной катаракты в артификачных глазах с современными моделями заднекамерных ИОЛ при осевой миопии // Офтальмохирургия. – 2013. – № 2. – <https://eyeexpress.ru/article.aspx?11587>.
20. Хубиева З.Р., Коков З.А., Карданова Л.О., Романенко Б.В., Селиванова Л.Ю. Зависимость развития вторичной катаракты от качества обработки поверхностей ИОЛ // Тезисы международной Юбилейной научно-практической конференции «Федоровские чтения-2007». Общество офтальмологов России, ФГУ МНТК «Микрохирургия глаза». – М. – С. 51-52.
21. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2009. – 144 с.

REFERENCES

1. Anatomiya glaza: stroenie i funktsii [Anatomy of the eye: structure and functions]. Available at: <https://www.oum.ru/literature/anatomiya-cheloveka/anatomiya-glaza-stroenie-i-funktsii/>.
2. Steinmetz Jaimie D. et al. Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study, *The Lancet Global Health*, Vol. 9, Issue 2, e144 - e160. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30489-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30489-7).
3. Bourne Rupert et al. Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study, *The Lancet Global Health*– Vol. 9, Issue 2, e130-e143. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30425-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30425-3).
4. Katarakta starcheskaya. Klinicheskie rekomendacii. Obshchestvo oftal'mologov Rossii [Senile cataract. Clinical recommendations. Society of Ophthalmologists of Russia], 2019, 51 p. Available at: https://www.oor.ru/files/uveity/katarakta_starcheskaya.pdf.
5. Belyj Yu.A., Tereshchenko A.V., Romanko Yu.S., Abakushina E.V., Grechaninov V.B. Faktory vozniknoveniya, patogenez razvitiya luchevoj katarakty [Factors of occurrence, pathogenesis of radiation cataract development], *Vestnik oftal'mologii* [Bulletin of Ophthalmology], 2015, Vol. 131 (4), pp. 97-101. <https://doi.org/10.17116/oftalma2015131497-101>.
6. Apple D.J., and Sims J. Harold Ridley and the Invention of the Intraocular Lens, *Survey of ophthalmology*, 1996, Vol. 40, No. 4, pp. 279-292. Available at: https://rayner.com/wp-content/uploads/2019/02/Invention_of_the_IOL.pdf.
7. Ridley H. Intra-ocular acrylic lenses – past, present and future, *Transactions of the Ophthalmological Societies of the United Kingdom*, 1964, Vol. 84, pp. 5-14. PMID: 5227439. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0039-6257\(96\)82003-0](https://doi.org/10.1016/S0039-6257(96)82003-0).
8. de Silva S.R., Evans J.R., Kirthi V., Ziaei M., Leyland M. Multifocal versus monofocal intraocular lenses after cataract extraction, *Cochrane Database Syst. Rev.*, 2016 Dec. 12; 12 (12): CD003169. DOI: 10.1002/14651858.CD003169.pub4. PMID: 27943250; PMCID: PMC6463930.
9. Carson D., Hil, W.E., Hong X., & Karakelle M. Optical bench performance of AcrySof® IQ ReSTOR®, AT LISA® tri, and FineVision® intraocular lenses, *Clinical ophthalmology (Auckland, N.Z.)*, 2014, No. 8, pp. 2105-2113. DOI.org/10.2147/OPTH.S66760. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4206402/pdf/oph-8-2105.pdf>.
10. Diego Zamora-de La Cruz, Karla Zúñiga-Posse, John Bartlett, Mario Gutierrez, Samuel A Abariga. Trifocal intraocular lenses versus bifocal intraocular lenses after cataract extraction among participants with presbyopia, *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2020, No. 6, 43 p. Available at: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012648.pub2>.
11. Choyce D.P. Discussion to Barraquer: Anterior chamber plastic lenses. Results of and conclusions from five years experience, *Transactions of the Ophthalmological Societies of the United Kingdom*, 1959, Vol. 79, pp. 393-494. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13797034/>.
12. Gozum N., Safgonul Unal E., Altan-Yaycioglu R. et al. Visual performance of acrylic and PMMA intraocular lenses, *Eye*, 2003, Vol. 17 (2), pp. 238-242. Available at: <https://doi.org/10.1038/sj.eye.6700290>.

13. Oshika T, Shiokawa Y. Effect of folding on the optical quality of soft acrylic intraocular lenses, *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2002, Vol. 28, pp. 1141-1152. DOI: 10.1016/s0886-3350(96)80098-8.
14. Jagger J. Soft Implant Lenses in Cataract Surgery, *Br. J/Ophthalmol*, 1987 Aug., Vol. 71 (8), 641 p. PMID: PMC1041252.
15. Skaniruyushchij zondovyy mikroskop Solver P47PRO [Сканирующий зондовый микроскоп Solver P47PRO.]. Available at: https://www.ntmdt-si.ru/data/media/files/products/ntegra/solver_p47-pro.pdf.
16. Spektrofotometr SF-26. Tekhnicheskoe opisanie i instrukciya po ekspluatatsiya [SF-26 spectrophotometer. Technical description and operating instructions. – LOMO]. LOMO, 1981, 36 p.
17. Kushkhov M.R., Molokanov O.A. Spektral'nye koeffitsienty propuskaniya intraokulyarnoy linzy [Spectral transmission coefficients of the intraocular lens], *Perspektiva-2020: Mater. Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh* [Perspective 2020: Materials of the International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists], 2020, Vol. III, pp. 181-186.
18. TORICA® - aAY YELLOW (toricheskaya, gidrofil'naya, monoblochnaya, zadnekapsulyarnaya IOL) [TORICA® - aAY YELLOW (toric, hydrophilic, monoblock, posterior capsule IOL)], *Katalog oftal'mologicheskoy produkcii* [Catalog of ophthalmological products]. Available at: <https://eyepress.ru/item.aspx?256>.
19. Sorokoletov G.V., Zuev V.K., Tumanyan E.R., Bessarabov A.N., Veshchikova V.N. Chastota razvitiya vtorichnoj katarakty v artifakichnyh glazah s sovremennymi modelyami zadnekamernykh IOL pri osevoj miopii [The frequency of secondary cataract development in artificial eyes with modern models of posterior chamber IOLs in axial myopia], *Oftal'mokhirurgiya* [Ophthalmosurgery], 2013, No. 2. Available at: <https://eyepress.ru/article.aspx?11587>.
20. Hubieva Z.R., Kokov Z.A., Kardanova L.O., Romanenko B.V., Selivanova L.Yu. Zavisimost' razvitiya vtorichnoj katarakty ot kachestva obrabotki poverhnostej IOL [The dependence of the development of secondary cataracts on the quality of surface treatment of IOL], *Tezisy mezhdunarodnoj Yubilejnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Fedorovskie chteniya-2007»*. Obshchestvo oftal'mologov Rossii, FGU MNTK «Mikrokhirurgiya glaza» [Theses of the international Anniversary scientific and practical conference "Fedorov readings-2007". Society of Ophthalmologists of Russia, Federal State University MNTC "Eye Microsurgery"]. Moscow, pp. 51-52.
21. Mironov V.L. Osnovy skaniruyushchej zondovoy mikroskopii [Fundamentals of scanning probe microscopy]. Moscow: Tekhnosfera, 2009, 144 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. С.Ш. Рехвиашвили.

Кокос Заур Анатольевич – Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; e-mail: zak@kbsu.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79034959004; кафедра теоретической и экспериментальной физики; к.ф.-м.н., доцент.

Молоканов Олег Артемович – e-mail: molokanov@kbsu.ru; тел.: +79289642039; кафедра теоретической и экспериментальной физики; к.т.н.; доцент.

Карданова Лариса Османовна – ООО Глазная клиника «ЛЕНАР»; e-mail: larisakardan@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79287111025; главный врач; к.м.н.

Кушхов Мухамед Рашидович – e-mail: mk.cherkes@gmail.com; тел.: +79034952288; инженер.

Кокос Заур Анатольевич – Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; e-mail: zak@kbsu.ru; Nalchik, Russia; phone: +79034959004; the department of theoretical and experimental physics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Molokanov Oleg Artemovich – e-mail: molokanov@kbsu.ru; phone: +79289642039; the department of theoretical and experimental physics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kardanova Larisa Osmanovna – Lenar Eye Clinic LLC; e-mail: larisakardan@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79287111025; chief physician; cand. of med. sc.

Kushkhov Mukhamed Rashidovich – e-mail: mk.cherkes@gmail.com; phone: +79034952288; engineer.

А.В. Логунов, А.Л. Береснев

ВИБРОМОНИТОРИНГ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Работа посвящена проблеме диагностирования автомобильных двигателей внутреннего сгорания. Проблема контроля состояния двигателей внутреннего сгорания сейчас наиболее актуально из-за увеличения числа автомобилей и ужесточения экологических требований. В работе рассмотрены последствия работы неисправного двигателя внутреннего сгорания. Целью работы является обоснование выбора из существующих методов диагностики такого метода который способен помочь наиболее точно и быстро обнаружить неисправность. Для этого в работе подробно рассмотрены современные средства диагностики, выделены принципы работы, достоинства и недостатки. С появлением современных технологий давно известный метод оценки состояния двигателей внутреннего сгорания по звуку может стать самым передовым, поскольку исключается человеческий фактор, для обработки сигнала применяется вычислительная техника анализ звукового спектра в которой осуществляется с помощью искусственных нейронных сетей. Применение искусственных нейронных сетей для анализа звукового спектра нашло применение в распознавание речи и для диагностики заболеваний дыхательной системы. В статье рассмотрены механизмы, которые способны генерировать звуковые сигналы во время работы двигателя внутреннего сгорания, некоторые из них фазированы т.е. привязаны к рабочим тактам, некоторые не фазированы. Предложенный способ диагностики позволяет выделить «полезные» звуки из общего числа шумов двигателя, после сравнительного анализа указать на узел звук которого отличается от эталонного, исправного. Научная новизна состоит в том, что процесс диагностики становится автоматизированным, все звуки, снятые датчиками, обрабатывается в ЭВМ или специальном сканере, на дисплей выводится информация о состоянии тех или иных узлов, в отличие от традиционных методов где диагностика осуществляется визуально или на слух. Таким образом повышается точность диагностики и снижается общая трудоемкость за счет исключения частичной или полной разборки двигателя.

Двигатель внутреннего сгорания; диагностика; звук; вибромониторинг; искусственная нейронная сеть.

A.V. Logunov, A.L. Beresnev

VIBRATION MONITORING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The work is devoted to the problem of diagnostics of automotive internal combustion engines. The problem of monitoring the state of internal combustion engine is now most relevant due to the increase in the number of cars and the tightening of environmental requirements. In the work the consequences of operation of faulty internal combustion engine are considered. The purpose of the work is to justify the choice from existing diagnostic methods of such a method, which can help to detect the fault most accurately and quickly. For this purpose, the work details modern diagnostic tools, highlights the principles of work, advantages and disadvantages. With the advent of modern technologies, the long-known method of estimating the state of internal combustion engine by sound can become the most advanced, as the human factor is excluded, for signal processing the computational technique of analysis of the audio spectrum in which is carried out with the help of artificial neural networks is used. The use of artificial neural networks for sound spectrum analysis has found application in speech recognition and for diagnosis of respiratory system diseases. The article considers mechanisms that are capable of generating sound signals during internal combustion engine operation, some of them are phased, i.e. they are tied to operating cycles, some are not phased. The proposed diagnostic technique allows to distinguish "useful" sounds from the total number of internal combustion engine noises, after comparative analysis to point to the node the sound of which differs from the reference, serviceable one. Scientific novelty consists in the fact that the diagnostic process becomes automated, all sounds captured by sensors are processed in a computer or a special scanner, the display shows information about the condi-

tion of certain nodes, unlike traditional methods where the diagnosis is carried out visually or by ear. This increases diagnostic accuracy and reduces overall labor intensity by avoiding partial or complete engine disassembly.

Internal combustion engine; diagnostics; sound; vibromonitoring; artificial neural network.

Введение. Диагностика и обнаружение неисправностей современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является не простой задачей из-за сложной конструкции. Диагностика технического состояния ДВС в процессе эксплуатации обеспечивает, с одной стороны, надежность и безотказность работы за счет своевременного технического обслуживания и ремонта и, с другой стороны, обеспечивает полную реализацию ресурса узлов ДВС, что способствует снижению затрат, повышению экономических и экологических показателей ДВС.

Неисправный ДВС является повышенным источником вредных веществ – химических соединений, содержащихся в отработавших газах (ОГ), загрязняющих окружающую среду и оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье человека (и живые организмы). В ОГ двигателей внутреннего сгорания содержится большое число химических соединений (более 250), опасных для здоровья человека. Время, в течение которого вещества, содержащиеся в ОГ ДВС, сохраняют свою химическую активность в условиях окружающей среды, колеблется от нескольких минут до нескольких (3...6) лет. И в течение всего срока существования эти вредные выбросы могут оказывать неблагоприятное воздействие на природу и население загрязняемых территорий. В целом по характеру взаимодействия с организмом человека (и животных) химические вещества и соединения, содержащиеся в ОГ ДВС, можно подразделить на токсичные (обладающие выраженным неблагоприятным воздействием) – оксид углерода, углеводороды, оксиды азота и серы, альдегиды, сероводород, сажа и др. и нетоксичные – азот, кислород, водород, водяные пары, диоксид углерода (углекислый газ). Кроме того, в составе токсичных веществ выделяют подгруппу полициклических ароматических углеводородов, обладающих выраженной канцерогенной активностью, одним из основных компонентов которой является мощный канцероген – бенз-(а)-пирен [1]. При неправильной работе ДВС выбросы вредных веществ существенно увеличиваются, именно поэтому необходима своевременная диагностика.

Интенсивный рост парка автотранспортных средств предопределяет рост значимости проблемы шумового загрязнения среды обитания человека. Одним из наиболее активных источников шума автомобиля является ДВС [2].

