

ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№1(40)



БИШКЕК

2021

ИЛИМ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И
АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ № 1 (40)

Журнал входит в РИНЦ, а также в перечень
ВАК Кыргызской Республики рецензируемых
научных журналов, в которых должны быть опубликованы
основные результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук

Журнал издается с 1996 года.

Зарегистрирован Министерством юстиции
Кыргызской Республики
Свидетельство № 1503 от 24 марта 2020 г.



П 78

Проблемы автоматизации и управления: Научно-технический журнал
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики.–
Бишкек: ИМА, 2021.– №1 (40).– 83 с.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

д.т.н., профессор Брякин Иван Васильевич 
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

к.т.н. Верзунов Сергей Николаевич 
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

д.т.н., академик РАН Евтушенко Юрий Гаврилович 
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН (Москва)

д.т.н., член-кор. АЭН РФ Карандаев Александр Сергеевич 
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск)

д.ф.-м.н. академик НАН РК Калимолдаев Максат Нурадилович
Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы)

д.т.н., член-кор. АЭН РФ Макаричев Юрий Александрович 
Самарский государственный технический университет (Самара)

д.т.н., профессор Храмшин Вадим Рифхатович 
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск)

д.т.н., профессор Еремин Евгений Леонидович 
Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск)

д.т.н., профессор Лыченко Наталья Михайловна 
Кыргызско-Российский славянский университет (Бишкек)

д.т.н., профессор Исмаилов Бактыбек Исакович 
Агентство по аккредитации образовательных программ и организаций (Бишкек)

д.т.н., профессор Бочкарев Игорь Викторович 
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (Бишкек)

д.т.н., профессор Галбаев Жалалидин Токтобаевич 
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (Бишкек)

д.ф.-м.н., профессор Сатыбаев Абдуганы Джунусович 
Ошский технологический университет им. акад. М.М. Адышева (Ош)

д.т.н., профессор Бакасова Айна Бакасовна 
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

д.т.н. Янко Дмитрий Владимирович 
ОАО «Кыргызтелеком» (Бишкек)

к.ф.-м.н., с.н.с. Керимкулова Гулсаат Кубатбековна 
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

к.т.н. Аскалиева Гулзада Орозобаевна 
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

В журнале публикуются статьи по информационным технологиям и обработке информации, математическому и компьютерному моделированию динамических систем и процессов, автоматическому управлению динамическими системами и процессами

Контакты редакции:

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265.

Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук КР.

Телефон: +996 553 72-20-30.

E-mail: verzunov@hotmail.com

Полная электронная версия журнала: <https://ima.naskr.kg/jrn/index.php/pau>

ISSN 1694-5050 © Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, 2021

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.317.6

Т. Кабаев, Н.А. Абыкаева

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
Бишкек Кыргызстан*

E-mail: tkabaev1947@gmail.ru, nsg-83@mail.ru

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ПРИБОРА В СРЕДЕ LABVIEW ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Статья посвящена применению компьютерной программы LabVIEW для анализа переходных процессов в электрических цепях. Приведены примеры моделирования переходного процесса в колебательных системах и моделирования виртуального инструмента по созданию фигур Лиссажу для учебной цели. Даны сведения по работе с программой, моделирование, обработка сигналов и результаты научного эксперимента. Программа может использоваться в учебном процессе для проведения лабораторных работ, что позволяет повысить эффективность обучения студентов.

Ключевые слова: компьютерная среда LabVIEW, моделирование, переходный процесс, осциллограмма.

Введение. Исследование характера переходных процессов требует понимания физики происходящих явлений и умения анализировать переходные процессы в электрических цепях. Поэтому задача получения количественного и качественного анализа переходных процессов в электрических цепях очень актуальна [1]. Использование технологии приборов (инструментов –VI) в среде LabVIEW [2] достигает раскрытия физических процессов, происходящих в результате короткого замыкания, ферромагнитного резонанса, коммутационного и грозового перенапряжения в электрических цепях.

В основе технологии использования LabVIEW лежит комбинирование моделирования систем на ЭВМ, включающее аналитическое, имитационное и натурное. Для аналитического моделирования характерно то, что алгоритм функционирования системы записывается в виде некоторых аналитических соотношений (алгебраических, интегрально-дифференциальных, конечно, разностных и т.п.) или логических условий. При имитационном моделировании алгоритм функционирования системы воспроизводится во времени с сохранением логической структуры и последовательности протекания элементарных явлений, составляющих процесс. В настоящее время имитационное моделирование наиболее эффективный метод исследования систем, а часто и единственный практически доступный метод получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования.

Натурным моделированием называют проведение исследования на реальном объекте с возможностью вмешательства человека в процесс проведения эксперимента и последующей обработки на ЭВМ. Отличие модельного эксперимента от реального заключается в том, что в модельном эксперименте могут быть реализованы любые ситуации, в том числе «невозможные» и аварийные, что в силу разных причин бывает недопустимо при работе с реальными объектами. Все представленные виды моделирования могут быть реализованы с использованием системы программирования LabVIEW.

LabVIEW может успешно применяться в образовательных и научных целях, при промышленной автоматизации, в проектных и коммерческих структурах, связанных с тестированием и измерением каких-либо параметров, их анализом, визуализацией результатов, созданием баз данных, использованием компьютерных сетей.

Постановка задачи. В данной статье рассматриваются возможности применения системы программирования LabVIEW для моделирования и изучения переходных процессов в электрических цепях. Программа дает возможность создать виртуальную лабораторию с большим набором различных активных и пассивных элементов электрических цепей и широкий спектр контрольно-измерительных приборов, а также с использованием интеллектуального инструмента LabVIEW решать дифференциальные уравнения и позволяет виртуально моделировать физические процессы.

По результату такого моделирования принимают меры во избежание и использования нежелательных процессов, связанных с электромагнитными колебаниями. После упрощения схемы некоторых электрических цепей (рис.1) получим схему замещения (рис.2) так называемого колебательного контура, и последний состоит из последовательно соединенного конденсатора с емкостью C , катушки с индуктивностью L и электрического сопротивления R (рис.2) [4].

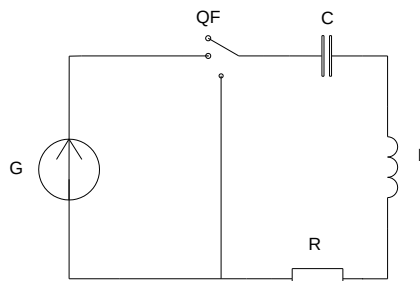


Рисунок 1 – Электрическая цепь

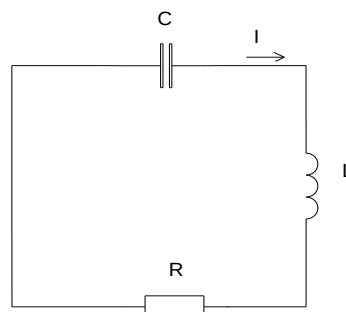


Рисунок 2 – Схема замещения

Баланс напряжения в цепи колебательного контура описывает следующим выражением [4]:

$$IR - U_C = -L \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

где I – ток в контуре, U – разность потенциалов на обкладках конденсатора в данный момент. $L \frac{dI}{dt}$ – ЭДС самоиндукции. Напряжение на конденсаторе равно:

$$U_C = \frac{q}{C}.$$

После дифференцирования выражения (1) по времени t получим следующее выражение:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0. \quad (2)$$

Это выражение представляет собой дифференциальное уравнение, решая которое, мы можем найти зависимость заряда от времени. Разделим обе части этого уравнения на L и введем следующие обозначения:

$$\frac{R}{2L} = \beta; \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2. \quad (3)$$

Тогда окончательно получим следующее дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\alpha \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (4)$$

Решение этого уравнения относительно q с учетом граничных условий ($t = 0; q = q_0; I = 0$) имеет вид:

$$q = Ae^{-\beta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклическая частота.

Преобразуем выражение (4) и (5) относительно U и с применением алфавита LabVIEW:

1. β выражаем через al .
2. ω_0 выражаем через omO .
3. ω выражаем через omc .
4. φ выражаем через tet .
5. Потенциал U на обкладках конденсатора выражаем UC (мгновенное значение).
6. Мгновенное значение тока в контуре обозначаем через i .
7. Время t через k .

Получим следующие выражения (6):

$$\begin{aligned} al &= R/(2 * L) \\ omO &= \frac{1}{\sqrt{L * C}}; \\ omc &= \sqrt{omO^2 - al^2}; \\ tet &= \arctan(omc/al) \\ UC &= U * \left(\frac{omO}{omc}\right) * \exp(-al * k) * \sin(omc * k + tet) \\ i &= U * \left(\frac{1}{omc} * L\right) * \exp(-al * k) * \sin(omc * k); \\ Ul &= U * \left(\frac{omO}{omc}\right) * \exp\left(\frac{a}{L} * k\right) * \sin(omc * k - tet). \end{aligned} \quad (6)$$

Используя последние выражения (6) с помощью LabVIEW, создаем платформу решения уравнения согласно формуле (4) аналитическим моделированием. На мониторе компьютера увидим платформу в виде фронтпанели и блок-диаграммы. Для пользования LabVIEW должны приобрести и ввести в компьютер программу LabVIEW. Фронтпанель как прибор ручками варьирования T – время цикла, U – напряжения, R – электрического

сопротивления, индуктивности L и емкости C , и с экраном осциллографа. При вводе изменением T , U , R , L и C на экран выводится соответствующая осциллограмма согласно рисункам 3 и 4.

На блок-диаграмме записывают выражение (6) и вводят параметры T , U , R , L и C , где соответствующая программа LabVIEW выполняет решения этих уравнений. Дифференциальные уравнения решают другим способом, где на блок-диаграмме выполняют имитационное моделирование, и результат получаем вышеуказанным способом.