Под шумом ДВС понимается акустическое излучение, производимое им при работе. Шум двигателя измеряют величиной уровня и спектром. Это характеристики шума ДВС в точке пространства. Двигатель как источник акустического излучения характеризуют значением излучаемой акустической мощности, ее спектром и диаграммой направленности излучения. Резко возрастает шум от двигателя в момент его запуска и прогрева (до 10 дБ). Движение автомобиля на первой скорости (до 40 км/ч) способно вызывать излишний расход топлива, при этом шум двигателя в 2 раза превышает шум, который создается им на второй скорости. Резкое торможение автомобиля, особенно при движении на большой скорости, вызывает значительный шум. Шум заметно снижается в том случае, если скорость движения гасится за счёт торможения двигателем до момента включения ножного тормоза. За последнее время средний уровень шума, производимый транспортом, увеличился на 12–14 дБ. Чрезмерный шум может явиться причиной нервного 93 истощения, вегетативного невроза, психической угнетённости, язвенной болезни, расстройства эндокринной и сердечно-сосудистой систем [3]. Шум неисправного ДВС, соответственно, более негативно сказывается на здоровье, поэтому это еще одна причина из-за которой эксплуатация автомобиля с неисправностями должна быть прекращена, выполнена правильная диагностика и ремонт.

Обзор существующих методов диагностики. На данный момент традиционные способы диагностики и контроля работы автомобильного двигателя можно осуществить с помощью: диагностических сканеров (переносных и на базе ПК), газоанализаторов, а также мотортестеров (осциллографов).

Сканер – устройство, которое подключается через диагностический разъем к электронному блоку управления (ЭБУ) автомобиля для обмена данными. Стандартный сканер обеспечивает доступ к кодам регистратора неисправностей, доступ к текущей информации в ЭБУ, запись параметров во время ездовых испытаний, управление исполнительными механизмами. Сканер является необходимым инструментом для диагностики автомобильных электронных систем. Современные сканеры обеспечивают получение большого объема внутрисистемной диагностической информации, которую трудно или невозможно получить иным путем. Портативность сканера позволяет использовать его и при ездовых испытаниях. Получение информации в реальном времени облегчает обнаружение нерегулярных (непостоянных), неисправностей. Одной из, наиболее полезных возможностей сканера является запись данных в электронную память сканера во время ездовых испытаний. После возвращения в цех эти данные могут быть выведены на дисплей для анализа [4]. Основным недостатком использования при диагностике ДВС различных сканеров – это невозможность определить точно с чем связана поломка. К примеру, ошибка в регистре событий ЭБУ ДВС автомобилей группы VAG: 17748 - датчик распредвала-G40/датчик коленвала-G28: несоответствие сигналов. У данной ошибки может быть несколько причин: растяжение цепи привода газораспределительного механизма (ГРМ), неправильная установка меток фаз ГРМ, неисправность датчика распредвала/ датчик коленвала, неисправность системы регулирования фаз. В большинстве случаев чтобы узнать в чем причина ошибки, понадобится частичная разборка ДВС. Таким образом можно сделать вывод о том, что сканерная диагностика является неточным инструментом, и дает косвенное представление о неисправности.

Автомобильный газоанализатор – устройство, позволяющее с высокой степенью точности определить состав выхлопных газов, получаемых в результате работы двигателя внутреннего сгорания. Современные четырехкомпонентные газоанализаторы измеряют концентрацию CO, HC, CO₂, и O₂. Концентрация кислорода определяется при помощи электрохимического датчика. Так же определяется содержание в выхлопе оксидов азота NO_x в более сложных, пятикомпонентных приборах. Преимущество приборов этого уровня заключается в том, что они позволяют расчетным путем определить исходный состав топливной смеси даже для двигателей, выхлопная система которых оборудована катализатором. Помимо этого, они предоставляют диагностику несколько дополнительных параметров, совокупный анализ которых позволяет глубже понять характер процессов, происходящих в двигателе [5]. Так же, как и в случае со сканерной диагностикой газоанализаторы не дают точной картины о состоянии узлов ДВС.

Мотортестер это прибор, предназначенный для поиска неисправностей в различных автомобильных системах с бензиновым двигателем. Прибор позволяет диагностировать двигатели с механическим или электронным распределением энергии, т.е. с классической электронной или микропроцессорной системой зажигания, а также двигатели, оборудованные как карбюратором, так и системой впрыска [6]. Мотортестер позволяет одновременно измерять большое количество электрических сигналов в любых электроцепях, включая высоковольтные. Также он вполне в состоянии отображать форму и характер изменения этих сигналов во времени в режиме осциллографа или осциллографа. И еще мотортестер способен оказывать на двигатель испытательные воздействия и на основании анализа его реакции можно сделать вывод о состоянии двигательной механики. Мотортестер

как диагностический инструмент должен выполнять функцию осциллографа. Осциллограф – прибор, который позволяет увидеть форму импульсного напряжения или тока и измерить его параметры. Вторая группа функций, которая отличает мотортестер от обычного осциллографа, это расчетные функции. С их помощью производят расчеты на основании снятых с двигателя параметров. Примером такого расчета может быть баланс мощности, эффективность по цилиндрам. Третья функция – это измерение неэлектрических сигналов, к которым следует отнести в первую очередь давление [7]. Основным недостатком использования мотортестеров в диагностике – является то, что это просто измерительный прибор, полученные с помощью него графики еще нужно правильно расшифровать.

Один из перспективных методов диагностики – это виброакустический метод диагностики ДВС. Суть данного метода заключается в регистрации звуковых волн вибродатчиком, а также съем показаний с датчика давления в цилиндре и с датчика на свече первого цилиндра, использующегося для синхронизации сигнала вибродатчика. Затем частотный спектр записанного звукового сигнала разбивается на интервалы, число которых при первой итерации цикла поиска неисправности полагается равным трем. После этого происходит выбор очередного интервала сигнала и разложение его в ряд Фурье. На основании данных с датчика детонации определяется, фазирован сигнал или нет. Если сигнал фазирован, то определяется фаза всплеска, а затем выполняется прогнозирование источника сигнала и его вейвлет-преобразование. Если же сигнал не фазирован, то сначала к нему применяется вейвлет-преобразование, а затем по полученным данным выявляется частота максимальной амплитуды.

Результаты обработки звукового сигнала используются для определения неисправности. При этом в зависимости от типа для фазированного сигнала выполняются процедуры: определение фазы всплеска, прогноз источника сигнала и вейвлет-преобразование, а для нефазированного – вейвлет-преобразование, определение точки излучения максимального уровня сигнала и поиск сходства с образцами сигналов в базе данных. С помощью метода виброакустического анализа при диагностике ДВС могут быть определены следующие параметры: пропуски воспламенения; угловое положение коленчатого вала (КВ) и неисправности в основных парах сопряжения ДВС. Кроме того, при данном подходе для определения большинства дефектов нет необходимости выбора промежутков для разбиения реализаций на отдельные короткие участки равной длины [8].

Современный ДВС – сложное техническое устройство, содержащие ряд агрегатов и механизмов. Все эти механизмы являются источниками шумов, стуков, появляющихся из-за процессов, происходящих в ДВС. Уровень шума двигателя возрастает по мере износа его деталей, из-за выхода из строя деталей или неисправности отдельных механизмов и систем. В основном, стуки и шумы являются следствием ослабления креплений и посадок, увеличения зазоров в сопряжении деталей. Выделим наиболее важные группы механизмов ДВС, которые при выходе из строя начинают издавать нехарактерные для нормальной работы звуки, неисправность которых, возможно определить только с помощью частичной или полной разборкой: цилиндро-поршневая группа (ЦПГ), газораспределительный механизм (ГРМ), подшипники.

В состав ЦПГ входят поршень с компрессионными и маслосъемными кольцами, которые называются поршневыми кольцами, а также гильза цилиндра. Стук в ЦПГ возникает по разным причинам:

- ♦ перекося поршня из-за слишком большого зазора. Слишком большое отверстие цилиндра, износ или деформация юбки приводят к перекося поршня, которому способствуют маятниковое движение шатуна и перекладка поршня в цилиндре. При этом головка поршня сильно ударяется о рабочую поверхность цилиндра;

◆ несоблюдение направления сборки поршня. Для перекидки поршня перед верхней мертвой точкой и перед началом такта расширения ось поршневого пальца смещена на несколько миллиметров в сторону нагруженной стороны поршня. Если поршень вводится в цилиндр смещенным на 180° и поршневой палец из-за смещается не в ту сторону, то перекидка поршня осуществляется в неправильный момент. Качание поршня в результате этого происходит сильнее и громче;

◆ перекос поршня из-за тяжелого хода опоры шатуна. Зазор между поршневым пальцем и втулкой нижней головки шатуна может быть слишком малым или может исчезнуть в результате заклинивания или перекоса из-за несоосности шатуна (изгиб и скручивание);

◆ удары поршня в направлении пальца. Причиной боковых ударов поршня об отверстие цилиндра в большинстве случаев является несоосный шатун (изгиб или особенно скручивание): поршень выполняет качающееся движение во время своего хода в продольной оси двигателя и в результате этого попеременно ударяется о цилиндр. Несимметричные шатуны или эксцентрическая опора поршня в шатуне имеют тот же эффект;

◆ попеременные удары поршневого пальца о стопоры поршневого пальца. Осевое смещение поршневого пальца всегда является следствием несоосности между осью поршневого пальца и осью коленчатого вала. Как описано выше, изгиб или скручивание шатуна, а также асимметрия в шатуне являются наиболее частыми причинами таких дефектов. Слишком большой люфт шатунного подшипника (шатунная шейка на коленчатом валу) может вызвать боковое качание шатуна, особенно при низкой частоте вращения. Из-за этого происходит перекос поршневого пальца в головке шатуна, и он начинает совершать маятниковое движение в отверстии для поршневого пальца. При этом поршневой палец ударяется о стопоры пальца.

Неисправности в ЦПГ приводят к увеличенному расходу масла, что негативно сказывается на экологии.

Четырехтактные автомобильные двигатели имеют клапанные ГРМ, в которых впуск горючей смеси (воздуха) и выпуск отработавших газов происходит при помощи впускных и выпускных клапанов [9]. Основными элементами газораспределительного механизма являются распределительный вал, впускные и выпускные клапаны с пружинами, крепежными деталями и направляющими втулками, привод распределительного вала, а также детали (толкатели, штанги, коромысла и др.), обеспечивающие передачу перемещения от распределительного вала к клапанам.

Стук в ГРМ возникает по следующим причинам:

◆ стук клапанов – стук клапана о седло из-за повышенной скорости посадки клапана в седло (посадка с ударом). Повышение скорости посадки происходит при отклонении зазоров в сопряжении «регулирующая шайба – затылок кулачка распределителя» в большую сторону от требований КД;

◆ стук направляющих втулок клапанов – стук клапана о седло и о направляющую втулку из-за значимого радиального смещения клапана в момент посадки в седло. Смещение становится значимым при износе направляющей втулки выпускного или впускного клапана до зазора «втулка-клапан» более 0,3 мм;

◆ стук толкателя в направляющей – стук толкателя о стенки направляющего отверстия в головке цилиндров (ГЦ) при радиальном перемещении толкателя из-за повышенного радиального зазора между деталями;

◆ стук регулировочной шайбы в толкателе;

◆ стук распределительного вала.

Так же стоит выделить еще одну причину стука – растянутая цепь в приводе ГРМ. Все эти неисправности приводят к неполному сгоранию топлива, что очень сильно влияет на экологию, к этому добавляется потеря динамики автомобиля. Определить вышедшие из строя узлы ГРМ сложно, диагностика сопровождается частичной разборкой ДВС.

Еще одними источниками постороннего звука в ДВС являются подшипники качения, эти звуки не связаны с рабочими тактами ДВС, неисправность можно обнаружить только по звуку либо при визуальном осмотре.

Описанные выше неисправности ДВС возможно обнаружить с помощью виброакустического анализа [10–14]. На поверхности ДВС закрепляется пьезоэлектрические датчики (рис. 1), которые подсоединяются к микрофонному входу звуковой карты компьютера. Звук с работающего двигателя записывается в память.

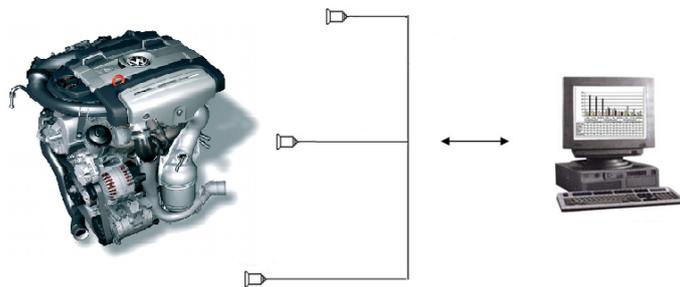


Рис. 1. Схематичное представление диагностики ДВС с помощью виброакустического анализа

Сохраненные в памяти компьютера данные, можно обрабатывать с помощью программного цифрового фильтра. Цифровой параметрический фильтр имеет все необходимые регулировки – выбор частоты пропускания, регулировки полосы пропускания и добротности. Таким образом, можно выделить именно интересующий звук, отсекая все фоновые шумы [15]. Для анализа полученного звукового спектра возможно использовать нейронную сеть [16]. Сейчас использование искусственных нейронных сетей становится актуальным решением для многих задач, т.к. существующие методы вычисления слишком трудоемки и малоэффективны. Одним из достоинств нейронных сетей является то, что становится возможным определить результат значений, которые не являются частью экспериментальных данных. Типовые задачи, решаемые с помощью нейронных сетей и нейрокомпьютеров: автоматизация процесса классификации; автоматизация прогнозирования; автоматизация процесса предсказания; автоматизация процесса принятия решений; управление; кодирование и декодирование информации; аппроксимация зависимостей и др. [17].

Описание эксперимента. Одними из наиболее ответственных механизмов ДВС являются подшипники, применяемые в газораспределительном механизме; в качестве опоры коленчатого вала; устанавливаются в шатунах; в сцеплении; в системе охлаждения для водяного насоса; так же в различном навесном оборудовании генераторы, насосы гидроусилителя руля, компрессоры кондиционера и т.д.