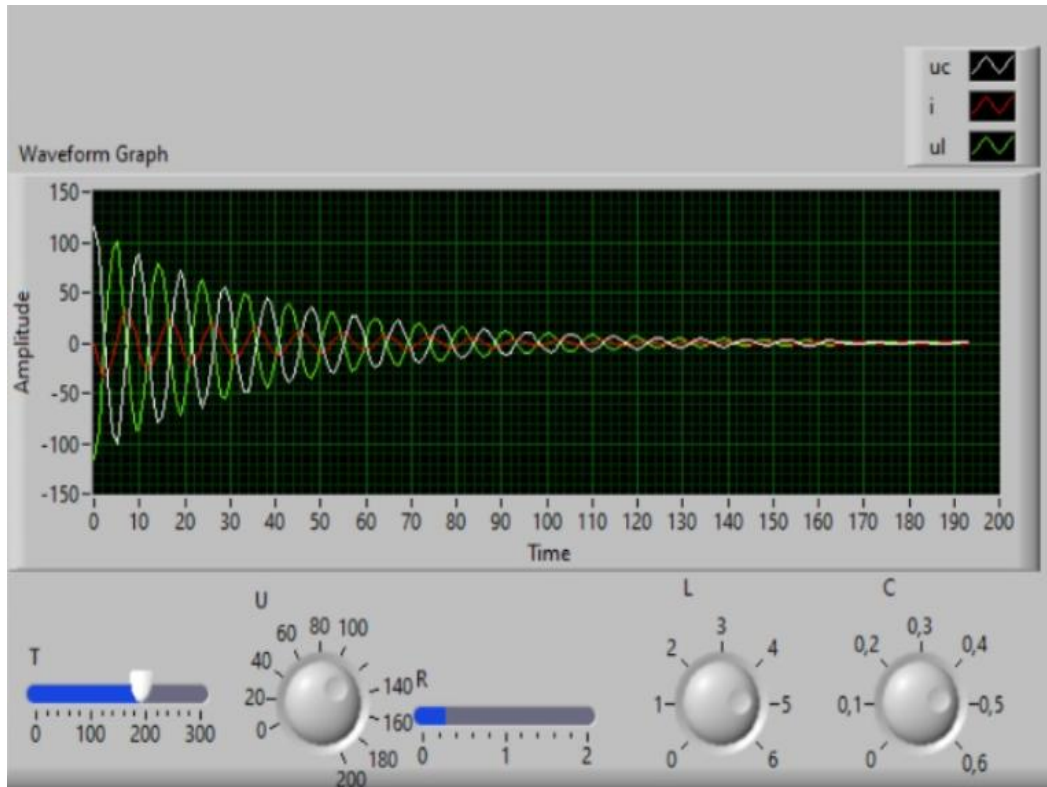


Рисунок 3 – Фронтпанель для решения линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка в среде LabVIEW

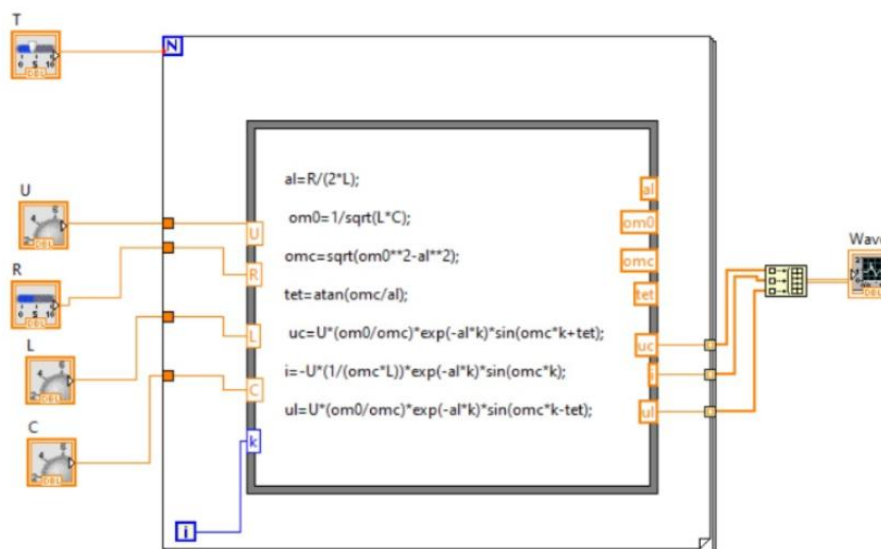


Рисунок 4 – Блок -диаграмма для решения линейного дифференциального уравнения второго порядка в среде LabVIEW

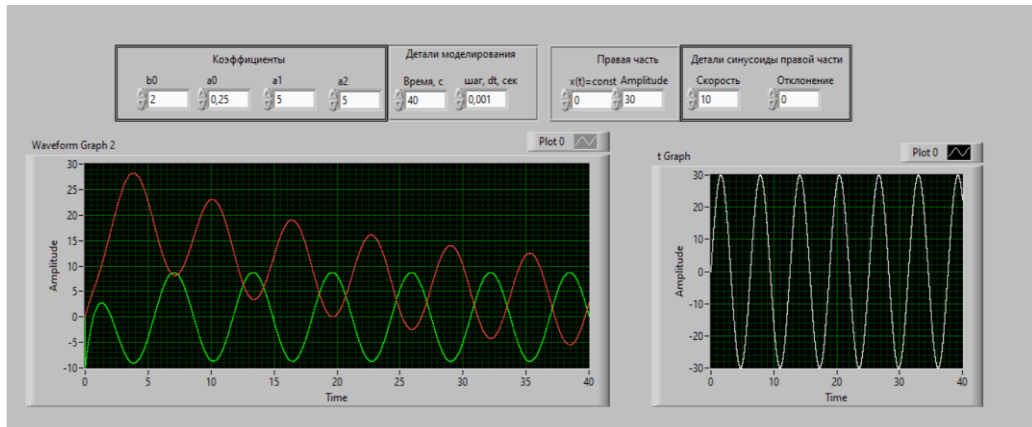


Рисунок 5 – Фронтпанель для решения линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка в среде LabVIEW

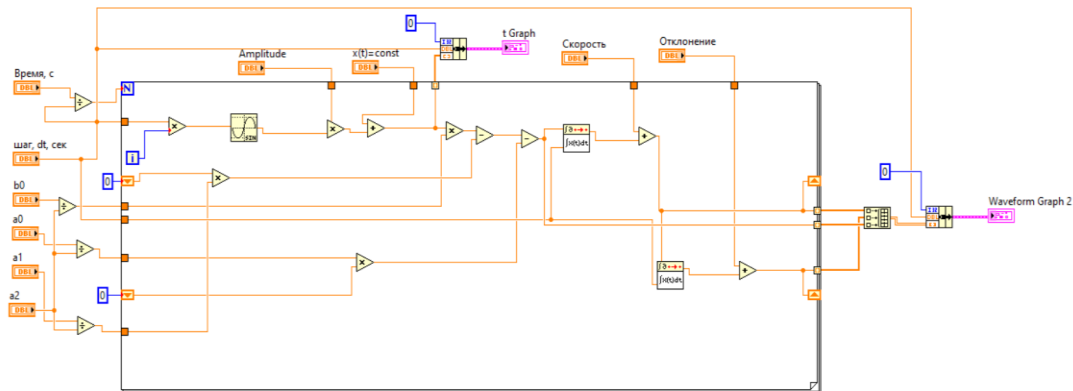


Рисунок 6 – Блок- диаграмма для решения линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка в среде LabVIEW

Таким образом, в среде LabVIEW имеем возможность моделировать различные режимы переходных процессов в электрических цепях. Использование этой программы в учебном процессе предоставляет преподавателю большие возможности в наглядном разъяснении физических явлений и зависимостей при изучении переходных процессов, происходящих в электрических цепях. В учебной программе имеется необходимость в создании на основе системы программирования в среде LabVIEW некоторых геометрических фигур и линий. Например, эта программа (платформа) прекрасна тем, что по графику алгебраических и тригонометрических уравнений визуально увидят решения. В учебных целях моделируем траектории тела на плоскости при «одновременном» движении по осям декартовых координат. Как известно, при синусоидальном движении по обеим осям декартовых координат траектория тела описывает фигуру Лиссажу, и по этой фигуре определяют соотношение частот, амплитуд и начальных фаз синусоид. Имитационная модель по созданию «галереи» фигур Лиссажу (рис.7) и (рис.8) гораздо проще и оперативнее, чем реальная. Представим рисунки из осциллограммы в разных сочетаниях параметров как амплитуды, частоты и начальной фазы.

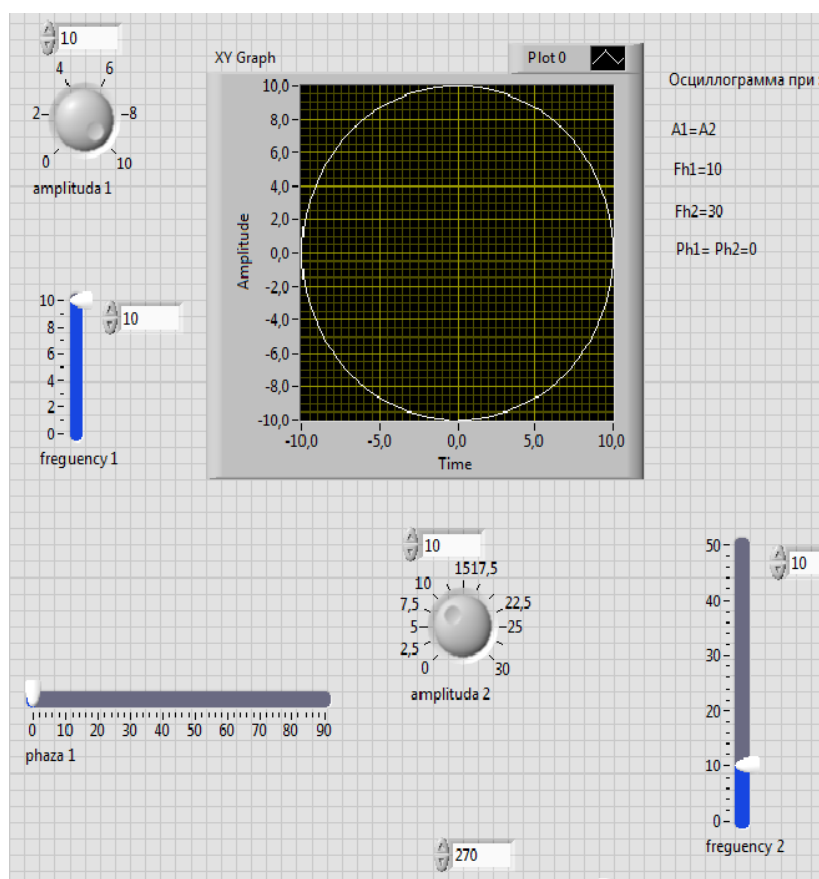


Рисунок 7 – Фронтпанель с изображением фигуры Лиссажу

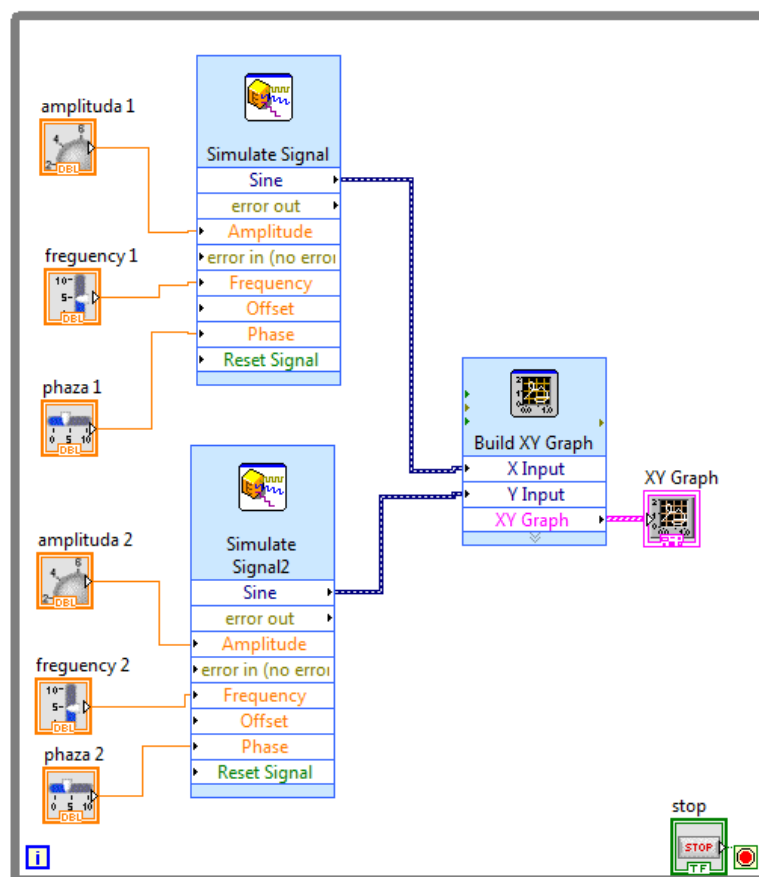


Рисунок 8 – Блок-диаграмма фигуры Лиссажу

Введены следующие обозначения:

A_1, A_2 –амплитуда синусоид;

φ_1, φ_2 –начальная фаза;

f_1, f_2 –частота.

Взаимно перпендикулярные колебания по осям декартовых координат совершают гармоническое движение согласно выражениям:

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (7)$$

$$y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2), \quad (8)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$ и $\omega_2 = 2\pi f_2$ – угловая частоты двух колебаний; f_1, f_2 – частота колебаний; t – время.

На фронтпанеле получим прямую линию, которая располагается на декартовой координате либо 1-3 в квадранте либо 2-4 в квадранте (рис. 9а), если амплитуды $A_1 = A_2$, частота $f_1 = f_2$, разность начальных фаз $\varphi_1 - \varphi_2 = \pm\pi n$, где $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

При $A_1 = A_2, f_1 = f_2$ т. е. $\varphi_1 - \varphi_2 = \pm\pi/2(2n + 1)$ получится окружность (рис.9б). Если периоды представляют целые числа, то через промежуток времени, равный наименьшему кратному обоим периодам, движущаяся точка снова возвращается в то же положение — получаются фигуры Лиссажу более сложной формы. При $A_1 = A_2, \varphi_1 = \varphi_2$, $\frac{f_1}{f_2} = 2n$ создаются фигуры (рис.9в и рис.9г).

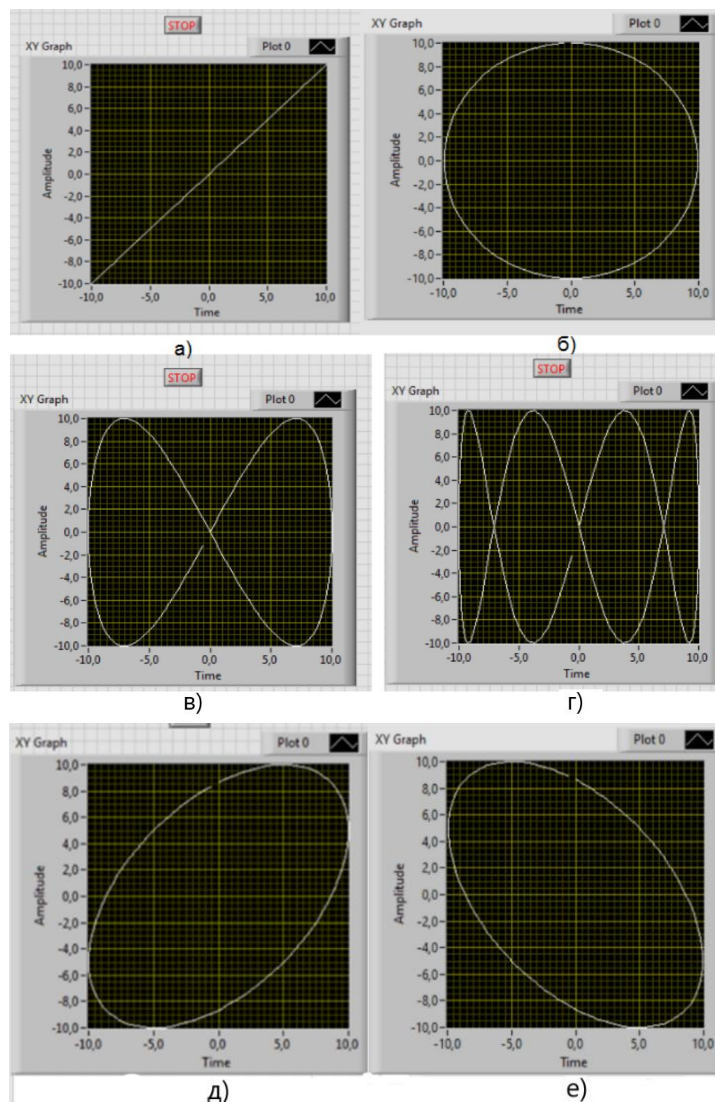


Рисунок 9 –Вид фигур Лиссажу в среде LabVIEW

В простейшем случае равенства обоих периодов фигуры представляют собой эллипсы. При $A_1 = A_2$, $\varphi_1 = \varphi_2$, $f_1 = f_2$, $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/3$ (рис.9д), $\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi/3$ (рис.9е).

При $A_1 = A_2$, $\varphi_1 = \varphi_2$, $\frac{f_1}{f_2} = 2n + 1$ создаются фигуры (рис.10а и рис.10б).

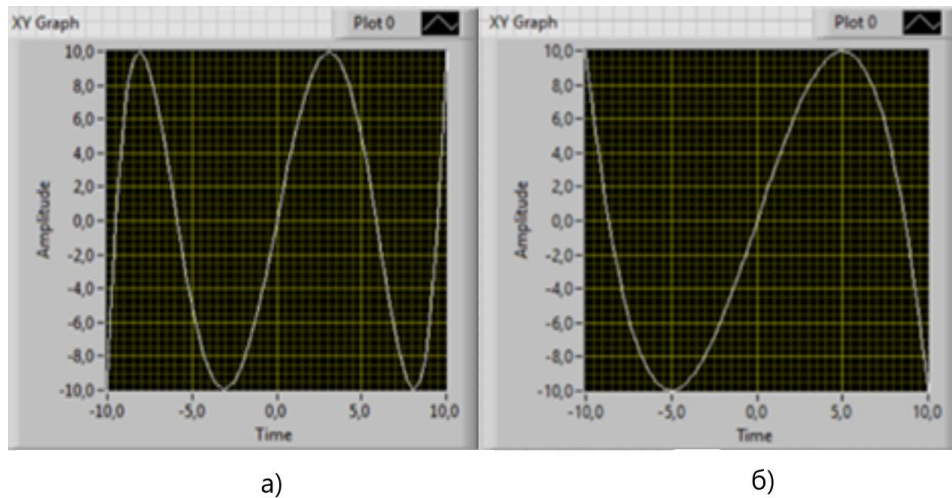


Рисунок 10 – Вид фигур Лиссажу в среде LabVIEW

Заключение

Создание имитационных моделей и их применение в исследовании переходных процессов в виде затухающих и вынужденных колебаний в электрических цепях дает возможность раскрывать характер этих явлений. Кроме того, эта работа имеет цели популяризации программы LabVIEW и проведение лабораторных работ курса физики в совместном выполнении на реальных и имитационных моделях. Относительно фигур Лиссажу нужно отметить, что на имитационной модели созданы фигуры в более простом сочетании параметров.

Литература

1. Усов С.В., Кантан В.В., Кизеветтер Е.Н. Михалев Б.Н., Черновец А.К. Электрическая часть электростанций «Энергия». – Ленинград, 1977.
2. Магда Ю.С. Практический курс для инженеров и разработчиков. – М., 2012г.
3. Калашников С. Г. Электричество. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Наука, 1977.
4. Методическое руководство к лабораторным работам по разделу «Электромагнитные колебания и волны» для всех специальностей/ КГТУ им. И.Раззакова; Сост.: Абакирова Ж.А., Марипов А.М., Омуралиева К.О. / -Б.: ИЦ «Техник» 2014. – 16 с.
5. Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И. LabVIEW для радиоинженеров: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. – М.: ДМК Пресс, 2007.
6. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW –М.: ДМК Пресс, 2007. – 472 с.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М., 1968.
8. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления: В 2-х томах. Т. 2. – М.: Интеграл-Пресс, 2003.

9. <http://www.gaps.tstu.ru/win-1251/lab/sreda1/scada/win-1251/s2.html> (дата обращения 26.04.2021)
10. <http://media.ls.urfu.ru/510/1322/2966/> (дата обращения 26.04.2021)
11. https://mipt.ru/upload/medialibrary/88b/Lab_LabView.pdf (дата обращения 26.04.2021)
12. <https://studfile.net/preview/5759839/> (дата обращения 26.04.2021)

С.Н. Верзунов¹, Х.А. Раимжанов²

¹*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан*

²*Кыргызско-Российский славянский университет, Бишкек, Кыргызстан*

СРАВНЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБУЧЕННЫХ CNN ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ COVID-19 ПО РЕНТГЕНОВСКИМ СНИМКАМ

В результате клинических исследований было обнаружено, что рентгеновские снимки грудной клетки могут иметь большое значение для оценки пациентов с COVID-19, особенно для решения проблемы недостаточной пропускной способности служб скорой помощи и ковидных стационаров. В настоящее время методы глубокого обучения играют доминирующую роль в создании высокопроизводительных классификаторов при обнаружении этого заболевания с помощью рентгеновских лучей грудной клетки. Учитывая, что для уже было разработано много новых моделей на основе нейронных сетей, цель этого исследования – изучить различные варианты предварительно обученных сверточных нейронных сетей для диагностики COVID-19 с использованием рентгеновских снимков грудной клетки и сравнить их с другими моделями.

Ключевые слова: COVID-19, глубокое обучение, CNN, предварительно обученные сверточные сети.

Введение

После вспышки коронавирусной инфекции COVID-19 и ее объявления ВОЗ пандемией в марте 2020 года во всем мире были приняты беспрецедентные меры для сдерживания распространения болезни. При этом было доказано, что одним из ключевых факторов сдерживания болезни является быстрая и точная идентификация инфицированных пациентов, их адекватное лечение и изоляция от остального населения [1]. В настоящее время полимеразная цепная реакция (ПЦР) с обратной транскрипцией остается основным диагностическим инструментом, но роль рентгенографических методов исследования грудной клетки как дополнительных методов диагностики или даже надежной альтернативы получает все большее значение [2]. Объясняется это тем, что получение результатов ПЦР-теста может занять несколько дней, напротив информация, полученная при рентгенографическом исследовании, может быть незамедлительно использована для быстрой диагностики при сравнительно небольших затратах.

Тем не менее интерпретация рентгеновских снимков затруднительна, так как для того, чтобы обнаруживать тонкие визуальные особенности, присутствующие на изображениях, требуется достаточно высокая квалификация врачебного персонала. Напротив, система искусственного интеллекта (СИИ) может обнаруживать закономерности на рентгенограммах грудной клетки, обычно не распознающиеся врачами-радиологами, и в различных изданиях [3, 4, 5] было опубликовано множество исследований о новых разработках моделей СИИ с использованием сверточных нейронных сетей (convolutional neural network, CNN) с целью дифференцирования COVID-19 от других заболеваний с использованием общедоступных баз данных рентгеновских снимков грудной клетки. Как показано в этих работах, СИИ на основе технологий глубокого обучения позволила бы улучшить возможности рентгенографии с точки зрения распознавания типичных признаков COVID-19 и отделения ее от других типов пневмонии и, кроме того, могло бы ускорить диагностику больных и улучшить степень

определения риска тяжелого течения болезни в случаях с неопределенными результатами при отсутствии других диагностических методов.

Ранее разными авторами уже предпринимались попытки разработать СИИ для этой цели. Например, сеть Bayes-SqueezeNet [6] на основе метода байесовской оптимизации была использована для классификации рентгеновских снимков, разделенных на 3 класса: норма, вирусная пневмония и COVID-19. Благодаря широко известному методу расширения данных авторам удалось частично решить проблему переобучения сети на небольшом объеме данных.

СИИ CoroNet [7] также была разработана для обнаружения инфекции COVID-19 по рентгеновским снимкам грудной клетки. Эта модель основана на предварительно обученной CNN Xception с добавлением слоя прореживания и двух полносвязных слоев в конце. Сеть применялась для классификации по 3 классам (COVID-19, пневмония и норма, а также для классификации по 4 классам (COVID-19, бактериальная пневмония, вирусная пневмония и норма).