Неисправный подшипник может привести к выходу из строя оборудования или ДВС в целом, поэтому своевременное определение неисправности поможет избежать дорогостоящего ремонта. Главным признаком поломки подшипника является появление постороннего звука при его вращении. Для определения неисправности необходимо придерживаться следующего алгоритма:

- ◆ Необходимо записать звук.
- ◆ Следующим этапом будет преобразование полученного сигнала в спектрограммы, это преобразование необходимо для извлечения признаков.
- ◆ Далее извлекаем признаки из спектрограммы: спектральный центроид, MFCC, частоту пересечения нуля, частоты цветности и спад спектра.
- ◆ Обрабатываем и разбиваем данные на наборы для обучения и тестирования.
- ◆ Далее создаем модель нейронной сети, которая поможет идентифицировать неисправность.
- ◆ Оцениваем точность модели.

Экспериментальная часть. Экспериментальная обработка аудиосигнала подшипника выполняется с помощью высокоуровневого языка программирования общего назначения Python. Для эксперимента получены 4 аудиосигнала (2 – неисправного подшипника, 2 – исправного), все дорожки – это монофонические аудиофайлы 22 кГц, длительностью по 10 секунд в формате .wav.

Каждый аудиосигнал состоит из множества признаков. Спектральные (частотные) признаки получаются путем преобразования временного сигнала в частотную область с помощью преобразования Фурье. Анализ научных публикаций, в которых отражены результаты исследований голоса и звучащей речи, а также существующих систем распознавания звуков и музыки, помог определить ряд важных признаков аудиосигнала, которые позволят решить нашу задачу [18–20].

Для работы с нейронными сетями используется бесплатный сервис Google Colab, предоставляющий GPU и TPU в качестве сред выполнения.

В первую очередь нужно преобразовать аудиофайлы в изображения формата PNG (спектрограммы). Затем из них нужно извлечь значимые характеристики: MFCC, спектральный центроид, скорость пересечения нуля, частоты цветности, спад спектра. После извлечения, признаки можно добавить в файл CSV, который используется нейронной сетью для классификации.

Ниже приведены полученные спектрограммы для всех четырех аудиосигналов:

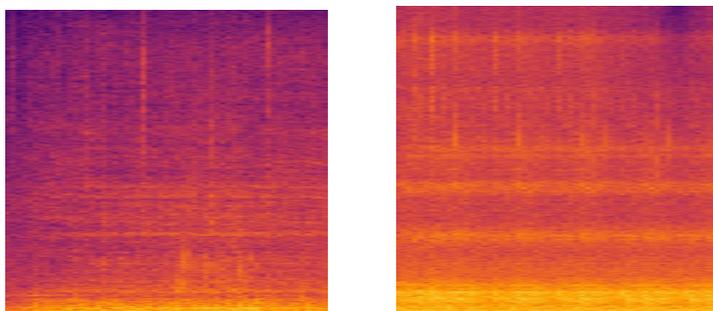


Рис. 2. Спектрограммы неисправных подшипников № 1 и № 2

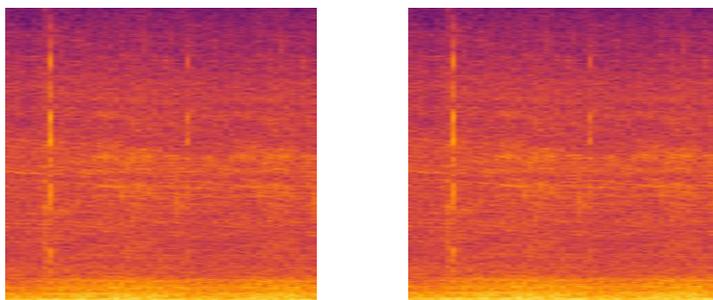


Рис. 3. Спектрограммы исправных подшипников № 3 и № 4

Извлекаем признаки из спектрограммы: MFCC, спектральный центроид, частоту пересечения нуля, частоты цветности и спад спектра.

```

file = open('dataset.csv', 'w', newline='')
with file:
    writer = csv.writer(file)
    writer.writerow(header)
    test = 'badsound goodsound'.split()
    for g in test:
        for filename in os.listdir(f'./drive/My Drive/test/{g}'):
            songname = f'./drive/My Drive/test/{g}/{filename}'
            y, sr = librosa.load(songname, mono=True, duration=30)
            rmse = librosa.feature.rms(y=y)
            chroma_stft = librosa.feature.chroma_stft(y=y, sr=sr)
            spec_cent = librosa.feature.spectral_centroid(y=y, sr=sr)
            spec_bw = librosa.feature.spectral_bandwidth(y=y, sr=sr)
            rolloff = librosa.feature.spectral_rolloff(y=y, sr=sr)
            zcr = librosa.feature.zero_crossing_rate(y)
            mfcc = librosa.feature.mfcc(y=y, sr=sr)
            to_append = f'{filename} {np.mean(chroma_stft)} {np.mean(rmse)} {np.mean(spec_cent)} {np.mean(spec_bw)} {np.mean(zcr)} {np.mean(mfcc)}'
            for e in mfcc:
                to_append += f' {np.mean(e)}'
            to_append += f' {g}'
            file = open('dataset.csv', 'a', newline='')
            with file:
                writer = csv.writer(file)
                writer.writerow(to_append.split())
    
```

Рис. 4. Окно программы Google Colab (извлечение признаков)

Выполняем предварительную обработку данных, которая включает загрузку данных CSV, создание меток, масштабирование признаков и разбивку данных на наборы для обучения и тестирования.

Создаем модель нейронной сети и оценим ее точность:

```

model = Sequential()
model.add(layers.Dense(256, activation='relu', input_shape=(X_train.shape[1],)))
model.add(layers.Dense(128, activation='relu'))
model.add(layers.Dense(64, activation='relu'))
model.add(layers.Dense(10, activation='softmax'))
model.compile(optimizer='adam',
              loss='sparse_categorical_crossentropy',
              metrics=['accuracy'])

classifier = model.fit(X_train,
                      y_train,
                      epochs=100,
                      batch_size=128)
    
```

Рис. 5. Окно программы Google Colab (модель нейронной сети)

результат оценки:

```

Epoch 1/100
1/1 [=====] - 1s 818ms/step - loss: 2.4139 - accuracy: 0.3333
    
```

```

-----
Epoch 100/100
1/1 [=====] - 0s 8ms/step - loss: 2.4556e-05 - accuracy: 1.0000
    
```

С целью экономии места представлены 1 и 100 эпохи оценки точности, после 100 эпох точность составляет 1. Такой высокий результат объясняется малым количеством экспериментальных образцов.

В табл. 1 представлены разбитые на наборы данные для обучения и тестирования, а также результат моделирования работы нейронной сети.

Таблица 1

Данные для обучения и тестирования

filename	chroma_stft	rmse	spectral_centroid
bearing1.wav	0.4233435094356537	0.09819794446229935	1335.7908870526746
bearing2.wav	0.38575297594070435	0.1195993423461914	1004.2208908491176
bearing3.wav	0.49449190497398376	0.01362406276166439	2371.9399163994094
bearing4.wav	0.49449190497398376	0.01362406276166439	2371.9399163994094

продолжение табл. 1

rolloff	zero_crossing_rate	mfcc	label
2972.8004226508374	0.04304430391166282	-	badsound
1310.3923841657045	0.038296811850461895	-173.9340057373047	badsound
5541.244091007506	0.09866889795034642	-298.5201721191406	goodsound
5541.244091007506	0.09866889795034642	-298.5201721191406	goodsound

В табл. 1 сведены значения вычисленных признаков всех аудиосигналов, в колонке *label* представлен результат классификации: bearing1.wav и bearing2.wav – **badsound**, а bearing3.wav и bearing4.wav – **goodsound**, заранее было известно, что подшипники №1 и №2 неисправны, а подшипники №3 и №4 исправны, таким образом представленная модель нейронной сети смогла верно классифицировать аудиосигналы.

Выводы. В работе рассмотрены проблемы влияния работы неисправного ДВС на человека и окружающую среду, представлены существующие методы поиска неисправностей. Проблема актуальна поскольку до сих пор нет точного и безотказного алгоритма определения механических поломок ДВС. Представленный в эксперименте алгоритм позволит классифицировать различные аудиосигналы ДВС и выделять среди общего количества звук неисправного узла. Также для широкого практического применения необходимо создать целую базу аудиосигналов для обучения нейронной сети, поскольку в данный момент количество экспериментальных образцов недостаточно для точной оценки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов // Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания. – 2005.
2. Шатров М.Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. – МАДИ, 2014.
3. Дрябжинский О.Е. Негативное воздействие автотранспорта. Проблема шумового загрязнения // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2015. – № 8-4. – С. 91-94.
4. Чернявский Н.И. Лабораторный практикум по междисциплинарному курсу «Техническое обслуживание и ремонт автомобильного электрооборудования». – Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2016. – 72 с.
5. Береснев А.Л., Береснев М.А. Практикум по лабораторным работам «Диагностика ДВС с помощью газоанализатора». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011.
6. Береснев А.Л., Береснев М.А., Бурьков Д.В. Практикум по лабораторным работам «Диагностика электрооборудования ДВС с помощью мотортестера». Для студентов специальности 140607. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.
7. <http://www.adis-spb.ru/stati/417-o-motor-testerah.html> (дата обращения 25.05.2020).
8. Береснев А.Л., Береснев М.А. Виброакустический метод диагностики двигателя внутреннего сгорания // Теоретический и прикладной научно-технический журнал мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 6 (111). – С. 27-32.
9. Соловьев Д.В., Огороднов С.М. Газораспределительный механизм двигателя. – Н. Новгород, 2011.

10. Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G. Vibration diagnosis of car motor engines // Acta technica corviniensis – bulletin of engineering. – 2010.
11. Scheffer C., Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance // Newnes. – 2004.
12. Patel V.N., Tandon N., Pandey R. K. Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration // Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load. – 2014.
13. Burdzik R., Doleček R. Research of vibration distribution in vehicle constructive // Perner's contacts. – 2012. – P. 16-26.
14. Wang, X. Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited, Cambridge, 2010.
15. Deulgaonkar, V.R. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles // International journal of modern engineering research (IJMER). – Vol. 1, No. 2. – P-242-246.
16. Жеретинцев И.А., Глушков С.В., Жеретинцева Н.Н. Нейросетевая методика технической диагностики двигателей внутреннего сгорания по спектральному анализу шумовых характеристик // Вестник морского государственного университета. – 2010. – № 37.
17. Patrick Sincebaugh, William Green. A neural network based diagnostic test system for armored vehicle shock absorbers expert systems with applications. – 1996. – Vol. 11, No. 2. – P. 237-244.
18. Круз П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учеб. пособие по курсу «Микропроцессоры». – М.: Изд-во МЭИ, 2002.
19. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2013.
20. Гафаров Ф.М. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018.
21. Вакуленко С.А., Жихарева А.А. Практический курс по нейронным сетям. – СПб.: Университет ИТМО, 2018.

REFERENCES

1. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes] *Teoriya rabochikh protsessov i modelirovanie protsessov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Theory of working processes and modeling of processes in internal combustion engines], 2005.
2. Shatrov M.G. Shum avtomobil'nykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: ucheb. posobie [Noise of automobile internal combustion engines: a textbook]. MADI, 2014.
3. Dryabzhinskiy O.E. Negativnoe vozdeystvie avtotransporta. Problema shumovogo zagryazneniya [Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologiy. – 2015. – № 8-4. – S. 91-94.
4. Chernyavskiy N.I. Laboratornyy praktikum po mezhdistsiplinarnomu kursu «Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont avtomobil'nogo elektrooborudovaniya» [Laboratory workshop on the interdisciplinary course "Maintenance and repair of automotive electrical equipment"]. Tol'yatti: Izd-vo PVGUS, 2016, 72 p.
5. Beresnev A.L., Beresnev M.A. Praktikum po laboratornym rabotam «Diagnostics DVS s pomoshch'yu gazoanalizatora» [Workshop on laboratory work "Diagnostics of internal combustion engines using a gas analyzer"]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011.
6. Beresnev A.L., Beresnev M.A., Bur'kov D.V. Praktikum po laboratornym rabotam «Diagnostics elektrooborudovaniya DVS s pomoshch'yu motortestera». Dlya studentov spetsial'nosti 140607 [Workshop on laboratory work "Diagnostics of internal combustion engine electrical equipment using a motor tester". For students of the specialty 140607]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2008.
7. Available at: <http://www.adis-spb.ru/stati/417-o-motor-testerah.html> (accessed 25 May 2020).
8. Bepesnev A.L., Bepesnev M.A. Vibroakusticheskiy metod diagnostiki dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Vibroacoustic method of internal combustion engine diagnostics], *Teoreticheskiy i prikladnoy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Theoretical and applied scientific and technical journal Mechatronics, automation, control], 2010, No. 6 (111), pp. 27-32.
9. Solov'ev D.V., Ogorodnov S.M. Gazoraspredelitel'nyy mekhanizm dvigatelya [The gas distribution mechanism of the engine]. Nizhniy Novgorod, 2011.

10. Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G. Vibration diagnosis of car motor engines, *Acta technica corviniensis – bulletin of engineering*, 2010.
11. Scheffer C., Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, *Newnes*, 2004.
12. Patel V.N., Tandon N., Pandey R. K. Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration, *Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load*, 2014.
13. Burdzik R., Doleček R. Research of vibration distribution in vehicle constructive, *Perner's contacts*, 2012, pp. 16-26.
14. Wang, X. Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited, Cambridge, 2010.
15. Deulgaonkar, V.R. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles, *International journal of modern engineering research (IJMER)*, Vol. 1, No. 2, pp-242-246.
16. Zhereintsev I.A., Glushkov S.V., Zhereintseva N.N. Neyrosetevaya metodika tekhnicheskoy diagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya po spektral'nomu analizu shumovykh kharakteristik [Neural network technique of technical diagnostics of internal combustion engines by spectral analysis of noise characteristics], *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Maritime State University], 2010, No. 37.
17. Patrick Sincebaugh, William Green. A neural network based diagnostic test system for armored vehicle shock absorbers expert systems with applications, 1996, Vol. 11, No. 2, pp. 237-244.
18. Krug P.G. Neyronnye seti i neyrokomp'yutery: ucheb. posobie po kursu «Mikroprotsessory» [Neural networks and neurocomputers: a textbook on the course "Microprocessors"]. Moscow: Izd-vo MEI, 2002.
19. Burakov M.V. Neyronnye seti i neyrokontrollery: ucheb. posobie [Neural networks and neurocontrollers: a textbook]. Saint Petersburg: GUAP, 2013.
20. Gafarov F.M. Iskusstvennye neyronnye seti i prilozheniya: ucheb. posobie [Artificial neural networks and applications: a textbook]. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 2018.
21. Vakulenko S.A., Zhikhareva A.A. Prakticheskiy kurs po neyronnym setyam [Practical course on neural networks]. Saint Petersburg, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.И. Дордопуло.