СИИ CovidGAN [8] с использованием генеративной состязательной сети была построена на основе предварительно обученной CNN VGG-16, дополненной четырьмя настраиваемыми сверточными слоями в конце и выбора среднего значения из соседних, за которым следовал полносвязный слой с 64 нейронами и слой прореживания с вероятностью 0.5 в конце. Также авторами была использована генеративно-состязательная сеть для создания синтетических рентгеновских изображений грудной клетки с целью расширения имеющегося объема данных и повышения эффективности классификации.

СИИ DarkCovidNet [9], основанная на модели DarkNet [10], является еще одной моделью CNN, предложенной для обнаружения COVID-19 с помощью рентгеновских снимков грудной клетки. DarkCovidNet состоит из меньшего, по сравнению с DarkNet количества слоев, и постепенно увеличивающихся фильтров выбора максимального значения из соседних. Эта СИИ была протестирована на 2 классах (COVID-19 и норма) и 3 классах (COVID-19, норма и пневмония).

В работе [11] были реализованы VGG-19, MobileNet-v2, Inception, Xception и Inception ResNet-v2, а в работе [12] сети AlexNet, GoogLeNet, and SqueezeNet, в качестве предварительно обученных CNN для обнаружения COVID-19 по рентгеновским снимкам. Эти СИИ были использованы для классификации на 2 и 3 класса с помощью наборов данных, состоящих из изображений COVID-19, бактериальной пневмонии, вирусной пневмонии и нормы.

Постановка задачи

Целью настоящего исследования является проверка того, можно ли построить надежный классификатор на основе технологий глубокого обучения с помощью предварительно обученной глубокой сверточной нейронной сети, дообученной на сравнительно небольшом объеме данных, а также сравнить различные варианты предварительно обученных нейронных сетей на базе: DenseNet[13], EfficientNet[14], InceptionResNetV2[15], InceptionV3[16], MobileNet[17], MobileNetV2[18], MobileNetV3[19], NASNet[20], ResNet[21], ResNetV2[22], VGG[23], Xception[24].

Эти предварительно обученные CNN выбраны по той причине, что они все входят в состав свободно распространяемого фреймворка Keras [25]. Классификация выполнялась по двум классам COVID-19 и норма, исходя из имеющихся в настоящее время в распоряжении авторов объема исходных данных для обучения. При этом, остальные возможные классы, например, пневмония, туберкулёз и т.д. в настоящем исследовании не учитываются.

Предварительно обученные сверточные нейронные сети

Основные параметры некоторых используемых предварительно обученных нейронных сетей приведены в табл. 1. Полностью гиперпараметры всех используемых нейронных сетей даны в работах [13-24]. В предварительно обученных сетях последний слой с настраиваемыми весами является полносвязным слоем. Этот полносвязный слой был заменен новой последовательностью слоев, состоящей из слоя выбора максимального значения из соседних размером 4X4, промежуточного слоя для согласования размеров тензоров на выходе предыдущего слоя с входом последующего, полносвязного слоя, состоящего из 128 нейронов, слоя прореживания с вероятностью 0.6 и выходного слоя из 2 нейронов, так как классификация производится по двум классам.

Таблица 1. Основные параметры предварительно обученных CNN

№ п.п.	Модель	Размер	Топ-1 по точности	Топ-5 по точности	Количество параметров	Глубина
1.	Xception	88 MB	0.790	0.945	22,910,480	126
2.	VGG16	528 MB	0.713	0.901	138,357,544	23
3.	VGG19	549 MB	0.713	0.900	143,667,240	26
4.	ResNet50	98 MB	0.749	0.921	25,636,712	-
5.	ResNet101	171 MB	0.764	0.928	44,707,176	-
6.	ResNet152	232 MB	0.766	0.931	60,419,944	-
7.	ResNet50V2	98 MB	0.760	0.930	25,613,800	-
8.	ResNet101V2	171 MB	0.772	0.938	44,675,560	-
9.	ResNet152V2	232 MB	0.780	0.942	60,380,648	-
10.	InceptionV3	92 MB	0.779	0.937	23,851,784	159
11.	InceptionResNetV2	215 MB	0.803	0.953	55,873,736	572
12.	MobileNet	16 MB	0.704	0.895	4,253,864	88
13.	MobileNetV2	14 MB	0.713	0.901	3,538,984	88
14.	DenseNet121	33 MB	0.750	0.923	8,062,504	121
15.	DenseNet169	57 MB	0.762	0.932	14,307,880	169
16.	DenseNet201	80 MB	0.773	0.936	20,242,984	201
17.	NASNetMobile	23 MB	0.744	0.919	5,326,716	-
18.	NASNetLarge	343 MB	0.825	0.960	88,949,818	-
19.	EfficientNetB0	29 MB	-	-	5,330,571	-
20.	EfficientNetB1	31 MB	-	-	7,856,239	-
21.	EfficientNetB2	36 MB	-	-	9,177,569	-
22.	EfficientNetB3	48 MB	-	-	12,320,535	-
23.	EfficientNetB4	75 MB	-	-	19,466,823	-
24.	EfficientNetB5	118 MB	-	-	30,562,527	-
25.	EfficientNetB6	166 MB	-	-	43,265,143	-
26.	EfficientNetB7	256 MB	-	-	66,658,687	-

Исходные рентгеновские снимки грудной клетки были приведены к формату RGB и преобразованы таким образом, чтобы их размер соответствовал входному размеру предварительно обученных CNN – 224x224 точек. Для дополнительного обучения нейросетевых классификаторов использовался оптимизатор Adam [26], основанный на стохастическом градиентном спуске и адаптивной оценке моментов первого и второго порядков с параметром начальной скорости обучения $L_r=0.001$ и постоянной скоростью уменьшения до нуля на протяжении всего процесса обучения эпох, с размером пакетов при обучении, равном 10 и экспоненциальной скорости затухания для 1-го момента $\beta_1 = 0.9$, для

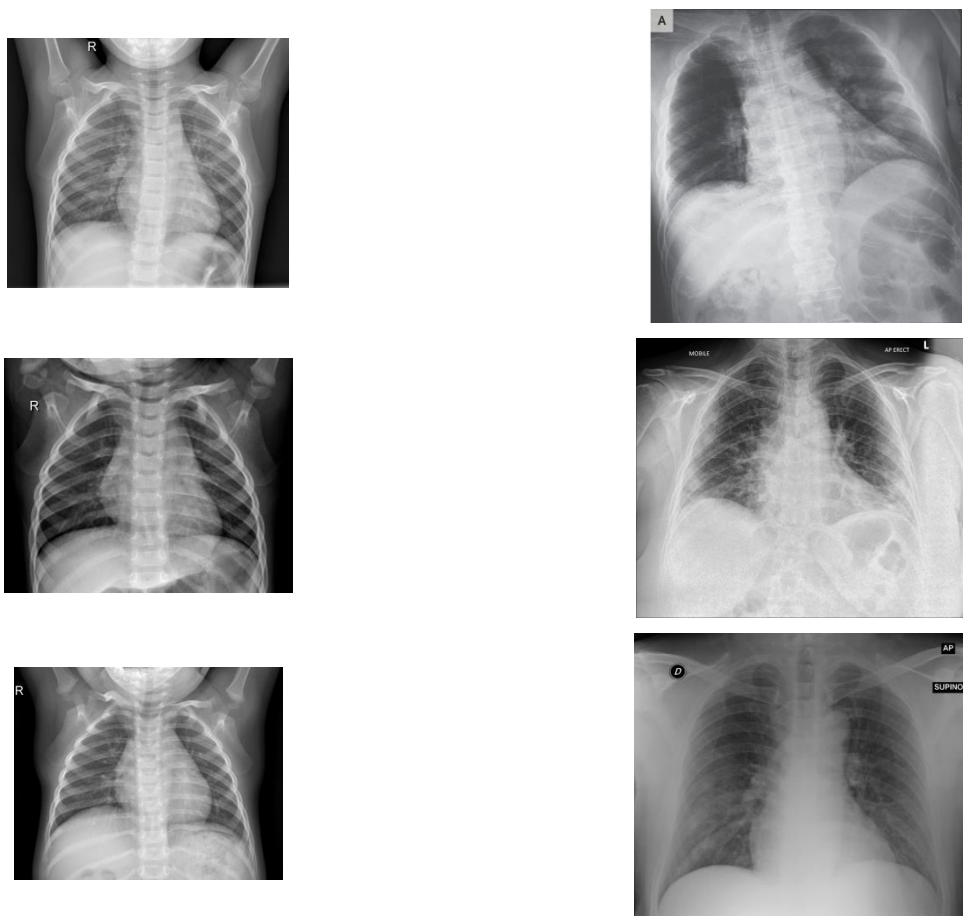
2-го момента $\beta_2=0.999$ и константой численной стабильности $\varepsilon=10^{-7}$. При дополнительном обучении веса предварительно обученных CNN оставались зафиксированными, т.е. не изменялись, в процессе дополнительного обучения настраивались только веса двух добавленных полносвязных слоев.

Исходные данные

В настоящей работе использовались 2 общедоступные базы данных рентгеновских снимков грудной клетки:

1. Chest X-Ray Images (Pneumonia) [27].
2. COVID-19 image data collection [28].

Набор данных [27] состоит из рентгеновских снимков грудной клетки здоровых людей и пациентов с бактериальной и вирусной пневмонией. Всего имеется 5856 рентгенограмм в передней прямой проекции, примерно 2/3 из них принадлежит пациентам, больным пневмонией, приблизительно поровну вирусной и бактериальной, а остальная часть здоровым пациентам.



а) Chest X-Ray Images

норма

б) COVID-19 image data collection

COVID-19

Рисунок 1 – Наборы данных: а) Chest X-Ray Images; б) COVID-19 image data collection

Набор [28] содержит 468 рентгеновских снимков грудной клетки пациентов с COVID-19, 38 снимков с вирусной пневмонией, 46 снимков с бактериальной пневмонией, 26 снимков с грибковой пневмонией, 9 снимков с пневмонией другого типа и 59 изображений другого типа.

Из первого набора был выбран 191 рентгеновский снимок грудной клетки здоровых людей в передней прямой проекции (рис. 1 а), а из второго набора 191 снимок грудной клетки пациентов, больных COVID-19 (рис. 1б) в передней и задней прямой проекции с дополнением данных путем случайного поворота на величину до 15° и случайного отражения в горизонтальной плоскости. Дополнение отражением необходимо, так как в данных из первого набора присутствуют снимки только в передней проекции, во втором наборе как в передней, так и в задней проекции, а небольшой поворот изображения часто встречается при вводе изображения с помощью сканера или камеры. Для сравнения с другими работами использовался отдельный набор данных, включающих 403 рентгеновских снимка грудной клетки с COVID-19 [27] и 721 рентгеновский снимок грудной клетки здоровых людей [28] без дополнения. Этот набор данных необходим для сравнения с исследованиями, опубликованными в работах [8, 12].

Методы оценки обученных нейронных сетей

Как и в работе [12] использовались 6 характеристик для сравнения результатов дополнительного обучения глубоких нейронных сетей на основе различных вариантов CNN – верность, чувствительность, специфичность, точность, оценка F_1 и площадь под ROC-кривой (receiver operating characteristic, рабочая характеристика приемника), т.н. AUC (area under ROC curve).

Чувствительность S_e определяется как процент пациентов с COVID-19, у которых инфекция правильно диагностирована, и выражается как:

$$S_e = T_p / P \times 100\% = T_p / (T_p + F_n) \times 100\%, \quad (1)$$

где T_p – количество пациентов с COVID-19, правильно идентифицированных как инфицированные; F_n – количество пациентов с COVID-19, ошибочно идентифицированных как не инфицированные и P – общее количество больных COVID-19.

Специфичность S_p определяется как процент людей, не инфицированных COVID-19, правильно идентифицированных как не инфицированные:

$$S_p = T_n / N \times 100\% = T_n / (T_n + F_p) \times 100\%, \quad (2)$$

где T_n – количество людей, не инфицированных COVID-19, правильно идентифицированных как не инфицированные; F_p – количество людей, не инфицированных COVID-19, ошибочно идентифицированных как инфицированные и N – общее количество людей, не инфицированных COVID-19.

Точность A_c классификации определяется как

$$A_c = (T_p + T_n) / (P + N) \times 100\%. \quad (3)$$

Верность P_r классификации определяется как

$$P_r = T_p / (T_p + F_p) \times 100\%. \quad (4)$$

Оценка F_1 определяется как среднее гармоническое между точностью и чувствительностью:

$$F_1 = 2T_p / (2T_p + F_p + F_n). \quad (5)$$

ROC представляет собой график, отображающий соотношение между T_p и F_p при варьировании порога решающего правила, а AUC представляет собой меру производительности классификатора. Чем выше AUC, тем лучше модель диагностирует COVID-19, отличая его от случаев, не связанных с ним. Для идеального классификатора $AUC=1$, а $AUC=0.5$ показывает, что классификатор работает случайным образом.

Результаты

Результаты представлены в табл. 2 в виде средних значений и доверительного интервала всех вышеперечисленных характеристик (1-5) для трёх случайных разбиений

Таблица 2. Результаты численного моделирования

№ п/п	CNN	Точность (%)	Чувствительность (%)	Специфичность (%)	Верность(%)	Оценка F ₁	AUC
	10 эпох обучения						
	<i>80% обучающих и 20% проверочных данных</i>						
1.	DenseNet121	97.4026±8.5356	100.0000±0.0000	94.7368±17.2958	95.3788±14.8338	0.9757±0.0789	0.9737±0.0865
2.	DenseNet169	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	1.0000±0.0000	1.0000±0.0000
3.	DenseNet201	98.2684±4.9280	99.1453±3.6775	97.3684±6.5372	97.5000±6.2103	0.9831±0.0480	0.9826±0.0495
4.	EfficientNetB0	50.2165±1.8626	66.6667±143.4218	33.3333±143.4218	-	0.4483±0.9644	0.5000±0.0000
5.	EfficientNetB1	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
6.	EfficientNetB2	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
7.	EfficientNetB3	50.2165±1.8626	66.6667±143.4218	33.3333±143.4218	-	0.4483±0.9644	0.5000±0.0000
8.	EfficientNetB4	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
9.	EfficientNetB5	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
10.	EfficientNetB6	50.6494±0.0000	100.0000±0.0000	0.0000±0.0000	50.6494±0.0000	0.6724±0.0000	0.5000±0.0000
11.	EfficientNetB7	50.2165±1.8626	66.6667±143.4218	33.3333±143.4218	-	0.4483±0.9644	0.5000±0.0000
12.	InceptionResNetV2	96.9697±1.8626	96.5812±3.6775	97.3684±6.5372	97.4786±6.2110	0.9700±0.0172	0.9697±0.0191
13.	InceptionV3	98.2684±1.8626	99.1453±3.6775	97.3684±6.5372	97.5407±6.0595	0.9831±0.0175	0.9826±0.0191
14.	MobileNet	98.7013±0.0000	100.0000±0.0000	97.3684±0.0000	97.5000±0.0000	0.9873±0.0000	0.9868±0.0000
15.	MobileNetV2	99.5671±1.8626	100.0000±0.0000	99.1228±3.7743	99.1667±3.5855	0.9958±0.0182	0.9956±0.0189
16.	MobileNetV3Large	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
17.	MobileNetV3Small	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
18.	NASNetLarge	99.1342±3.7252	100.0000±0.0000	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9917±0.0359	0.9912±0.0377
19.	NASNetMobile	98.7013±3.2262	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9873±0.0311	0.9870±0.0327
20.	ResNet101	91.3420±10.3706	95.7265±13.2593	86.8421±13.0744	88.2672±10.5787	0.9179±0.0996	0.9128±0.1037
21.	ResNet101V2	98.7013±0.0000	97.4359±0.0000	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	0.9870±0.0000	0.9872±0.0000
22.	ResNet152	80.9524±9.3131	82.9060±32.6862	78.9474±51.8875	82.8451±30.9197	0.8156±0.0241	0.8093±0.0985
23.	ResNet152V2	99.1342±1.8626	98.2906±3.6775	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	0.9913±0.0186	0.9915±0.0184
24.	ResNet50	90.9091±17.0712	91.4530±25.7424	90.3509±9.9857	90.5291±11.0412	0.9090±0.1795	0.9090±0.1696
25.	ResNet50V2	97.8355±1.8626	98.2906±3.6775	97.3684±6.5372	97.5193±6.0615	0.9788±0.0177	0.9783±0.0191
26.	VGG16	95.6710±4.9280	96.5812±9.7297	94.7368±0.0000	94.9529±0.4889	0.9574±0.0506	0.9566±0.0486

27.	VGG19	91.7749±9.8561	97.4359±6.3696	85.9649±13.6083	87.7706±11.3011	0.9234±0.0902	0.9170±0.0990
28.	Xception	99.5671±1.8626	99.1453±3.6775	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	0.9957±0.0186	0.9957±0.0184
	10 эпох обучения						
	<i>50% обучающих и 50% проверочных данных</i>						
1.	DenseNet121	97.2077±3.0036	97.5694±1.4940	96.8421±6.9183	96.9509±6.4735	0.9724±0.0285	0.9721±0.0302
2.	DenseNet169	98.2548±0.7509	97.5694±1.4940	98.9474±0.0000	98.9436±0.0161	0.9825±0.0077	0.9826±0.0075
3.	DenseNet201	97.7312±1.9867	96.8750±2.5876	98.5965±3.9943	98.6075±3.9497	0.9773±0.0196	0.9774±0.0199
4.	EfficientNetB0	50.0873±0.7509	66.6667±143.4218	33.3333±143.4218	-	0.4460±0.9595	0.5000±0.0000
5.	EfficientNetB1	49.9127±0.7509	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2230±0.9595	0.5000±0.0000
6.	EfficientNetB2	50.0873±0.7509	66.6667±143.4218	33.3333±143.4218	-	0.4460±0.9595	0.5000±0.0000
7.	EfficientNetB3	50.2618±0.0000	100.0000±0.0000	0.0000±0.0000	50.2618±0.0000	0.6690±0.0000	0.5000±0.0000
8.	EfficientNetB4	50.0873±0.7509	66.6667±143.4218	33.3333±143.4218	-	0.4460±0.9595	0.5000±0.0000
9.	EfficientNetB5	50.0873±0.7509	66.6667±143.4218	33.3333±143.4218	-	0.4460±0.9595	0.5000±0.0000
10.	EfficientNetB6	49.9127±0.7509	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2230±0.9595	0.5000±0.0000
11.	EfficientNetB7	49.9127±0.7509	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2230±0.9595	0.5000±0.0000
12.	InceptionResNetV2	96.5096±1.9867	95.8333±2.5876	97.1930±6.0388	97.2365±5.9453	0.9651±0.0188	0.9651±0.0201
13.	InceptionV3	97.3822±3.4411	97.2222±5.3866	97.5439±8.4057	97.6575±7.8575	0.9740±0.0336	0.9738±0.0346
14.	MobileNet	98.4293±2.6012	96.8750±5.1753	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	0.9841±0.0267	0.9844±0.0259
15.	MobileNetV2	98.6038±1.5018	98.2639±2.9880	98.9474±0.0000	98.9509±0.0318	0.9860±0.0153	0.9861±0.0149
16.	MobileNetV3Large	49.7382±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
17.	MobileNetV3Small	49.9127±0.7509	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2230±0.9595	0.5000±0.0000
18.	NASNetLarge	97.3822±1.3006	97.2222±1.4940	97.5439±1.5097	97.5621±1.4785	0.9739±0.0129	0.9738±0.0130
19.	NASNetMobile	97.0332±1.9867	96.8750±4.4819	97.1930±5.4433	97.2597±5.1218	0.9705±0.0194	0.9703±0.0199
20.	ResNet101	83.7696±8.1222	77.7778±47.8073	89.8246±32.6947	90.8597±23.9777	0.8215±0.1462	0.8380±0.0792
21.	ResNet101V2	96.1606±5.8647	96.5278±8.3181	95.7895±15.9057	96.1900±14.1889	0.9623±0.0543	0.9616±0.0591
22.	ResNet152	64.3979±24.3667	80.5556±83.6627	48.0702±108.8348	67.7593±44.1379	0.6768±0.2740	0.6431±0.2462
23.	ResNet152V2	97.3822±0.0000	96.1806±2.9880	98.5965±3.0194	98.5965±3.0194	0.9736±0.0008	0.9739±0.0002
24.	ResNet50	75.0436±31.2233	74.3056±108.3210	75.7895±54.0339	81.3036±33.1748	0.6931±0.6700	0.7505±0.3085
25.	ResNet50V2	97.0332±0.7509	96.8750±6.8463	97.1930±6.5806	97.3024±6.2683	0.9704±0.0082	0.9703±0.0074
26.	VGG16	94.2408±2.6012	92.7083±8.9639	95.7895±10.4595	95.8945±9.8579	0.9418±0.0258	0.9425±0.0262
27.	VGG19	92.3211±3.9734	95.4861±6.5121	89.1228±1.5097	89.8602±1.8654	0.9258±0.0402	0.9230±0.0396