Логунов Артём Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79054586468; аспирант.

Береснев Алексей Леонидович – e-mail: alex_tr6@mail.ru; кафедра электротехники и механики; к.т.н.; доцент.

Logunov Artem Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054586468; postgraduate.

Beresnev Alexey Leonidovich – e-mail: alex_tr6@mail.ru; the departments of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.07.017

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-170-180

А.С. Болдырев, Л.С. Вережкина, А.Л. Вережкин

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОТКАЗОБЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ И АГРЕГАТОВ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Областями применения CALS-технологий принято считать: совершенствование деятельности в области разнородных процессов, происходящих на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) продукции; управление цепочками поставок в течение всего ЖЦ продукции (от создания концепции изделия до его утилизации); электронная интеграция организаций

(предприятий), участвующих в этих процессах на различных этапах ЖЦ; управление поддержкой ЖЦ продукции. Одними из актуальных направлений развития в авиационной отрасли являются: мультиагентные технологии повышения эффективности летательных аппаратов (ЛА разного типа в группе и единой миссии) и CALS-технологии. В статье предложена методика анализа отказобезопасности систем и агрегатов мультиагентной группы ЛА в целом, по типам ЛА, их системам, агрегатам. Методика дана на примере статистических данных АП и ПАП 16 систем: пилотажно-навигационной, выхлопа, зажигания, топливной, управления, электроснабжения, кондиционирования; гидравлической, радиоаппаратуры связи, приборов контроля, и агрегатов: двигатель, воздушные винты, крылья, окна, фонарь, десяти самолетов Ан-2, Л-410, Як-40, Ан-24, Ту-134, Як-42, Ту-154, Ил-62, Ил-62М, Ил-86. В предложенной методике анализа статистических данных АП и ПАП используются преобразования с матрицами, которые позволяют не ограничиваться числом систем, агрегатов, и самих ЛА. Рассчитано время работы до функционального отказа систем и агрегатов по типам ЛА. Определена средняя вероятность функционального отказа каждой из систем и агрегатов в мультиагентной группе, и время до функционального отказа в целом мультиагентной группы из 10 ЛА, которое составило 132,5 часа и определено, что ПАП и АП с большей вероятностью произойдут с шасси и двигателем ЛА. Приведенная методика позволяет: соотносить количественные требования по надежности к системам и агрегатам с учетом случайных факторов и факторов неопределенности; давать оценку выполнимости установленных требований к надежности; проводить сравнительный анализ и обоснование выбора рационального варианта состава группы ЛА.

Летательные аппараты; анализ отказобезопасности; мультиагентная группа; матрицы; вероятность функционального отказа.

A.S. Boldyrev, L.S. Verevkina, A.L. Verevkin

METHODOLOGY FOR ANALYZING THE FAULT SAFETY OF SYSTEMS AND AGGREGATES OF A MULTI-AGENT GROUP OF AIRCRAFT

Areas of application of CALS technologies are considered to be: improvement of activities in the field of heterogeneous processes occurring at all stages of the life cycle (LC) of products; supply chain management throughout the entire LC of products (from the creation of the product concept to its disposal); electronic integration of organizations (enterprises) involved in these processes at various stages of LC; management of support for LC products. One of the most relevant areas of development in the aviation industry are: multi-agent technologies for improving the efficiency of aircraft (aircraft of various types in a group and a single mission) and CALS technologies. The article proposes a methodology for analyzing the fault safety of systems and aggregates of the multi-agent group of aircraft as a whole, by types of aircraft, their systems, and aggregates. The methodology is given on the example of statistical data of AP and PAP 16 systems: flight navigation, exhaust, ignition, fuel, control, power supply, air conditioning; hydraulic, radio communication equipment, control devices, and aggregates: engine, propellers, wings, windows, lantern, ten aircraft AN-2, L-410, Yak-40, An-24, Tu-134, Yak-42, Tu-154, IL-62, IL-62M, IL-86. In the proposed methodology for analyzing statistical data of AP and PAP, transformations with matrices are used, which allow not to be limited to the number of systems, aggregates, and the aircraft themselves. The operating time before the functional failure of systems and aggregates by types of aircraft was calculated, the average probability of functional failure of each of the systems and aggregates in a multi-agent group was determined, and the time before the functional failure of a multi-agent group of 10 aircraft as a whole, which was 132.5 hours, and it was determined that PAP and AP are more likely to occur with the chassis and engine of the aircraft. The given methodology allows: to correlate quantitative reliability requirements for systems and aggregates, taking into account random factors and uncertainty factors; to assess the feasibility of the established reliability requirements; to conduct a comparative analysis and justification of the choice of a rational variant of the composition of the aircraft group.

Aircraft; fault safety analysis; multi-agent group; matrices; probability of functional failure.

Введение. CALS-технологии позволяют совершенствовать деятельность в разных областях и процессах, на всех этапах жизненного цикла изделий – от создания до их утилизации и способствует интеграции предприятий, участвующих на различных стадиях жизненного цикла изделий [1–3].

CALS-технологии (англ. Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий), или ИПИ (информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий) [4].

Единое информационное пространства CALS-технологий [5], приведенное на рис. 1 формируется статистическими исследованиями на всех стадиях жизненного цикла ЛА различными организациями требованиями нормативных документов [6–9].

Основная часть исследований посвящена обеспечению надёжности планера самолета при техническом обслуживании и ремонте [10–14]. Однако инвесторов авиационной техники интересует не только отказы – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния системы самолета, а и возможные авиационные происшествия (АП - аварии и катастрофы), предпосылки к АП (ПАП). В соответствии с перечнем ПАП [15], к ним относятся: выход параметров за пределы эксплуатационных ограничений; возникновение в полете отказов авиационной техники, приводящих к особой (сложной, аварийной) ситуации; потерю навигационной ориентировки; потерю пространственной ориентировки; потерю радиосвязи и другие.



Рис. 1. CALS-технологии

Постановка задачи. Одними из новых направлений развития в авиационной отрасли являются: мультиагентные технологии повышения эффективности ЛА, когда группа разных ЛА объединены одной миссией. Статистика ПАП и АП используется при анализе отказобезопасности ЛА. В.2 ОСТ 1 00497-97 «Надежность изделий авиационной техники. Методы оценки и анализа показателей надежности самолетов (вертолетов) при их эксплуатации» является вероятностью вида отказа (функционального отказа) системы на 1 час полета q_0 . Согласно п. 5.1.9 ОСТ 1 00497-97 определяется по формуле [16]:

$$q_0 = m_0 / t_C, \quad (1)$$

где m_0 – суммарное количество отказов, приведших к определенному нарушению работоспособности функциональной системы, характеризуемому частичной или полной потерей способности выполнять одну или несколько функций; t_C – суммарный налет ЛА за расчетный период.

В работах приведены методы статистического анализа [17] и использование матриц [18] статье предложена актуальная методика анализа отказобезопасности мультиагентной группы ЛА на примере численного анализа отказобезопасности 16 систем и агрегатов 10 самолетов, по статистическим данным, как в целом, так и по типам системам, и системам.

При известных статистических показателях безопасности полетов – налет на одно АП, предпосылку к АП в результате анализа отказобезопасности систем и агрегатов – можно прогнозировать более точно мероприятия технического обслуживания ЛА. В табл. 1 приведены исходные данные – относительное число ПАП, вызванных отказами систем в процентах за 1000 часов налета [19].

Таблица 1

Относительное число АП и ПАП самолетов за 1000 часов налета

Система, агрегат	Ан-2	Л-410	Як-40	Ан-24	Ту-134	Як-42	Ту-154	Ил-62	Ил-62М	Ил-86
Система кондиционирования			4,43		7,30					
Радиоаппаратура связи	5,56									
Система электроснабжения	9,11	5,64			3,93				4,30	
Система управления самолета				3,29		22,00		6,67		
Гидравлическая система		5,64	4,93	3,95	7,87					10,53
Шасси		42,96	54,66	21,05	36,5	12,00	31,7	6,67	11,8	37,71
Пилотажно-навигационная								6,67	4,30	
Фонарь, окна					4,49					
Крыло						10,00				
Воздушные винты				12,50						
Двигатель	54,00	16,20	7,39	12,50	11,80	28,00	25,43	21,66	40,85	19,30
Топливная система двигателя				5,26					4,30	7,89
Система зажигания	5,33									
Приборы контроля работы двигателя		6,34		11,18			15,67			
Система выхлопа (реверс)								33,33		13,97
Навигационная радиоаппаратура			5,43	6,58	3,93					

Методика анализа отказобезопасности систем и агрегатов группы ЛА

1. Из табл. 1 по исходным данным ПАП и АП в процентах составляем матрицу их $||n||$ размером $i \times j=16 \times 10$, где: $i=16$ систем; $j=10$ самолетов:

$$|n| = \begin{vmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1j} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{210} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{i1} & n_{i2} & \dots & n_{ij} \end{vmatrix} =$$

0	0	4,43	0	7,3	0	0	0	0	0
5,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,11	5,64	0	0	3,93	0	0	0	4,3	0
0	0	0	3,29	0	22	0	6,67	0	0
0	5,64	4,93	3,95	7,87	0	0	0	0	10,53
0	42,96	54,66	21,05	36,52	12	31,7	6,67	11,82	37,71
0	0	0	0	0	0	0	6,67	4,3	0
0	0	0	0	4,49	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	12,5	0		0	0	0	0
54	16,2	7,39	12,5	11,8	28	25,43	21,66	40,85	19,3
0	0	0	5,26	0	0	0	0	4,3	7,89
5,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	6,34	0	11,18	0	0	15,67	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	33,33	0	13,97
0	0	5,43	6,58	3,93	0	0	0	0	0
74	76,78	76,84	76,31	75,84	72	72,8	75	65,57	89,4

Так как число n_{ij} (например для $n_{13}=4,43\%$) в процентах из $N=100\%$ систем за $t=1000$ часов налета можно рассчитать вероятность вида функционального отказа системы q_{ij} , которая определяется по формуле:

$$q_{ij} = n / (N * t) = n / (100 * 1000) = n * 10^{-5}. \quad (2)$$

Например для третьего самолета вероятность функционального отказа системы кондиционирования $q_{13}=4,43/(100*1000)=4,43*10^{-5}$ 1/час, а для всех систем одновременно рассчитывают матрицу.

2 Матрицу вероятностей функционального отказа $\|q_{ij}\|$ систем и агрегатов самолетов получаем умножив матрицу $|n|$ на 10^{-5} определено в формуле (2):

$$\|q_{ij}\| = \|n\| * 10^{-5} =$$

0	0	4,43*10 ⁻⁵	0	7,3*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0
5,56*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,11*10 ⁻⁵	5,64*10 ⁻⁵	0	0	3,93*10 ⁻⁵	0	0	0	4,3*10 ⁻⁵	0
0	0	0	3,29*10 ⁻⁵	0	22*10 ⁻⁵	0	6,67*10 ⁻⁵	0	0
0	5,64*10 ⁻⁵	4,93*10 ⁻⁵	3,95*10 ⁻⁵	7,87*10 ⁻⁵	0	0	0	0	10,5*10 ⁻⁵
0	42,96*10 ⁻⁵	54,66*10 ⁻⁵	21,05*10 ⁻⁵	36,52*10 ⁻⁵	12*10 ⁻⁵	31,7*10 ⁻⁵	6,67*10 ⁻⁵	11,82*10 ⁻⁵	37,7*10 ⁻⁵
0	0	0	0	0	0	0	6,67	4,3	0
0	0	0	0	4,49*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	12,5*10 ⁻⁵	0		0	0	0	0
54*10 ⁻⁵	16,2*10 ⁻⁵	7,39*10 ⁻⁵	12,5*10 ⁻⁵	11,8*10 ⁻⁵	28*10 ⁻⁵	25,43*10 ⁻⁵	21,66*10 ⁻⁵	40,85*10 ⁻⁵	19,3*10 ⁻⁵
0	0	0	5,26*10 ⁻⁵	0	0	0	0	4,3*10 ⁻⁵	7,89*10 ⁻⁵
5,33*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	6,34*10 ⁻⁵	0	11,18*10 ⁻⁵	0	0	15,67*10 ⁻⁵	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	33,33*10 ⁻⁵	0	13,9*10 ⁻⁵
0	0	5,43*10 ⁻⁵	6,58*10 ⁻⁵	3,93*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0

3. Определяем время работы в часах до функционального отказа систем и агрегатов самолетов в виде матрицы $\|T_{ij}\|$, возведя в минус первую степень матрицу $\|q_{ij}\|$ систем и агрегатов:

$$\|T_{ij}\| = \|q_{ij}\|^{-1}.$$

Врем работы T_{ij} до функционального отказа систем и агрегатов по типам ЛА приведено в табл. 2.

Таблица 2

Врем работы до функционального отказа систем и агрегатов по типам ЛА

Наименование системы	T_{ij} , час.									
	Ан-2	Л-410	Як-40	Ан-24	Ту-134	Як-42	Ту-154	Ил-62	Ил-62М	Ил-86
Система кондиционирования	-	-	22573	-	13699	-	-	-	-	-
Радиоаппаратура связи	17986	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Система электроснабжения	10977	17730	-	-	25445	-	-	-	23256	-
Система управления самолета	-	-	-	30395	-	4545	-	14992	-	-
Гидравлическая система	-	17730	20284	25316	12706	-	-	-	-	9497
Шасси	-	2328	1829	4651	2738	8333	3155	14992	8460	2652
Пилотажно-навигационная	-	-	-	-	-	-	-	14992	23256	-
Фонарь, окна	-	-	-	-	22272	-	-	-	-	-
Крыло	-	-	-	-	-	10000	-	-	-	-
Воздушные винты	-	-	-	8000	-	-	-	-	-	-
Двигатель	1852	6173	13531	8000	8475	3571	3932	4617	2448	5181
Топливная система двигателя	-	-	-	19011	-	-	-	-	23256	12674
Система зажигания	18762	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Приборы контроля работы двигателя	-	15773	-	8945	-	-	6381	-	-	-
Система выхлопа (реверс)	-	-	-	-	-	-	-	3000	-	7158
Навигационная радиоаппаратура	17985	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4. Определяем среднюю вероятность функционального отказа $\|q_{i\text{cp}}\|$ каждого наименования систем и агрегатов в мультиагентной группе. Матрицу ПАП и АП $\|n_{ij}\|$ умножим на матрицу в один столбец с числом строк равном $j=10$ числу самолетов (так как число отказов n в процентах из $N=100\%$ систем 10 самолетов за $t=1000$ часов налета) $a=10^{-5}$:

$$\|q_{i\text{cp}}\| = \|n_{ij}\| * \|a_j\| =$$

$$= \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1j} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{i1} & n_{i2} & \dots & n_{ij} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{1\text{cp}} \\ q_{2\text{cp}} \\ \dots \\ q_{16\text{cp}} \end{pmatrix} \text{ получим } \begin{pmatrix} 11,73 * 10^{-5} \\ 5,56 * 10^{-5} \\ 22,98 * 10^{-5} \\ 31,96 * 10^{-5} \\ 32,92 * 10^{-5} \\ 255,09 * 10^{-5} \\ 10,97 * 10^{-5} \\ 4,49 * 10^{-5} \\ 10 * 10^{-5} \\ 12,5 * 10^{-5} \\ 237,13 * 10^{-5} \\ 17,45 * 10^{-5} \\ 5,33 * 10^{-5} \\ 33,19 * 10^{-5} \\ 47,3 * 10^{-5} \\ 15,94 * 10^{-5} \end{pmatrix} \text{ 1/ч}$$

5. Определяем матрицу среднего времени работы до функционального отказа в часах, для каждого наименования систем и агрегатов возведя в минус первую степень матрицу $\|q_{i\text{cp}}\|$:

$$\|T_{i\text{гр}}\| = \|q_{i\text{cp}}\|^{-1} = \begin{pmatrix} T_{1\text{гр}} \\ T_{2\text{гр}} \\ \dots \\ T_{16\text{гр}} \end{pmatrix}, \quad \|T_{i\text{гр}}\| = \begin{pmatrix} 8225,2 \\ 17985,6 \\ 4351,6 \\ 3128,9 \\ 3037,7 \\ 392,0 \\ 9115,7 \\ 22271,7 \\ 10000,0 \\ 8000,0 \\ 421,7 \\ 5730,6 \\ 18761,7 \\ 3012,9 \\ 2114,2 \\ 6273,5 \end{pmatrix} \text{ час}$$

Если ранжировать полученные результаты, можно наглядно представить наиболее уязвимые системы при выполнении миссии десятью самолетами. Результаты ранжированных среднего значения времени работы до функционального отказа $T_{i\text{гр}}$ систем и агрегатов мультиагентной группы из 10 самолетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Ранжированные среднего значения времени работы до функционального отказа системы

Номер системы в исходных данных	Агрегат (система) ЛА	T, час
6	Шасси	392
11	Двигатель	422
15	Система выхлопа (реверс)	2114
14	Приборы контроля работы двигателя	3013
5	Гидравлическая система	3038
4	Система управления самолета	3129
3	Система электроснабжения	4352
12	Топливная система двигателя	5731
16	Навигационная радиоаппаратура	6273,5
10	Воздушные винты	8000
1	Система кондиционирования	8225
7	Пилотажно-навигационная система	9117
9	Крыло	10000
9	Радиоаппаратура связи	17986
13	Система зажигания	18762
8	Фонарь, окна	22272

Методика анализа отказобезопасности мультиагентной группы ЛА в целом. Вероятность функционального отказа в целом в мультиагентной группе ЛА можно определить преобразованием - матрицу $\|q_{i\text{cp}}\|$ транспортируем и умножим ее на единичную матрицу столбец с числом строк равным числу $i=16$ всех систем:

$$Q_{\text{гр}} = \|q_{i\text{cp}}\|^T * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{1\text{cp}} \\ q_{2\text{cp}} \\ \dots \\ \dots \\ q_{16\text{cp}} \end{pmatrix}^T * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} = \|q_{1\text{cp}}q_{2\text{cp}} \dots \wedge q_{16\text{cp}}\| * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$Q_{\text{гр}} = 754,54 * 10^{-5} 1/\text{ч}$$

Определим времени до функционального отказа систем $T_{\text{гр}}$ в мультиагентной группы ЛА

$$T_{\text{гр}} = 1/\Lambda_{\text{гр}} \text{ в численном примере } T_{\text{гр}} = 1/754,54 = 132,53 \text{ час}$$

Из приведенных расчетов можно сделать вывод, что для мультиагентной группы ЛА из 10 самолетов, при выполнении одной миссии, времени до функционального отказа 132,53час, самыми ненадежными являются у самолётов шасси и двигатель, что подтверждается в публикациях [20]

Заключение. Приведенная методика анализа отказобезопасности систем и агрегатов мультиагентной группы ЛА по статистическим данным АП и ПАП позволяет:

- ◆ соотносить количественные требования по надежности к системам и агрегатам с учетом случайных факторов и факторов неопределенности;
- ◆ давать оценку выполнимости установленных требований к надежности;
- ◆ проводить сравнительный анализ и обоснование выбора рационального варианта состава группы ЛА;
- ◆ давать оценку функциональных возможностей;
- ◆ обоснование прогноза, технического обслуживания и ремонта систем ЛА, с целью повышения надежности;
- ◆ решение различных оптимизационных задач, мультиагентного группового использования.

Следует отметить, что метод анализа отказобезопасности систем и агрегатов мультиагентной группы ЛА по статистическим данным АП и ПАП посредством преобразований с матрицами, позволяют не ограничиваться числом систем, агрегатов, и самих ЛА. Результаты численного компьютерного моделирования отказобезопасности систем и агрегатов мультиагентной группы ЛА позволяют принимать обоснованные решения всем участникам единого информационного пространства CALS-технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <https://www.metobr-expo.ru/ru/ui/17007/>.
2. *Юрчик П.Ф., Голубкова В.Б.* Применение Web и CALS технологий на предприятии: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2018. – 112 с.
3. *Акилова И.М., Бушманов А.В.* CALS-технологии // Сб. учебно-методических материалов для направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017. – 59 с.
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/CALS-технологии>.
5. <https://studfile.net/preview/4325131/page:4/>.
6. *Викторова В.С., Ведерников Б.И., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С.* Моделирование и анализ контролепригодности бортовых систем самолетов // Надежность. – 2007. – № 3 (22). – С. 62-71.
7. ОСТ 1 00132-97. Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов.
8. *Смирнов Н.Н., Андронов А.М., Владимиров Н.И., Лемин Ю.И.* Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов. – М.: Транспорт, 1974. – 304 с.
9. *Фролов В.П.* Проблемы авиаремонтного производства в повышении эффективности использования ЛА и безопасности полетов // Методологические проблемы эксплуатации ЛА и обеспечения безопасности полетов: Матер. научных докладов научно-практической конференции МИИГА. – М.: РИО МИИГА, 1991. – С. 34-41.
10. *Шапкин В.С.* Расчетно-экспериментальная оценка длительности развития усталостных трещин в тонкостенных элементах авиаконструкций при нерегулярном нагружении: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1989. – 202 с.
11. *Ормоцадзе А.Р.* Совершенствование технологического процесса ремонта агрегатов планера самолетов гражданской авиации с эксплуатационными повреждениями: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1997. – 422 с.
12. *Шапкин В.С.* Влияние основных факторов эксплуатации на характеристики долговечности и ресурса длительно эксплуатируемых воздушных судов и разработка методов их оценки применительно к элементам конструкции планера: дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: 1995. – 501 с.
13. ОСТ 1 00497-97 Надежность изделий авиационной техники. Методы оценки и анализа показателей надежности самолетов (вертолетов) при их эксплуатации. – 13 с.

14. ГОСТ 27.310-95 Анализ видов, последствий и критичности отказов. – 14 с.
15. <http://ooobskspetsavia.ru/2015/10/09/predposylki-i-prichiny-aviacionnykh-proisshestvij/>.
16. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ. – 2-е изд. – М.: URSS, 2013. – 584 с.
17. Болдырев А.С., Вережкин А.Л., Пилюхилова К.В., Вережкина Л.С. Методика и моделирование надежности системы группового управления роботизированными платформами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (152). – С. 87-101.
18. <http://lektii.net/4-18471.html> - Гражданской авиации.
19. http://airforce.ru/aircraft/miscellaneous/ejectionseats/tu/tu-22_accidents.htm.
20. <https://szmtu-m.favt.ru/public/files/2017/02/НИР2016.pdf>.

REFERENCES

1. Available at: <https://www.metobr-expo.ru/ru/ui/17007/>.
2. Yurchik P.F., Golubkova V.B. *Primenenie Web i CALS tekhnologiy na predpriyatii: ucheb. posobie* [The use of Web and CALS technologies in the enterprise: a textbook]. Moscow: MADI, 2018, 112 p.
3. Akilova I.M., Bushmanov A.V. *CALS-tekhnologii* [CALS-technologies], *Sb. uchebno-metodicheskikh materialov dlya napravleniya podgotovki 09.03.01 «Informatika i vychislitel'naya tekhnika»* [Collection of educational and methodological materials for the direction of training 09.03.01 "Computer Science and computer engineering"]. Blagoveshchensk: Amurskiy gos. un-t, 2017, 59 p.
4. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CALS-tekhnologii> [<https://ru.wikipedia.org/wiki/CALS-technologies>].
5. Available at: <https://studfile.net/preview/4325131/page/4/>.
6. Viktorova V.S., Vedernikov B.I., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. *Modelirovanie i analiz kontroleprigodnosti bortovykh sistem samoletov* [Modeling and analysis of the controllability of aircraft onboard systems], *Nadezhnost'* [Reliability], 2007, No. 3 (22), pp. 62-71.
7. OST 1 00132-97. *Nadezhnost' izdeliy aviatsionnoy tekhniki. Metody kolichestvennogo analiza bezotkaznosti funktsional'nykh sistem pri proektirovanii samoletov i vertoletov* [OST 1 00132-97. Reliability of aircraft products. Methods of quantitative analysis of the reliability of functional systems in the design of aircraft and helicopters].
8. Smirnov N.N., Andronov A.M., Vladimirov N.I., Lemin Yu.I. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' i rezhimy tekhnicheskogo obsluzhivaniya samoletov* [Operational reliability and maintenance modes of aircraft]. Moscow: Transport, 1974, 304 p.
9. Frolov V.P. *Problemy aviaremontnogo proizvodstva v povyshenii effektivnosti ispol'zovaniya LA i bezopasnosti poletov* [Problems of aircraft repair production in improving the efficiency of aircraft use and flight safety], *Metodologicheskie problemy ekspluatatsii LA i obespecheniya bezopasnosti poletov: Mater. nauchnykh dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii MIIGA* [Methodological problems in operation of the LA and aviation safety: Proceedings of the scientific reports of the international scientific-practical conference MIIGA]. Moscow: RIO MIIGA, 1991, pp. 34-41.
10. Shapkin V.S. *Raschetno-eksperimental'naya otsenka dlitel'nosti razvitiya ustalostnykh treshchin v tonkostennykh elementakh aviakonstruktsiy pri neregulyarnom nagruzhении*: diss. ... kand. tekhn. nauk [Calculation-experimental estimate of the duration of development of fatigue cracks in thin-walled elements of aviakonstruktur under irregular loading: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 1989, 202 p.
11. Ormotsadze A.R. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa remonta agregatov planera samoletov grazhdanskoj aviatsii s ekspluatatsionnymi povrezhdeniyami*: diss. ... kand. tekhn. nauk [Calculation-experimental estimate of the duration of development of fatigue cracks in thin-walled elements of aviakonstruktur under irregular loading: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 1997, 422 p.
12. Shapkin V.S. *Vliyanie osnovnykh faktorov ekspluatatsii na kharakteristiki dolgovechnosti i resursa dlitel'no ekspluatiruemykh vozdushnykh sudov i razrabotka metodov ikh otsenki primenitel'no k elementam konstruktsii planera*: diss. ... d-ra tekhn. nauk [The influence of the main factors of operation on the characteristics of durability and resource of long-operated aircraft and the development of methods for their evaluation in relation to the elements of the airframe design: dr. of eng. sc. diss.]. Moscow: 1995, 501 p.

13. OST 1 00497-97 Nadezhnost' izdeliy aviatsionnoy tekhniki. Metody otsenki i analiza pokazateley nadezhnosti samoletov (vertoletov) pri ikh ekspluatatsii [OST 1 00497-97 Reliability of aircraft products. Methods of evaluation and analysis of reliability indicators of aircraft (helicopters) during their operation], 13ps.
14. GOST 27.310-95 Analiz vidov, posledstviy i kritichnosti otkazov [GOST 27.310-95 Analysis of the types, consequences and criticality of failures], 14 p.
15. Available at: <http://oobskspetsavia.ru/2015/10/09/predposylki-i-prichiny-aviacionnyx-proisshestvij/>.
16. *Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D.* Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti: Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz [Mathematical methods in the theory of reliability: The main characteristics of reliability and their statistical analysis]. 2nd ed. Moscow: URSS, 2013, 584 p.
17. *Boldyrev A.S., Verevkin A.L., Pshikhopova K.V., Verevkina L.S.* Metodika i modelirovanie nadezhnosti sistemy gruppovogo upravleniya robotizirovannymi platformami [Methodology and modeling of reliability of a group control system for robotic platforms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (152), pp. 87-101.
18. Available at: <http://lektsii.net/4-18471.html> - Grazhdanskoy aviatsii [<http://lektsii.net/4-18471.html> - Civil aviation].
19. Available at: http://airforce.ru/aircraft/miscellaneous/ejectionseats/tu/tu-22_accidents.htm.
20. Available at: <https://szmtu-m.favt.ru/public/files/2017/02/НИР2016.pdf>.