28.	Xception	98.2548±1.5018	98.2639±5.3866	98.2456±3.9943	98.2993±3.8720	0.9826±0.0153	0.9825±0.0149
	30 эпох обучения						
	<i>80% обучающих и 20% проверочных данных</i>						
1.	DenseNet121	99.1342±1.8626	100.0000±0.0000	98.2456±3.7743	98.3333±3.5855	0.9916±0.0182	0.9912±0.0189
2.	DenseNet169	98.7013±3.2262	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9873±0.0311	0.9870±0.0327
3.	DenseNet201	98.7013±3.2262	100.0000±0.0000	97.3684±6.5372	97.5407±6.0595	0.9874±0.0311	0.9868±0.0327
4.	EfficientNetB0	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
5.	EfficientNetB1	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
6.	EfficientNetB2	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
7.	EfficientNetB3	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
8.	EfficientNetB4	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
9.	EfficientNetB5	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
10.	EfficientNetB6	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
11.	EfficientNetB7	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
12.	InceptionResNetV2	96.9697±1.8626	96.5812±3.6775	97.3684±6.5372	97.4786±6.2110	0.9700±0.0172	0.9697±0.0191
13.	InceptionV3	99.1342±3.7252	100.0000±0.0000	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9917±0.0359	0.9912±0.0377
14.	MobileNet	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	1.0000±0.0000	1.0000±0.0000
15.	MobileNetV2	99.5671±1.8626	100.0000±0.0000	99.1228±3.7743	99.1667±3.5855	0.9958±0.0182	0.9956±0.0189
16.	MobileNetV3Large	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
17.	MobileNetV3Small	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
18.	NASNetLarge	98.7013±5.5879	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3333±7.1711	0.9873±0.0545	0.9870±0.0561
19.	NASNetMobile	98.7013±3.2262	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9873±0.0311	0.9870±0.0327
20.	ResNet101	88.3117±12.9046	85.4701±13.2593	91.2281±13.6083	90.9357±14.1546	0.8810±0.1326	0.8835±0.1291
21.	ResNet101V2	98.7013±5.5879	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3333±7.1711	0.9873±0.0545	0.9870±0.0561
22.	ResNet152	89.6104±8.5356	94.0171±13.2593	85.0877±15.0970	86.8079±11.9680	0.9016±0.0808	0.8955±0.0855
23.	ResNet152V2	99.5671±1.8626	99.1453±3.6775	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	0.9957±0.0186	0.9957±0.0184
24.	ResNet50	92.6407±13.0383	92.3077±27.7644	92.9825±7.5485	93.1792±5.9976	0.9248±0.1444	0.9265±0.1286
25.	ResNet50V2	98.2684±1.8626	99.1453±3.6775	97.3684±0.0000	97.4786±0.0919	0.9830±0.0186	0.9826±0.0184
26.	VGG16	99.1342±3.7252	99.1453±3.6775	99.1228±3.7743	99.1453±3.6775	0.9915±0.0368	0.9913±0.0373
27.	VGG19	95.2381±3.7252	99.1453±3.6775	91.2281±3.7743	92.0635±3.4148	0.9547±0.0354	0.9519±0.0373
28.	Xception	99.1342±3.7252	100.0000±0.0000	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9917±0.0359	0.9912±0.0377

	30 эпох обучения						
	<i>80% обучающих и 20% проверочных данных</i>						
1.	DenseNet121	99.1342±1.8626	100.0000±0.0000	98.2456±3.7743	98.3333±3.5855	0.9916±0.0182	0.9912±0.0189
2.	DenseNet169	98.7013±3.2262	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9873±0.0311	0.9870±0.0327
3.	DenseNet201	98.7013±3.2262	100.0000±0.0000	97.3684±6.5372	97.5407±6.0595	0.9874±0.0311	0.9868±0.0327
4.	EfficientNetB0	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
5.	EfficientNetB1	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
6.	EfficientNetB2	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
7.	EfficientNetB3	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
8.	EfficientNetB4	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
9.	EfficientNetB5	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
10.	EfficientNetB6	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
11.	EfficientNetB7	49.7835±1.8626	33.3333±143.4218	66.6667±143.4218	-	0.2241±0.9644	0.5000±0.0000
12.	InceptionResNetV2	96.9697±1.8626	96.5812±3.6775	97.3684±6.5372	97.4786±6.2110	0.9700±0.0172	0.9697±0.0191
13.	InceptionV3	99.1342±3.7252	100.0000±0.0000	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9917±0.0359	0.9912±0.0377
14.	MobileNet	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	1.0000±0.0000	1.0000±0.0000
15.	MobileNetV2	99.5671±1.8626	100.0000±0.0000	99.1228±3.7743	99.1667±3.5855	0.9958±0.0182	0.9956±0.0189
16.	MobileNetV3Large	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
17.	MobileNetV3Small	49.3506±0.0000	0.0000±0.0000	100.0000±0.0000	-	0.0000±0.0000	0.5000±0.0000
18.	NASNetLarge	98.7013±5.5879	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3333±7.1711	0.9873±0.0545	0.9870±0.0561
19.	NASNetMobile	98.7013±3.2262	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9873±0.0311	0.9870±0.0327
20.	ResNet101	88.3117±12.9046	85.4701±13.2593	91.2281±13.6083	90.9357±14.1546	0.8810±0.1326	0.8835±0.1291
21.	ResNet101V2	98.7013±5.5879	99.1453±3.6775	98.2456±7.5485	98.3333±7.1711	0.9873±0.0545	0.9870±0.0561
22.	ResNet152	89.6104±8.5356	94.0171±13.2593	85.0877±15.0970	86.8079±11.9680	0.9016±0.0808	0.8955±0.0855
23.	ResNet152V2	99.5671±1.8626	99.1453±3.6775	100.0000±0.0000	100.0000±0.0000	0.9957±0.0186	0.9957±0.0184
24.	ResNet50	92.6407±13.0383	92.3077±27.7644	92.9825±7.5485	93.1792±5.9976	0.9248±0.1444	0.9265±0.1286
25.	ResNet50V2	98.2684±1.8626	99.1453±3.6775	97.3684±0.0000	97.4786±0.0919	0.9830±0.0186	0.9826±0.0184
26.	VGG16	99.1342±3.7252	99.1453±3.6775	99.1228±3.7743	99.1453±3.6775	0.9915±0.0368	0.9913±0.0373
27.	VGG19	95.2381±3.7252	99.1453±3.6775	91.2281±3.7743	92.0635±3.4148	0.9547±0.0354	0.9519±0.0373
28.	Xception	99.1342±3.7252	100.0000±0.0000	98.2456±7.5485	98.3740±6.9962	0.9917±0.0359	0.9912±0.0377

данных на обучающие и проверочные. Пятнадцать дополнительно обученных моделей достигли достаточно высокой точности, превышающей 92%, чувствительности, специфичности, верности, показателя F_1 и AUC при двух различных пропорциях разбиения данных на обучающие и проверочные наборы, в табл. 2 их названия отмечены жирным шрифтом. В первом случае обучающие данные составляли 80%, а проверочные 20 %, во втором случае – по 50%.

Для этих нейронных сетей на рис. 2 показано изменение точности классификации на проверочном наборе данных в процессе обучения на протяжении 200 эпох. Для восьми из

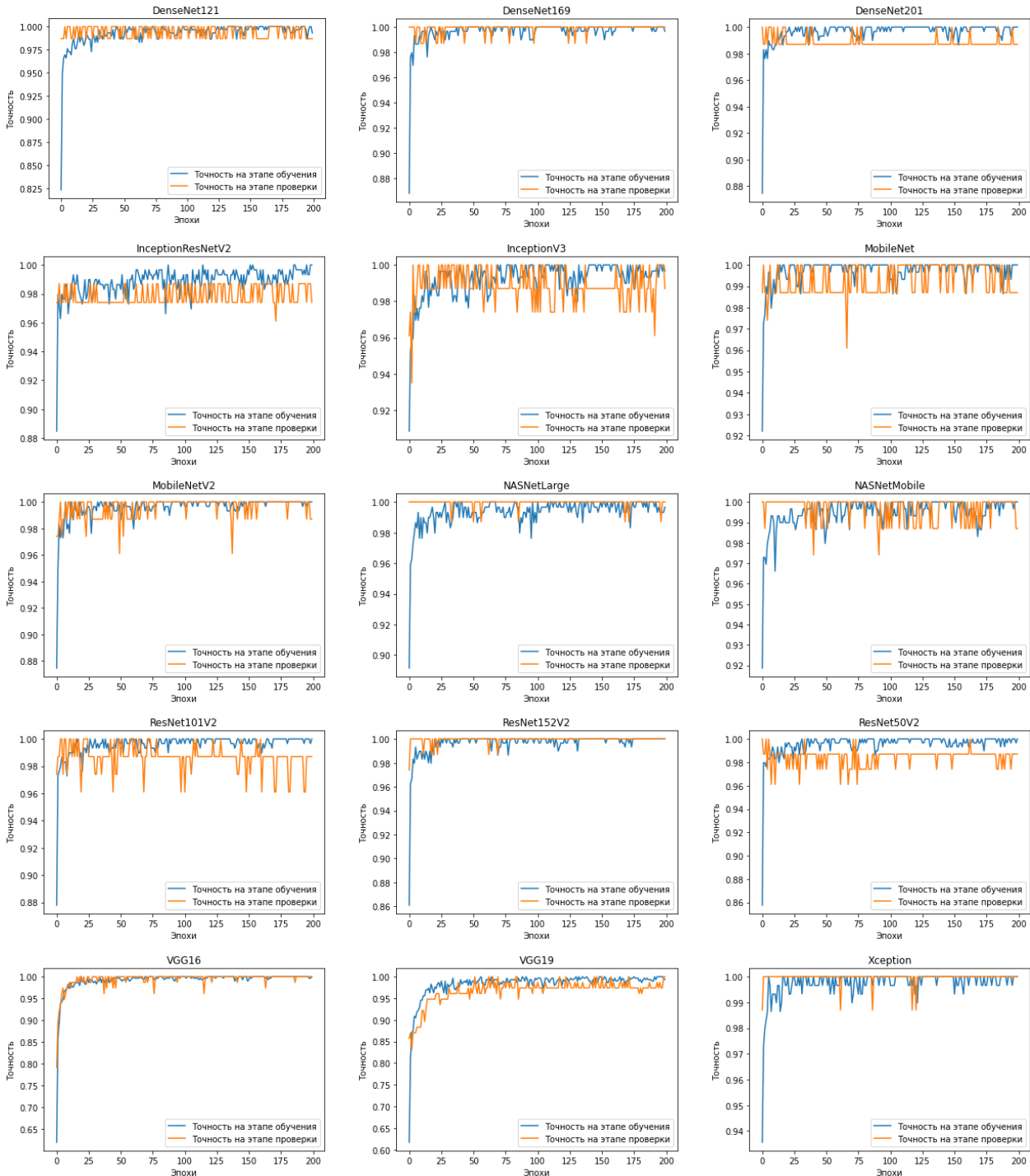
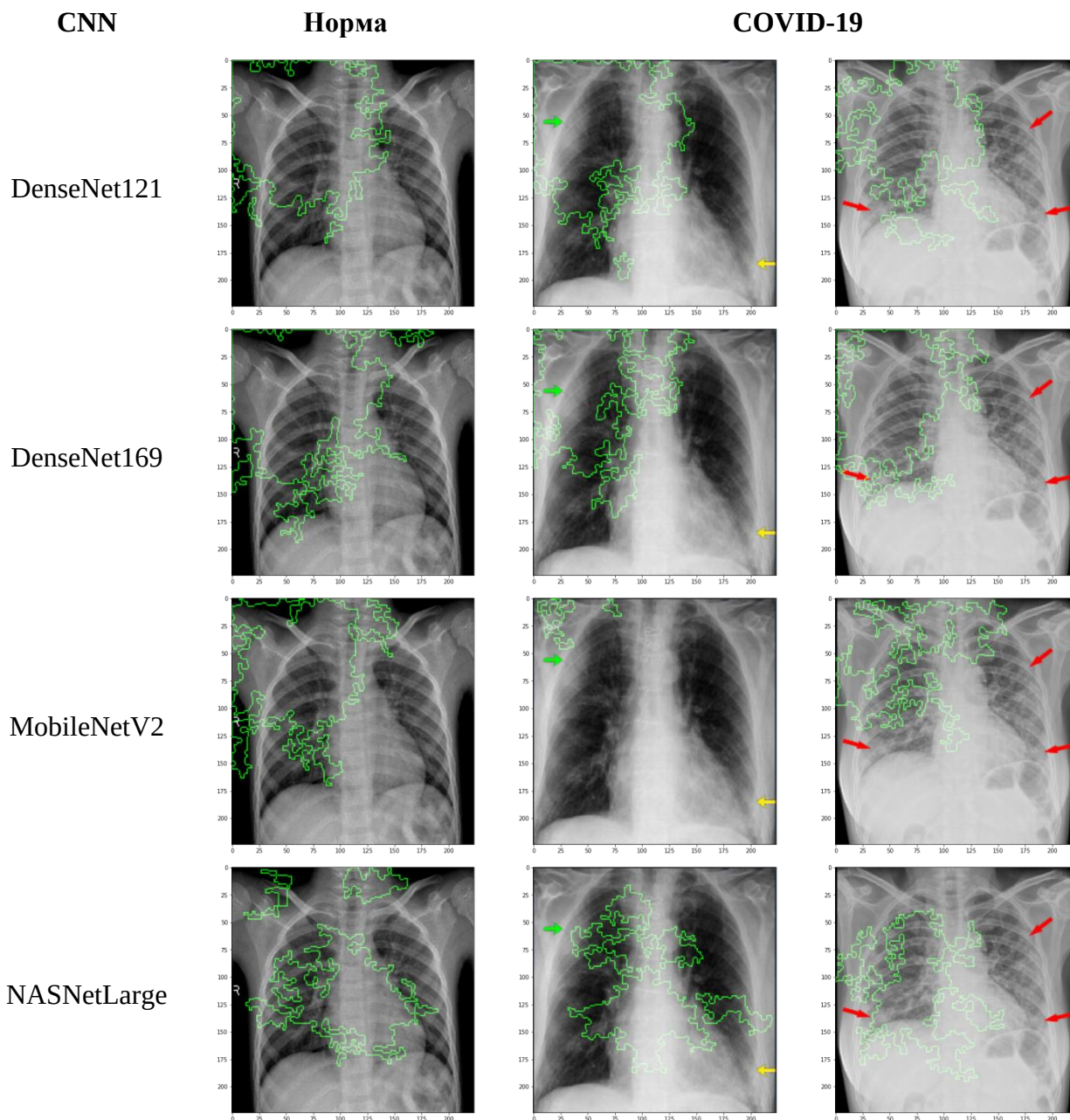
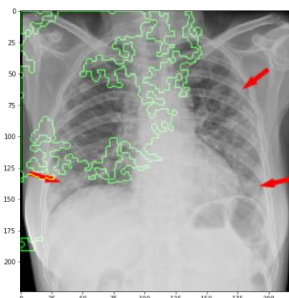
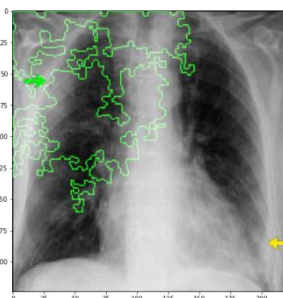
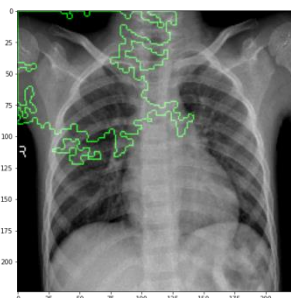