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

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

Веревкин Александр Леонидович – e-mail: verevkin.a@mail.ru; тел. +78634371634; кафедра летательных аппаратов; аспирант.

Веревкина Лина Станиславовна – e-mail: lverevkina@sfedu.ru; тел. +78634371697; к.т.н.; доцент.

Boldyrev Anton Sergeevich – Southern Federal University; boldyrev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; Institute of Radio Engineering Systems and Control; director; cand. of eng. sc.

Verevkin Alexander Leonidovich – e-mail: verevkin.a@mail.ru; phone: +78634371634; the department of aircraft; graduate student.

Verevkina Lina Stanislavovna – e-mail: lverevkina@sfedu.ru; phone: +78634371697; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-180-194

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков

ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СПЭ КАБЕЛЕЙ

Статья посвящена исследованиям вопросов по созданию метода оценки долговечности основной изоляции силовых кабельных линий на основе термофлуктуационной теории разрушения твердых тел. Рассмотрены особенности развития пробоя в однородных и неоднородных диэлектриках. Рассматриваются проблемные вопросы изоляционных материалов силовых кабельных систем (СКС) на основе разработки и развития методов неразрушающего контроля. Установлены основные компоненты, разрушающие изоляцию СКС. Описана термофлуктуационная теория разрушения и оценка долговечности электрической изоляции силовых кабелей. Предлагается аналитический метод оценки процессов окисления целлюлозы с определением наиболее вероятного. Предложенный подход выявления основ-

ных процессов разрушения изоляции позволяет более детально представить предпосылки к развитию частичных разрядов (ЧР) в изоляции и определить мероприятия по минимизации процессов, приводящих к деструкции изоляции СКС. Изложены результаты экспериментов по исследованию сроков службы изоляционного материала состаренных образцов силового кабеля в термошкафу, по определению критериев старения. Экспериментальные данные интерпретированы с позиций термофлуктуационной теории. Выявлена и исследована зависимость увеличения разности температур ΔT от степени износа электроизоляционных свойств материала, что позволяет прогнозировать его ресурс. Рассмотрена термофлуктуационная теория разрушения изоляционных материалов вызванного термофлуктуационным разрывом химических связей и оценки долговечности электрической изоляции кабелей из сшитого полиэтилена. Показано что, для расчета средней энергии мономерного звена различных полимерных материалах необходимо знать: химическую формулу мономерного звена и значения энергий связи. В работе проведено определение времени до пробоя основной изоляции СКЛ при действии температуры. Модель может быть использована в устройствах и системах непрерывного диагностирования силовых кабелей по температурным режимам.

Оценки долговечности электрической изоляции термофлуктуационным разрывом химических связей; термофлуктуационная теория разрушения; надежность систем энергообеспечения.

M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich, D.V. Burkov

THERMOFLUCTUATION THEORY OF DESTRUCTION AND EVALUATION DURABILITY OF ELECTRICAL INSULATION OF SPE CABLES

The article is devoted to research on the creation of a method for assessing the durability of the main insulation of power cable lines based on the thermofluctuation theory of destruction of solids. The features of breakdown development in homogeneous and inhomogeneous dielectrics are considered. The problematic issues of insulating materials of power cable systems (PCS) are considered on the basis of the development and development of non-destructive testing methods. The main components that destroy the insulation of the PCS are installed. The thermofluctuation theory of destruction and the evaluation of the durability of electrical insulation of power cables are described. An analytical method is proposed for evaluating the processes of cellulose oxidation with the determination of the most probable. The proposed approach to identifying the main processes of insulation destruction allows us to present in more detail the prerequisites for the development of partial discharges (PD) in isolation and to determine measures to minimize the processes leading to the destruction of PCS insulation. The results of experiments on the study of the service life of the insulating material of aged ends of a power cable in a thermal cabinet, to determine the aging criteria, are presented. The experimental data are interpreted from the standpoint of the thermofluctuation theory. The dependence of the increase in the temperature difference ΔT on the degree of wear of the electrical insulating properties of the material is revealed and investigated, which makes it possible to predict its resource. The thermofluctuation theory of the destruction of insulating materials caused by the thermofluctuation rupture of chemical bonds and the evaluation of the durability of electrical insulation of cables made of cross-linked polyethylene are considered. It is shown that, in order to calculate the average energy of the monomeric link of various polymer materials, it is necessary to know: the chemical formula of the monomeric link and the values of the binding energies. In the work, the time before the breakdown of the main insulation of the PCS was determined under the action of temperature. The model can be used in devices and systems for continuous diagnosis of power cables according to temperature conditions.

Estimates of the durability of electrical insulation by thermal fluctuation rupture of chemical bonds; thermal fluctuation theory of destruction; reliability of power supply systems.

Введение. Большинство объектов таких отраслей промышленности как химическая, нефтехимическая, металлургическая, потребители многих организаций, служб жилищно-коммунального хозяйства по требованиям к обеспечению электрической энергией относятся к потребителям первой категории. При сохранении потребителей второй категории и уменьшении третьей появились объекты, тре-

бующие три независимых ввода (источника питания) при двух и более резервных генерирующих мощностях [1, 2]. Это увеличивает кабельные потоки. Поэтому повышение надежности силовых КЛ – одна из важнейших задач обеспечения надежного электроснабжения потребителей. Электрооборудование сложных распределительных систем (СРС) характеризуется значительным превышением нормативных сроков его эксплуатации, что означает большой износ электрооборудования. В распределительных электрических сетях среднего напряжения 6–35 кВ, систем электроснабжения, наибольшее распространение получили силовые кабели напряжением 6–10 кВ [3] (например, для внутризаводского сетевого хозяйства и питания мощных потребителей) [ГОСТ 24291-90, статья 70].

Вследствие различия физико-механических параметров материалов, составляющих систему изоляции, в них неизбежно возникают внутренние механические напряжения, которые могут привести к разрушению основной изоляции СКЛ [3]. В процессе теплового старения происходит углубление отверждения за счет непрореагировавших активных групп и двойных связей, а также структурирования, обусловленного термоокислительными процессами.

Самым слабым с точки зрения надежности элементом силовых кабельных линий является система изоляции [4]. Даже при кратковременном повышении температуры происходят качественные изменения в электрической изоляции. Если повышение температуры держится длительное время, начинаются необратимые химические процессы, сопровождающиеся необратимым ухудшением электрических свойств изоляции – тепловое старение изоляции [5–8]. Тепловой пробой – происходит когда изоляция получает больше тепловой энергии, чем способна отвести. Возникает как следствие размягчения, которое приводит к деформации и уменьшению толщины материала. После пробоя или микро пробоя происходит разрушение изоляции, образуются каналы, по которым повторный пробой будет происходить уже при меньшем напряжении.

Критерием отказа является наличие дефектов в изоляции, в местах которых возможно возникновение короткого замыкания. При всех прочих равных условиях вероятность отказа изоляции будет тем выше, чем больше число повреждений. Эксплуатационная надежность высоковольтных систем электрической изоляции обмоток электрооборудования определяется в первую очередь их рабочей температурой и нагревостойкостью примененных электроизоляционных материалов.

Особенности развития пробоя в неоднородных диэлектриках. Выделяют две стадии развития пробоя твердых диэлектриков [3]: подготовительную (стадию потери электрической прочности) и завершающую (стадию разрушения). По природе процессов, определяющих развитие подготовительной стадии, различают три основные формы пробоя твердых диэлектриков: электрический; тепловой и электрохимический. [9]. Основной закономерностью для электрохимической формы пробоя, является электрическое старение, обусловленное сравнительно медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, развивающимися под действие электрического поля или разрядов в окружающей среде. Электрическое старение развивается при гораздо более низких значениях напряжения, чем пробивное напряжение при электрическом и тепловом пробое. Время $\tau_{ж}$ от момента подключения напряжения U к электродам образца до завершения пробоя называется временем жизни. Значение $\tau_{ж}$ уменьшается с повышением U , а во многих случаях и с возрастанием температуры. На рис. 1. показаны поверхностные повреждения компонент кабельной системы вызванные длительными ЧР.



Рис. 1. Внешний вид пробоя в кабельной системе

Одним из наиболее востребованных диэлектрических материалов в современном высоковольтном оборудовании является бумага [3]. Согласно ГОСТ 23436–83 для изоляции силовых кабелей до 10 кВ применяют однослойную кабельную бумагу марок К-080, К-120, К-170 (толщиной 80, 120 и 170 мкм соответственно). Повторные циклы нагрева охлаждения кабеля (тепловое дыхание) приводят к перемещению как пропиточного состава, так и воздушных включений (ВВ). Ёмкость, замещающая целый участок изоляции принята, согласно справочным данным, СИ 2,13 10⁻⁸ Ф (согласно [10])

Для повышения механических, электрофизических, а также других свойств ЭИ бумаги используются различные виды модифицированной целлюлозы (органосульфатная, сульфатная, органосульфетная целлюлоза), полученной с помощью новых и модифицированных методов делигнификации.

Оценки долговечности изоляционных материалов силовых кабельных линий (СКЛ) может выполняться с использованием теории механической прочности полимеров, какой является термофлуктуационная теория Журкова. Газовые включения (поры) являются одним из видов неоднородностей диэлектриков. Наличие таких включений (пор, трещин) снижает электрическую прочность полимера в результате резко понижающейся прочности самих газовых включений и по причине искажения поля внутри образца. Трещины и поры могут появляться при нарушении технологии изготовления изделий. Так, электрическая прочность политетрафторэтилена сильно зависит от наличия в нем пузырей и трещин, которые возникают при неправильных режимах спекания [11].

Деграция бумажно-масляной изоляции. Изменения свойств изоляционной бумаги и масла СКЛ связаны с нормальным старением и воздействием внешних нагрузок. Внешние напряжения могут резко ускорить деграцию ИМ. Промежутки между бумажными полосками в изоляции силового кабеля заполнены маслом, рис. 2, которое так же может изменять свои свойства.

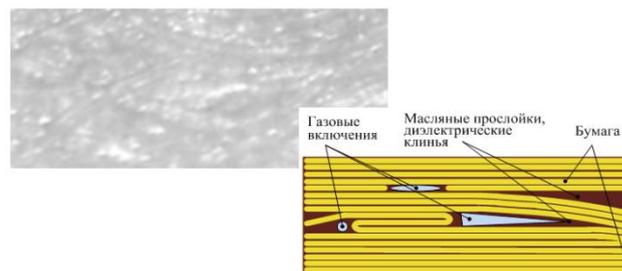


Рис. 2. а – поверхность бумаги, б – структура фрагментов бумажно-масляной изоляции

При эксплуатации кабеля в изоляции происходит три различных механизма деградации: механизм гидролитического разложения, окисления и термической деструкции. В ходе деструкции изоляционных материалов кабелей получают

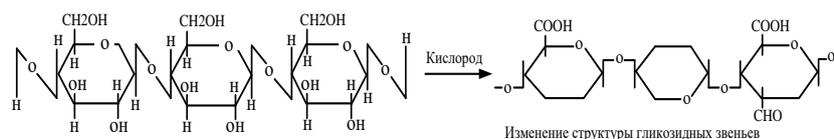
такие газы как угарный, углекислый, небольшое количество водорода, метана, этана и этилена. Эти газы вытесняют масло и заполняют области между бумажными полосками, образуя газовые полости. Газовые пузырьки диаметром от 1 мм и более являются явным дефектом изоляции. Напряженность электрического поля внутри полости газа выше, чем в окружающей изоляции. Когда его уровень превышает предельное значение, происходит ЧР, что приводит к образованию новых полостей, заполненных проводящими частицами, такими как углерод.

Результаты по исследованию долговечности и термодеструкции полимеров С.Н. Журкова с сотрудниками, привели к выводу, что в условиях опыта каждая флуктуация приводит к разрыву отдельно взятой цепи полимера. Поэтому энергия термодеструкции цепей полимера совпадает или практически близка к энергии активации разрушения полимера [12].

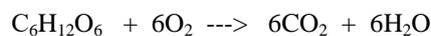
Термодеструкция или пиролиз целлюлозы в отсутствие окислителей и влаги приводит к разрыву гликозидных связей и открытию колец глюкозы. Влажность является самым мощным понижающим агентом бумажной изоляции. В зависимости от процесса деградации вода образуется или потребляется: например, формирование уксусной кислоты будет потреблять воду.

Пиролиз может происходить без доступа кислорода и влаги. Во время нормальной работы, при температуре ниже 140 °С, процессы пиролиза не достигают большого значения. На рис. 3 показаны различные процессы деградации и их основные продукты. Процесс окисления можно разбить на несколько стадий:

I – стадия окисления (начальная):



II – стадия частичного окисления:



III – стадия полного окисления:

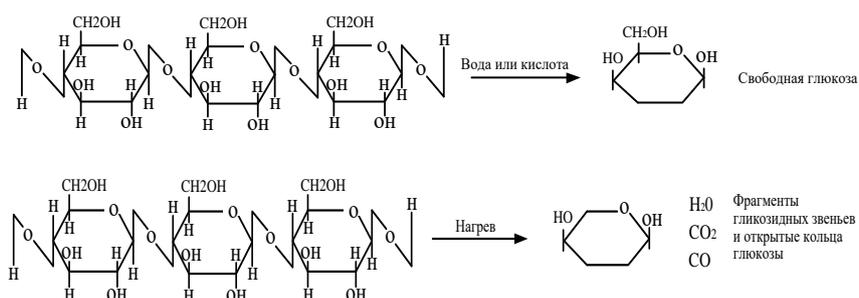
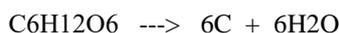
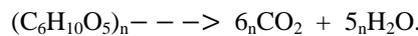


Рис. 3. Процессы деградации целлюлозы и их основные продукты

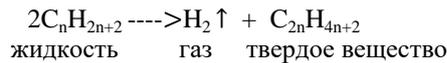
Во время деградации [13] уменьшается степень полимеризации изолирующей бумаги. Степень полимеризации новой бумаги составляет около 1100 до 1500, а значение менее 500 свидетельствует о значительном термическом разложении [14]. Ослабление механических свойств может привести к отказу кабеля при коротких замыканиях.