Рисунок 2 – Точность классификации на этапе обучения и проверки нейронных сетей на основе различных предварительно обученных CNN

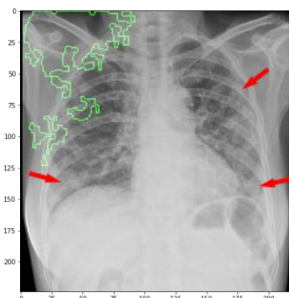
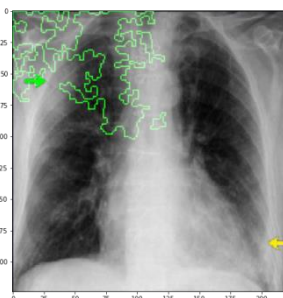
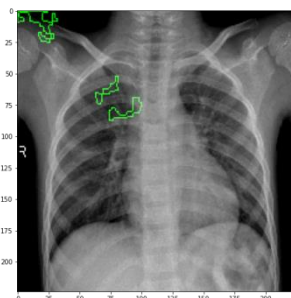
этих моделей, показавших наиболее стабильное обучение, а именно построенных на основе предварительно обученных CNN DenseNet121, DenseNet169, MobileNetV2, NASNetLarge, ResNet152V2, VGG16, VGG19, Xception и дополнительно обученных на протяжении 50 эпох, созданы интерпретации взаимосвязи входных изображений с результатами классификации моделей по методу интегрированных градиентов [29] с количеством шагов, равных 100. Для построения показанных на рис. 3 визуализаций интегрированного градиента использовались пиксели с уровнем значений от 30% до 95% с применением трех изображений из наборов [17, 18], два из которых принадлежат больным COVID-19, а одно – здоровому человеку. Результаты, полученные с помощью дополнительного обучения нейронных сетей на основе предварительно обученных CNN DenseNet169, NASNetLarge, ResNet152V2, наиболее согласуются с мнением экспертов, в смысле соответствия участков изображения, использованных ими для классификации и участков легких, пораженных COVID-19.



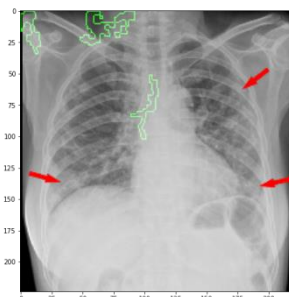
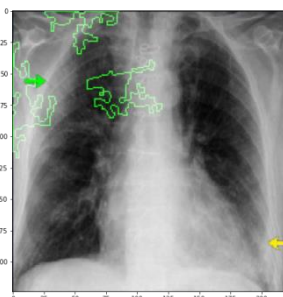
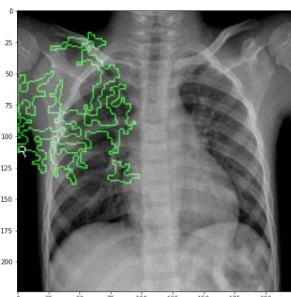
ResNet152V2



VGG16



VGG19



Xception

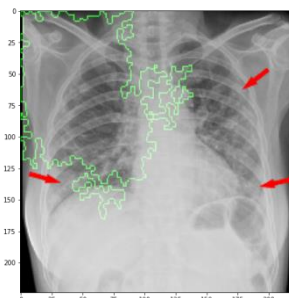
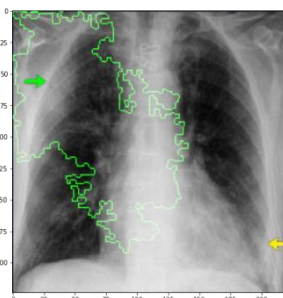
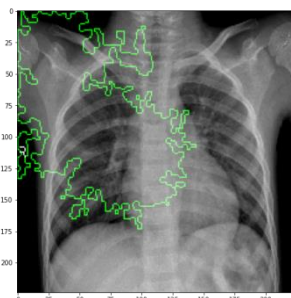


Рисунок 3 – Интерпретация результатов классификации с помощью сетей на основе различных CNN, полученных на основе метода интегрированных градиентов

Обсуждение

Результаты, полученные в результате дополнительного обучения предварительно обученных сетей DenseNet169, NASNetLarge, ResNet152V2, демонстрируют высокую эффективность этих моделей для диагностики COVID-19. Однако из-за постоянных обновлений базы данных рентгеновских снимков и общедоступности других коллекций данных невозможно провести точное сравнение результатов, представленных здесь и в работах [6-12].

Сравнение с некоторыми работами [8, 12] при использовании идентичного набора данных, приведенное в таблице 3, убедительно свидетельствует о том, что *обученные до достижения максимальной точности* нейронные сети на основе предварительно обученных CNN DenseNet169 и ResNet152V2 достигли такого же, или даже лучшего результата, чем несколько других моделей с точки зрения точности классификации и разных соотношений объема данных для обучения и проверки.

Таблица 3. Сравнение результатов дополнительного обучения нейронных сетей на основе выбранных предварительно обученных CNN с другими моделями

Модели	Обучающие данные (%)	Тестовые данные (%)	Точность (%)
CovidGAN [8]	80	20	95
AlexNet [12]	80	20	99
GoogLeNet [12]	80	20	100
SqueezeNet [12]	80	20	100
DenseNet169	80	20	100
NASNetLarge	80	20	99
ResNet152V2	80	20	100
AlexNet [12]	50	50	99
GoogLeNet [12]	50	50	99
SqueezeNet [12]	50	50	98
DenseNet169	50	50	100
NASNetLarge	50	50	99
ResNet152V2	50	50	100

Заключение

Таким образом, в работе были проанализированы результаты дополнительного обучения нейронных сетей на основе 28 популярных предварительно обученных CNN, доступных с помощью фреймворка Keras, для классификации рентгеновских снимков грудной клетки пациентов, больных COVID19 и здоровых людей, с использованием общедоступных наборов данных. Результаты классификации, полученные с помощью различных наборов данных для обучения и проверки, позволили продемонстрировать высокую эффективность 2 из 28 исследованных предварительно обученных CNN. Эти результаты свидетельствуют, что правильный выбор предварительно обученной CNN важен, поскольку он помогает избежать усилий по разработке более сложных моделей, в то время как уже существующие предварительно обученные CNN позволяют добиться такого же или даже лучшего результата.

Из-за ограниченного объема доступных данных в этом исследовании не рассматривалась более подробная классификация на вирусную, бактериальную пневмонию и туберкулез. Другая проблема заключается в том, что для каждого пациента имеется только одномоментный набор рентгеновских снимков грудной клетки. Это ограничение приводит к тому, что оказывается невозможным определить, появились ли у пациентов рентгенологические особенности по мере прогрессирования болезни [30]. Тем не менее результаты, представленные в этом исследовании, указывают на эффективность предварительно обученных CNN DenseNet169 и ResNet152V2 для решения подобного рода задач, что может помочь при создании более сложных и совершенных СИИ.

Литература

1. Cohen J., Kupferschmidt K. Strategies shift as coronavirus pandemic looms. Science. –2020. – 367с.
2. Лучевая диагностика коронавирусной болезни (COVID-19): организация, методология, интерпретация результатов: методические рекомендации / Сост. С. П. Морозов, Д. Н.