Термодинамический расчет процессов, разрушающих изоляцию. В работе [26] авторами был предложен подход выявления основных процессов разрушения изоляции, который позволяет более детально представить предпосылки к развитию частичных разрядов (ЧР) в изоляции и определять мероприятия по минимизации процессов, приводящих к деструкции изоляции СКС. Были установлены основные компоненты, разрушающие изоляцию СКС. Предложен аналитический метод оценки процессов окисления целлюлозы с определением наиболее вероятного. Показано, что наличие воздушных включений в кабелях с вязкой пропиткой (максимально до 3% по объему), приводит к окислению клетчатки. В этой стадии при температурах 60-70°C происходит окисление первичных гидроксильных групп до альдегидных или до карбоксильных

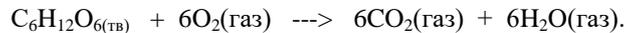
Дальнейшая стадия окисления связана уже с деструкцией молекул клетчатки (целлюлозы). Последняя стадия окисления завершается полным разложением клетчатки на окись углерода и воду:



При наличии ЧР в воздушных включениях в изоляции кабелей с вязкой пропиткой происходит разложение масла с выделением газов (преимущественно водорода) и твердого вещества («Х-воск»). Для метановых углеводородов реакция идет следующим образом:



Регулирующим фактором является наличие доступа кислорода и повышенной температуры. Если имеется доступ кислорода, то разрушение изоляции происходит ускоренным темпом из-за образования большого количества газов, так как из 1 моль молекулы глюкозы образуется 12 молекул газов (оксид углерода и вода):



Выделение газов увеличивает интенсивность ЧР с переходом их в критические с величиной заряда $q_{чр} \cong 10^{-8} - 10^{-7}$ Кл, что приводит к локальному повышению температуры и возрастанию термической деструкции целлюлозы (клетчатки). Например, под действием электрического поля порядка 30 кВ/мм и температуры 50°C происходит разложение пропитанной бумаги с выделением следующих газов: $H_2 - 55\%$, $CO_2 - 36\%$, $CO - 9\%$. Проникновение влаги в БМИ существенно ускоряет процесс деструкции (увеличение проводимости, рост температуры и т.д.).

В случае отсутствия кислорода и при наличии повышенной температуры процесс окисления идет до образования углерода, при этом объем образующихся газов в 2 раза меньше



Количество выделенного газа влияет на масштабы механического разрушения изоляции, а количество образующегося углерода в несколько раз повышает проводимость масла.

Термодинамический расчет процесса окисления. Рассчитаем, какое окисление целлюлозы термодинамически более вероятно, до углерода или до полного окисления. В случае полного окисления глюкозы [14.]



значения энтальпий образования веществ, участвующих в реакции, соответственно равны [1]: -1274,5 кДж/моль, 0 кДж/моль, -393,51 кДж/моль, -241,84 кДж/моль. Из 2-го следствия закона Гесса:

$$\Delta H = \sum n_{пр} \Delta H_{298}^{\circ} \text{обр.прод.} - \sum n_{исх} \Delta H_{298}^{\circ} \text{обр.исх.}$$

где $n_{пр}$, $n_{исх}$ – стехиометрические коэффициенты продуктов реакции и исходных веществ, находим изменение энтальпии в ходе этого процесса, оно равно -2537,6 кДж.

Значения энтропий для участников реакции записываются с такими значениями [15]: 212 Дж/мольК, 205,03 Дж/мольК, 213,8 Дж/мольК, 188,74 Дж/мольК.

Расчет энтропии химического процесса произведем по формуле:

$$\Delta S = \sum n_{пр} \Delta S_{298}^{\circ} \text{обр.прод.} - \sum n_{исх} \Delta S_{298}^{\circ} \text{обр.исх.}$$

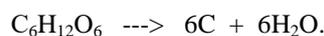
Изменение энтропии химической реакции равно 923,06 Дж/К.

Изменение изобарно-изотермического потенциала вычисляем по формуле:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S.$$

Подставим вычисленные значения термодинамических величин, температуру примем равной (393)К, получим значение $\Delta G_1 = -2928.1$ кДж.

Проведем аналогичные вычисления для реакции неполного окисления глюкозы:



Получим изменение энтальпии этого процесса, равное -176,54 кДж, изменение энтропии равно 954,88 Дж/К, изменение изобарно-изотермического потенциала получим равным $\Delta G_2 = -580.45$ кДж.

Сравнив полученные значения ΔG_1 и ΔG_2 изобарно-изотермических потенциалов (энергии Гиббса) этих процессов, делаем вывод: так как значение изобарно-изотермического потенциала процесса полного окисления глюкозы приблизительно в пять раз меньше изобарно-изотермического потенциала реакции с образованием углерода, как продукта неполного окисления глюкозы, то первый процесс более вероятен и с позиции термодинамики более выгоден.

Следовательно, при длительной эксплуатации в изоляционных материалах наиболее вероятным будет процесс полного окисления глюкозы (целлюлозы), с образованием большого объема газов, которые будут способны механически разрывать изоляционные слои. В свою очередь, такое механическое нарушение целостности изоляции приведет к увеличению поверхности соприкасающихся слоев, что в геометрической прогрессии увеличит адсорбцию влаги и других частиц на поверхности изоляции и значительно уменьшит срок эксплуатации кабеля в целом. Ослабление механических свойств неизбежно приведет к отказу кабеля при коротких замыканиях.

Расчеты показывают, что деградация бумаги в основном проходит в сторону ухудшения механических свойств, электрические свойства меняются незначительно.

Экспериментальные исследования. Для выявления параметра, определяющего старение изоляционного материала, исследуемые образцы кабеля искусственно состаривались при одной и той же температуре, но при различном времени выдержки в термошкафу. Образец №1 был выдержан в термошкафу в течение 8 часов, образец №2 – выдержан в течение 16 часов, а образец №3 – 24 часа, табл. 1.

Таблица 1

Контрольная выборка состаренных образцов СКЛ

№ кабеля	Ток жилы кабеля, А	Время старения t, час	Средняя температура (эксперимент), t°C	Средняя температура (прогноз), t°C	Δt _{экс} /Δt _{прог} t°C	Ошибка прогнозируемой температуры,		
						t°C	%	
1 этап – новый кабель	1	480	–	33,971	34,3241	–	-0,354	1,02
	2	480	–	40,345	40,9571	–	-0,613	1,53
	3	470	–	38,28	39,6024	–	-1,323	3,34
2 этап – состаренный кабель	1	480	8	35,655	38,6252	1,68 / 4,37	-2,967	3,36
	2	480	16	42,595	44,3758	2,25 / 3,42	1,543	4,52
	3	470	24	41,435	43,4345	3,16 / 3,84	1,953	4,85

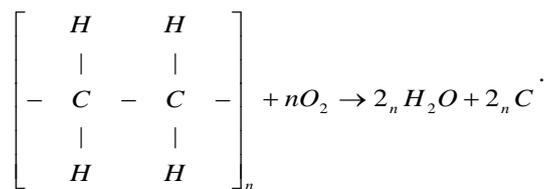
Результаты анализа показали, что чем больше время состаривания, тем больше разность температур между исходным и состаренным образцом. С увеличением времени старения кабеля растет разница температур. Сравнение экспериментальных и прогнозных данных по новым и искусственно состаренным образцам кабеля приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение параметров

Параметр		№ образца кабеля			Средняя разность температур
		1 кабель	3 кабель	4 кабель	
Разность температур, Δt	Не состаренного	1.73	2.8	2.3	35,655 - 33,971 = 1,68 42,595 - 40,345 = 2,25 41,435 - 35,655 = 5,78 U _{max} = 39,895; U _{min} = 37,532 Разность = 3, 28 или 8,22%
	Состаренный	1.2	1.46	1.6	
Ошибка, %	Не состаренного	4.2%	5.2%	3.8%	
	Состаренный	3.8%	2.3%	3.1%	

Мы полагаем [3], что это объясняется потерей электроизоляционных свойств материала за счет накопления фрагментов разрушенной структуры, содержащей, все в большем количестве, включения чистого углерода и других токопроводящих включений. Реакция неполного окисления полиэтилена с образованием углерода:



Таким образом, выявлена и исследована зависимость увеличения разности температур ΔT от степени износа (старения) электроизоляционных свойств материала, что позволяет прогнозировать его ресурс.

Термофлуктуационная теория разрушения электрической изоляции. Рассмотрим термофлуктуационную теорию разрушения электрической изоляции силовых кабелей [15, 16].

Воспользуемся описанной С.С. Марьиным [18], теорией прочности твердых тел согласно которой для оценки дефектности (λ) основной изоляции СКЛ. Число сквозных дефектов на единицу длины изоляции использовалось выражение [18].

$$\lambda = -\frac{1}{l_{\text{исп}}} \ln(1 - q_i), q_i = \frac{n_i}{n}, \quad (1)$$

где $l_{\text{исп}}$ – длина испытываемой части образца мм, q_i – вероятность появления сквозного дефекта (трещины) на единицу длины; n_i – число образцов, пробившихся напряжением, меньшим или равным испытательному напряжению; n – общее количество испытанных образцов.

Значение q из (1) в соответствии с термофлуктуационной теорией прочности представляет собой значение вероятности разрыва химических связей. Появление дефектов (трещин) в изоляции СКЛ обусловлено действующими факторами на изоляцию (тепловые и механические нагрузки). Согласно термофлуктуационной теории разрушения твердого тела, первой фазой разрушения материалов принято считать появление трещин на микроуровне (субмикротрещин), вызванное термофлуктуационным разрывом химических связей. Анализ результатов исследований позволяет математически описать вероятностную модель процесса образования микротрещин в полимерных материалах при их тепловом старении и одновременном воздействии на них механических нагрузок, а долговечность определить по выражению, предложенным Журковым:

$$\tau = A \cdot \exp(-\alpha\sigma) = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (5)$$

где τ_0 – период тепловых колебаний молекул ($\approx 10^{13}$ с) время ожидания распада одной связи; γ – структурная постоянная, характерная для данного материала; σ – напряжения, действующие на материал; k – постоянная Больцмана. U – начальная энергия активации процесса разрушения; T – температура окружающей среды. E_a – энергия активации процесса разрушения.

Оценивая вероятность разрыва химических связей в полимере, обычно принимают во внимание только углерод – углеродную связь (C–C). В действительности первопричиной образования субмикротрещины может служить разрыв любой химической связи, имеющийся в полимерном веществе [17]. Оценки долговечности электрической изоляции по формуле (5) [18], учитывает образования субмикротрещин, обусловленное разрывом любой химической связи в полимерном материале. Поэтому, в качестве энергетической характеристики процесса разрыва сплошности полимера можно использовать среднюю энергию мономерного звена:

$$E_{\text{ср}} = \frac{\sum n_i E_{oi}}{n_o}, \quad (6)$$

где n_i – число химических связей i - типа; E_{oi} – энергия химической связи i -типа; n_o – общее число химических связей в мономерном звене.

Однако, в полимере имеются и межмолекулярные связи, энергия которых намного ниже, чем у химических. На первый взгляд, кажется, что образование трещины пойдет по межмолекулярным связям. Однако, отвержденный пропиоточный состав является сшитой структурой, а в этом случае роль межмолеку-

лярного взаимодействия на процесс образования субмикротрещин минимальна. Поэтому вероятность механического разрушения полимера в условиях термо-механических воздействий описывается выражением:

$$P = \exp\left(-\frac{E_{cp}-\gamma\delta}{kT}\right), \quad (7)$$

E_{cp} – средняя энергия мономерного звена.

В целом разрушение полимерного материала носит вероятностный характер и зависит от его структурных особенностей и механических нагрузок, действующих на него, а вероятность появления дефектов (трещин) в основной изоляции может быть описана экспоненциальным законом типа (7). Тогда долговечность изоляции можно оценивать в свете термofлуктуационной теории Журкова, заменив в выражении (5) величину энергии активации процесса разрушения (Ua) величиной средней энергии мономерного звена E_{cp} (U_{cp}), так как данная характеристика определяет усредненную величину процесса разрыва химической связи в веществе. В этом случае окончательная формула для расчета долговечности основной изоляции СКЛ примет вид:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{E_{cp}-\gamma\sigma}{RT}\right). \quad (8)$$

В выражении (8) присутствуют три величины характеризующие прочность изоляции, это γ – структурно-чувствительный коэффициент, σ – напряжения, действующие на материал [27] и U_{cp} – средняя энергия мономерного звена изоляционного материала, R – универсальная газовая постоянная = 8,31 Дж/моль • град. Основным компонентом бумажно масляной изоляции (БМИ) является целлюлоза, мономером которой служит молекула глюкозы, рис. 4. Значение средней энергии мономерного звена выражается формулой (6). Химическая формула мономерного звена мономера звена целлюлозы представлена на рис. 4.

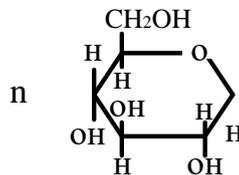


Рис. 4. Структурная формула мономера звена целлюлозы

В структуру мономерного звена входит четыре группы химических связей, это связи: С – Н (7 связей); С - О (7 связей); О - Н (5 связей); С - С (5 связей), общее количество химических связей в мономерном звене равно двадцати четырем. Используя значения энергий этих связей (U_0) (табл. 3) и выражение (6) рассчитаем среднюю энергию мономерного звена. Так для С – Н $E_0 = 128$ ккал/моль, С – О $E_0 = 79,58$ ккал/моль, О – Н $E_0 = 109,25$ ккал/моль, С – С $E_0 = 80,5$ ккал/моль.

Таблица 3

Значения энергий связи, ккал/моль E_{cp}

Вид связи	С – Н	С – О	О – Н	С – С
Энергия связи, E_0 Эв	128	79,58	109,25	80,5

Используя выражение (6), рассчитаем среднюю энергию мономерного звена целлюлозы (рис. 4):

$$E_{\text{ср}} = \frac{128 * 7 + 79,58 * 7 + 109,25 * 5 + 80,5 * 5}{24} = 100,08 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$$

Результаты расчета сведем в табл. 3.

Таблица 3

Средняя энергия мономера звена глюкозы

Связи в мономере			Энергия		
Тип связи	Количество	Энергия одной связи	Суммарная средняя энергия мономера, ЭВ	Средняя энергия звена мономера, ЭВ	Средняя энергия мономерного звена, ккал/моль
C – H	7	4,37			
C – O	7	3,46			
O – H	5	4,75			
C – C	5	3,6	96,56	4,02	91,36

Таким образом, для расчета средней энергии мономерного звена различных полимерных материалах необходимо знать: химическую формулу мономерного звена и значения энергий связей. Значения энергий химических связей U_0 для изоляционного материала исследуемого кабеля представлены в табл. 3.

Как отмечено [18] на основную изоляцию СКЛ действуют как внешние ($\sigma_{\text{внеш}}$), так и внутренние механические нагрузки ($\sigma_{\text{вн}}$). К основной внешней механической нагрузке, оказывающей действие на изоляцию, относятся вибрации [20–23]. Внутренние механические напряжения возникшие из-за физических и химических изменений (усадка, взаимодействие реакционно-способных групп, окислительно-полимеризационные процессы), постоянно растут. Таким образом из-за гетерогенности структуры ($\sigma_{\text{вн}}$) возрастает напряжение действующее на изоляционный материал (σ) и его разрушение (8). Внутренние механические напряжения на процесс разрушения изоляции оказывают большее влияние, чем внешние нагрузки.

В термофлуктуационной теории разрушения материалов [24], по Журкову коэффициент γ рассматривается, как прочностная характеристика материала, зависящая от его структурных особенностей. Использование тарировочной зависимости $\gamma = f(U_{\text{ср}})$, рис. 5 [работы Журкова С.Н., Регеля В.Р., Слуцкера А.И., Цоя Б.] позволяет найти параметр γ практически для любых пропиточных составов.

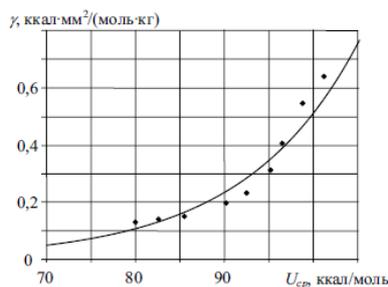


Рис. 5. Зависимость коэффициента γ от средней энергии мономерного звена для полимерных материалов

Таким образом, для определения величины γ исследуемого материала, необходимо рассчитать значения средней энергии мономерного звена (рис. 4) и по тарировочной кривой, представленной на рис. 5, определить величину коэффициента γ .

Определив величины $U_{ср}$, γ , и на основании выражения (8) построим зависимость долговечности изоляционного материала СКЛ (τ), от температуры при различной степени усталости изоляционного материала σ .

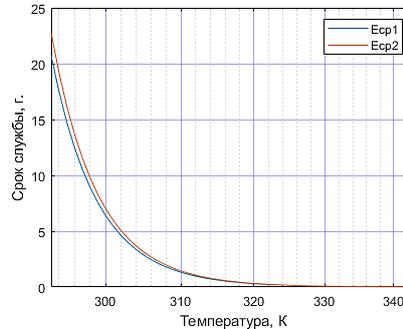


Рис. 6. Зависимость срока службы изоляции от температуры

Заключение. Приведены термодинамические расчеты процессов окисления целлюлозы с возможностью определения наиболее вероятного. Определено, что основными компонентами, разрушающими изоляцию, являются не углерод, как предполагается в [14], (хотя его образование в реальных системах не исключено), а газы, образующиеся при полном окислении. Результаты выполненных исследований позволяют более детально представить предпосылки к развитию ЧР в изоляционном материале и определить необходимые мероприятия по минимизации процессов, приводящих к деструкции основной изоляции кабелей. Показано, что основным воздействующим фактором, вызывающим деструкцию и пробой электроизоляции КЛ, являются термофлуктуационные процессы, возникающие при протекании тока проводимости, и развитие диэлектрических потерь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Полуянович Н.К.* Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. Сер. учебники для вузов. Специальная литература. – 3-е изд. стереотипное. – СПб., 2017.
2. *Полуянович Н.К.* Энергетическая электроника: пособие по решению задач и методические указания. – Таганрог: ТРТУ, 2001.
3. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.
4. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* The method of nondestructive testing and prediction of evolving insulation defect of power line cable // Proceedings of XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM 2012. – 2012. – P. 418-422.
5. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишихонов В.Х.* Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 117-127.
6. *Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S.* The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development // Proceedings of x international saum conference on systems, automatic control and measurements (SAUM 2010). – 2010. – P. 265-269.
7. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3 (46). – С. 25.
8. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2. Сер. "2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies, AMRMT 2017". – 2017. – P. 012036.

9. *Сажин Б.И., Лобанов А.М., Романовская О.С.* Электрические свойства полимеров. – Л.: Химия, 1986. – 224 с.
10. *Макаров Е.В.* Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – М.: Папирус Про, 2004. – Т. 3. – 688 с.
11. *Полюянович Н.К., Дубяго М.Н.* Анализ характеристик и исследование теплового пробоя изоляционных материалов, вызванного частичными разрядами // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2 (71). – С. 157-174.
12. *Бартнев Г.М.* Физика и механика полимеров. – <https://www.ngpedia.ru/id508345p1.html>.
13. *Дубяго М.Н.* Исследование характеристик частичных разрядов в электрической изоляции систем электроснабжения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11. – С. 201-207.
14. Седьмое издание: «Краткий справочник физико-химических величин» / под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
15. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system // 2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013), Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 448-453. – P. 2455-2460.
16. *Prime J.B., Valdes J.G.* Systems to Monitor the Conductor Temperature of Underground Cable // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. PAS-100. – No. 1. – P. 211-219.
17. *Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M.* Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, No. 3. – P. 619-626.
18. *Марьин С.С.* Разработка метода оценки долговечности изоляции низковольтных электрических машин: автореф. дисс. – Томск, 2007.
19. *Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В.* Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1999. – 496 с.
20. *Mazzanti G.* The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – August 2009. – Vol. 16, No. 4. – P. 1168-1179. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=5211872&isnumber=5211830>. – DOI: 10.1109/TDEI.2009.5211872.
21. *Mazzanti G.* Analysis of the Combined Effects of Load Cycling, Thermal Transients, and Electrothermal Stress on Life Expectancy of High-Voltage AC Cables // in IEEE Transactions on Power Delivery. – Oct. 2007. – Vol. 22, No. 4. – P. 2000-2009. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4302537&isnumber=4302501>. – DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905547.
22. *Crine J.P.* On the interpretation of some electrical aging and relaxation phenomena in solid dielectrics // in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – Dec. 2005. – Vol. 12, No. 6. – P. 1089-1107. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=1561789&isnumber=33159>. – DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.
23. *Parpal J.L., Crine, Chinh Dang J.P.* Electrical aging of extruded dielectric cables. A physical model // in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – Apr. 1997. – Vol. 4, No. 2. – P. 197-209. – DOI: 10.1109/94.595247. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=595247&isnumber=13036>.
24. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Burkov D.V.* Estimation of partial discharge energy in a mathematical model of thermal fluctuation processes of a power cable. – Ufa: Publishing complex USATU, 2019. – 642 p.
25. *Полюянович Н.К., Дубяго М.Н.* Анализ и выбор методики в решении задач интеллектуализации систем прогнозирования термофлуктуационных процессов в кабельных сетях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2 (212). – С. 52-66.
26. *Dubyago Marina N., Poluyanovich Irina A., Poluyanovich Nikolay K.* Thermodynamic Approach for Identifying oxidative processes insulation breakdown // Applied Mechanics and Materials. – April 2015. – Vol. 752-753. – P. 1153-1157.
27. Структурно-энергетическая теория прочности. – <http://energydurability.com/index.php/theory-ru/basic-article-ru/2019-02-06-11-02-19/basic-article-ch1-ru>.

REFERENCE

1. *Poluyanovich N.K.* Montazh, naladka, ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Ser. uchebniki dlya vuzov. Spetsial'naya literatura [Installation, commissioning, operation and repair of power supply systems of industrial enterprises. Ser. Textbooks for universities. Special literature]. 3rd ed. Saint Petersburg, 2017.
2. *Poluyanovich N.K.* Energeticheskaya elektronika: posobie po resheniyu zadach i metodicheskie ukazaniya [Power electronics. Manual on problem solving and methodological guidelines]. Taganrog: TRTU, 2001.
3. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improvement of methods of diagnostics and forecasting of electrical insulation materials of power supply systems: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.
4. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* The method of nondestructive testing and prediction of evolving insulation defect of power line cable, *Proceedings of XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM 2012*, 2012, pp. 418-422.
5. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhopov V.Kh.* Metod issledovaniya termofluktuatsionnykh protsessov v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya izolyatsionnykh materialov [Method of investigation of thermal fluctuation processes in problems of diagnostics and forecasting of insulating materials], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2017, Vol. 17, No. 3 (90), pp. 117-127.
6. *Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S.* The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development, *Proceedings of x international saum conference on systems, automatic control and measurements (SAUM 2010)*, 2010, pp. 265-269.
7. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Termodinamicheskiy sposob vyyavleniya destruktivnoy izolyatsii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya resursa kabel'nykh sistem [Thermodynamic method for detecting insulation destruction in problems of diagnostics and forecasting of cable systems resource], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2017, No. 3 (46), pp. 25.
8. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2. Ser. "2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies, AMRMT 2017"*, 2017, pp. 012036.
9. *Sazhin B.I., Lobanov A.M., Romanovskaya O.S.* Elektricheskie svoystva polimerov [Electrical properties of polymers]. Leningrad: Khimiya, 1986, 224 p.
10. *Makarov E.V.* Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV [Handbook of electric power grids of 0.4–35 kV and 110-1150 kV], ed. by I.T. Goryunova, A.A. Lyubimova. Moscow: Papirus Pro, 2004, Vol. 3, 688 p.
11. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Analiz kharakteristik i issledovanie teplovogo proboya izolyatsionnykh materialov, vyzvannogo chastichnymi razryadami [Analysis of the characteristics and investigation of the thermal breakdown of insulating materials, caused by partial discharges], *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of NSTU], 2018, No. 2 (71), pp. 157-174.
12. *Bartneev G.M.* Fizika i mekhanika polimerov [Physics and mechanics of polymers]. Available at: <https://www.ngpedia.ru/id508345p1.html>.
13. *Dubyago M.N.* Issledovanie kharakteristik chastichnykh razryadov v elektricheskoy izolyatsii sistem elektrosnabzheniya [Study of the characteristics of partial discharges in electrical insulation systems of power], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11, pp. 201-207.
14. Sed'moe izdanie: «Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin» [The seventh edition of "a Concise Handbook of physical-chemical values"], ed. by K.P. Mishchenko i A.A. Ravdelya. Leningrad: Khimiya, 1974, 200 p.
15. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system, *2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013), Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 448-453, pp. 2455-2460.
16. *Prime J.B., Valdes J.G.* Systems to Monitor the Conductor Temperature of Underground Cable, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, Vol. PAS-100, No. 1, pp. 211-219.

17. Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M. Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp. 619-626.
18. Mar'in S.S. Razrabotka metoda otsenki dolgovechnosti izolyatsii nizkovol'tnykh elektricheskikh mashin: avtoref. diss. [Development of a method to assess the durability of the insulation of low-voltage electrical machines: abstract of the dissertation]. Tomsk, 2007.
19. Tsoy B., Kartashov E.M., Shevelev V.V. Prochnost' i razrushenie polimernykh plenok i volokon [Strength and destruction of polymer films and fibers]. Moscow: Khimiya, 1999, 496 p.
20. Mazzanti G. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, August 2009, Vol. 16, No. 4, pp. 1168-1179. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5211872&isnumber=5211830>. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5211872.
21. Mazzanti G. Analysis of the Combined Effects of Load Cycling, Thermal Transients, and Electrothermal Stress on Life Expectancy of High-Voltage AC Cables, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Oct. 2007, Vol. 22, No. 4, pp. 2000-2009. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4302537&isnumber=4302501>. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905547.
22. Crine J.P. On the interpretation of some electrical aging and relaxation phenomena in solid dielectrics, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Dec. 2005, Vol. 12, No. 6, pp. 1089-1107. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1561789&isnumber=33159>. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.
23. Parpal J.L., Crine, Chinh Dang J.P. Electrical aging of extruded dielectric cables. A physical model, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Apr. 1997, Vol. 4, No. 2, pp. 197-209. DOI: 10.1109/94.595247. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=595247&isnumber=13036>.
24. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Burkov D.V. Estimation of partial discharge energy in a mathematical model of thermal fluctuation processes of a power cable. Ufa: Publishing complex USATU, 2019, 642 p.
25. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Analiz i vybor metodiki v reshenii zadach intellektualizatsii sistem prognozirovaniya termoflukuatsionnykh protsessov v kabel'nykh setyakh [Analysis and choice of methodology in solving problems of intellectualization of forecasting systems of thermal fluctuation processes in cable networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 52-66.
26. Dubyago Marina N., Poluyanovich Irina A., Poluyanovich Nikolay K. Thermodynamic Approach for Identifying oxidative processes insulation breakdown, *Applied Mechanics and Materials*, April 2015, Vol. 752-753, pp. 1153-1157.
27. Strukturno-energeticheskaya teoriya prochnosti [Structural-energy theory of strength]. Available at: <http://energydurability.com/index.php/theory-ru/basic-article-ru/2019-02-06-11-02-19/basic-article-ch1-ru>.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент М.Г. Левина.

Полюянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Бурьков Дмитрий Владимирович – e-mail: bdv-76@yandex.ru; тел.: 89381015215; кафедра электротехники и мехатроники.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

Burkov Dmitry Vladimirovich – e-mail: bdv-76@yandex.ru; phone: +79381015215; the department of electrical engineering and mechatronics.

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/>.