- Проценко, С.В. Сметанина [и др.] // Серия «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики». - Вып. 65. - М.: ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», 2020.
3. Burns J, Movsisyan A, Stratil JM, et al. Travel-related control measures to contain the COVID-19 pandemic: a rapid review. Cochrane Database of Systematic Reviews 2020, Issue 9. Art. No.: CD013717. DOI: 10.1002/14651858.CD013717.
 4. Wong HYF, Lam HYS, Fong AH-T, Leung ST, Chin TWY, et al. Frequency and distribution of chest radiographic findings in COVID-19 positive patients. Radiology. – 2020.
 5. Zech JR, Badgeley MA, Liu M, Costa AB, Titano JJ, Oermann EK. Variable generalization performance of a deep learning model to detect pneumonia in chest radiographs: a cross-sectional study. PLoS Med. 2018;15:e1002683.
 6. Ucar F, Korkmaz D. COVIDiagnosis-net: deep bayes-SqueezeNet based diagnosis of the coronavirus disease 2019 (COVID-19) from X-ray images. Med Hypotheses. 2020;140:109761.
 7. Khan AI, Shah JL, Bhat MM. CoroNet: a deep neural network for detection and diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images. Comput Methods Programs Biomed. 2020;196:105581.
 8. Waheed A, Goyal M, Gupta D, Khanna A, Al-Turjman F, Pinheiro PR. CovidGAN: data augmentation using auxiliary classifier GAN for improved Covid-19 detection. IEEE Access. 2020;8:91916–23.
 9. Ozturk T, Talo M, Yildirim EA, Baloglu UB, Yildirim O, Acharya UR. Automated detection of COVID-19 cases using deep neural networks with X-ray images. Comput Biol Med. 2020;121:103792.
 10. Redmon J, Farhadi A. Yolo9000: better, faster, stronger. arXiv 2016; 1612.08242
 11. Apostolopoulos ID, Mpesiana TA. Covid. 19: automatic detection from X-ray images utilizing transfer learning with convolutional neural networks. Phys Eng Sci Med. 2020;43:635–40.
 12. Pham, T.D. Classification of COVID-19 chest X-rays with deep learning: new models or fine tuning?. Health Inf Sci Syst 9, 2 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13755-020-00135-3>
 13. <https://arxiv.org/abs/1608.06993> (дата обращения: 23.03.2021)
 14. <https://arxiv.org/abs/1905.11946> (дата обращения: 23.03.2021)
 15. <https://arxiv.org/abs/1602.07261> (дата обращения: 23.03.2021)
 16. <https://arxiv.org/abs/1512.00567> (дата обращения: 23.03.2021)
 17. <https://arxiv.org/abs/1704.04861> (дата обращения: 23.03.2021)
 18. <https://arxiv.org/abs/1801.04381> (дата обращения: 23.03.2021)
 19. <https://arxiv.org/abs/1905.02244> (дата обращения: 23.03.2021)
 20. <https://arxiv.org/abs/1707.07012> (дата обращения: 23.03.2021)
 21. <https://arxiv.org/abs/1512.03385> (дата обращения: 23.03.2021)
 22. <https://arxiv.org/abs/1603.05027> (дата обращения: 23.03.2021)
 23. <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (дата обращения: 23.03.2021)
 24. <https://arxiv.org/abs/1610.02357> (дата обращения: 23.03.2021)
 25. <https://keras.io> (дата обращения: 30.03.2021)
 26. <https://arxiv.org/abs/1904.09237> (дата обращения: 30.03.2021)
 27. Daniel S. Kermany et al, Identifying Medical Diagnoses and Treatable Diseases by Image-Based Deep Learning, Cell, Volume 172, Issue 5, 2018, Pages 1122-1131.e9, ISSN 0092-8674, <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.010>.
 28. COVID-19 Image Data Collection: Prospective Predictions Are the Future Joseph Paul Cohen and Paul Morrison and Lan Dao and Karsten Roth and Tim Q Duong and Marzyeh Ghassemi arXiv:2006.11988, <https://github.com/ieee8023/covid-chestxray-dataset>, 2020
 29. <https://arxiv.org/abs/1703.01365> (дата обращения 29.03.2021)
 30. Weinstock MB, et al. Chest X-ray findings in 636 ambulatory patients with COVID-19 presenting to an urgent care center: a normal chest X-ray is no guarantee. J Urgent Care Med. 2020;14:13–8.25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 517.949.6

Ж.Н. Кутунаев, Н.К. Кадыркулова, Г.К. Ергешова

Ошский технологический университет им.акад. М.М.Адышева,

Ош, Кыргызстан

E-mail: zh.kutunaev@mail.ru, kadyrkulova74@mail.ru

gulshaan.ergeshova@gmail.com

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛЕБАНИЯ СТРУНЫ

Технические, инженерные и модельные задачи могут быть решены с помощью дифференциальных уравнений гиперболического типа. Нам известно, что колебательный процесс стержня, струны и т.д. зависит от начальных и граничных условий для полуограниченной струны, и в данной статье разрабатывается математически сложная модель данной струны.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения гиперболического типа, модельные задачи, стержень, процесс колебаний струны, начальные и граничные условия, волны, постоянные коэффициенты.

Введение. Математическое моделирование колебательных процессов является очень актуальным в современной технике, механике, физике и т.д., так как большое количество реальных, а также технологических процессов носит колебательный характер. В частности, идеализацией процесса колебаний балок или длинных стержней является процесс колебаний длинной струны, на которую влияют различные условия на ее концах. В данной работе рассматриваются поперечные колебания длинной струны, которые описываются линейным уравнением в частных производных гиперболического типа с переменными коэффициентами. Предложен способ построения явного вида решения, определенный задачей [1].

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о распространении волн на полуограниченной прямой $x \geq 0$. Как известно, процесс колебаний полуограниченной струны зависит от граничного условия, от ее начальной формы $u(x, 0)$ и распределения скорости $u_t(x, 0)$ в начальный момент времени.

Если граничный режим действует достаточно долго, то благодаря трению, присущему всякой реальной физической системе, влияние начальных данных $u(x, 0)$ и $u_t(x, 0)$ с течением времени ослабевает, т.е. на практике в некоторых случаях заботиться о соблюдении начальных данных нет необходимости. В результате получаются важные классы задач о распространении граничного режима.

Если в начальный момент времени полуограниченная прямая занимает произвольное положение, а начальный импульс равен нулю, то ясно, что колебание осуществляется только за счет граничного режима.

Рассмотрим следующую задачу: найти решение уравнения колебаний [2]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{Cx+D}{AD-BC} \right)^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, 0 < x < \infty, t > 0, \quad (1)$$

удовлетворяющее граничному условию

$$a_1 u_{tt}(0, t) + a_2 u_t(0, t) + a_3 u_x(0, t) + a_4 u(0, t) = M \sin \omega t + N \cos \omega t \quad (2)$$

и начальному условию

$$u_t(x, 0) = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad t > 0, \quad (3)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – постоянные коэффициенты.

В [3] показано, что уравнения (1) допускают общее решение вида

$$u(x, t) = (Cx + D) \left(f \left(\frac{Ax+B}{Cx+D} + t \right) + g \left(\frac{Ax+B}{Cx+D} - t \right) \right), \quad (4)$$

где A, B, C, D – произвольные постоянные, f и g – произвольные, дважды непрерывно дифференцируемые функции. Эта функция удовлетворяет начальному условию (3), если ее выберем в виде

$$u(x, t) = (Cx + D) \left(f \left(\frac{Ax+B}{Cx+D} + t \right) + f \left(\frac{Ax+B}{Cx+D} - t \right) \right). \quad (5)$$

Дифференцируя (5) по t и по x и подставляя полученные результаты в (2), получаем:

$$\begin{aligned} & a_1 D \left(f'' \left(\frac{B}{D} + t \right) + f'' \left(\frac{B}{D} - t \right) \right) + a_2 D \left(f' \left(\frac{B}{D} + t \right) + f' \left(\frac{B}{D} - t \right) \right) + \\ & + a_3 \left\{ C \left[f \left(\frac{B}{D} + t \right) + f \left(\frac{B}{D} - t \right) \right] + \frac{AD - BC}{D} \left[f' \left(\frac{B}{D} + t \right) + f' \left(\frac{B}{D} - t \right) \right] \right\} + \\ & + a_4 \left[f \left(\frac{B}{D} + t \right) + f \left(\frac{B}{D} - t \right) \right] = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} & a_1 D f'' \left(\frac{B}{D} + t \right) + \left(a_2 D + \frac{a_3(AD - BC)}{D} \right) f' \left(\frac{B}{D} + t \right) + (a_3 C + a_4 D) f \left(\frac{B}{D} + t \right) + \\ & + a_1 D f'' \left(\frac{B}{D} - t \right) + \left(\frac{a_3(AD - BC)}{D} - a_2 D \right) f' \left(\frac{B}{D} - t \right) + \\ & + (a_3 C + a_4 D) f \left(\frac{B}{D} - t \right) = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \end{aligned}$$

Для краткости введем следующие обозначения:

$$p_1 = a_2 D + \frac{a_3(AD - BC)}{D}, \quad q_1 = \frac{a_3(AD - BC)}{D} - a_2 D, \quad p_2 = q_2 = (a_3 C + a_4 D)$$

Тогда имеем следующее функционально-дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} & a_1 D f'' \left(\frac{B}{D} + t \right) + p_1 f' \left(\frac{B}{D} + t \right) + p_2 f \left(\frac{B}{D} + t \right) + a_1 D f'' \left(\frac{B}{D} - t \right) + \\ & + q_1 f' \left(\frac{B}{D} - t \right) + q_2 f \left(\frac{B}{D} - t \right) = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \end{aligned} \quad (6)$$

Как известно, общее решение вида (6) можно представить в виде [3]

$$f(t) = \bar{f}(t) + F(t),$$

где $\bar{f}(t)$ – общее решение однородного уравнения, $F(t)$ – какое-нибудь частное решение неоднородного уравнения (6).

Сначала решим однородное уравнение:

$$\begin{aligned} & a_1 D f'' \left(\frac{B}{D} + t \right) + p_1 f' \left(\frac{B}{D} + t \right) + p_2 f \left(\frac{B}{D} + t \right) + \\ & + a_1 D f'' \left(\frac{B}{D} - t \right) + q_1 f' \left(\frac{B}{D} - t \right) + q_2 f \left(\frac{B}{D} - t \right) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение уравнения (7) будем искать в виде [4]

$$f(t) = e^{mt} + k e^{nt}, \quad (8)$$

где m, n, k — постоянные числа, подлежащие определению.

Подставляя (8) в (7) и положив $m + n = 0$, получаем

$$a_1 D \left(m^2 e^{m(\frac{B}{D}+t)} + kn^2 e^{n(\frac{B}{D}+t)} \right) + p_1 \left(me^{m(\frac{B}{D}+t)} + kne^{n(\frac{B}{D}+t)} \right) + p_2 \left(e^{m(\frac{B}{D}+t)} + ke^{n(\frac{B}{D}+t)} \right) + \\ + \frac{1}{e^{(m+n)t}} \left[a_1 D \left(m^2 e^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + kn^2 e^{\frac{nB}{D}} e^{mt} \right) + q_1 \left(me^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + kne^{\frac{nB}{D}} e^{mt} \right) + \right. \\ \left. + q_2 \left(e^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + ke^{\frac{nB}{D}} e^{mt} \right) \right] = 0,$$

или

$$a_1 D m^2 e^{\frac{mB}{D}} e^{mt} + a_1 D kn^2 e^{\frac{nB}{D}} e^{nt} + p_1 me^{\frac{mB}{D}} e^{mt} + p_1 kne^{\frac{nB}{D}} e^{nt} + p_2 e^{\frac{mB}{D}} e^{mt} + p_2 ke^{\frac{nB}{D}} e^{nt} + \\ + a_1 D m^2 e^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + a_1 D kn^2 e^{\frac{nB}{D}} e^{mt} + q_1 me^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + \\ + q_1 kne^{\frac{nB}{D}} e^{mt} + q_2 e^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + q_2 ke^{\frac{nB}{D}} e^{mt} = 0.$$

Откуда, приравнявая коэффициенты e^{mt} и e^{nt} к нулю, получаем следующую систему уравнений относительно m, n и k :

$$\begin{cases} m + n = 0, \\ e^{\frac{mB}{D}} (a_1 D m^2 + p_1 m + p_2) = -ke^{\frac{nB}{D}} (a_1 D n^2 + q_1 n + q_2), \\ e^{\frac{nB}{D}} (a_1 D n^2 + p_1 n + p_2) = -ke^{\frac{mB}{D}} (a_1 D m^2 + q_1 m + q_2). \end{cases}$$

Решая эту систему, убеждаемся, что $m = 0, n = 0, k = -1$ и следовательно [4],

$$\bar{f}(t) = e^{mt} + ke^{nt} = 0.$$

Частное решение уравнения (6) будем искать в виде:

$$F(t) = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t.$$

Имеем

$$\left. \begin{aligned} F\left(\frac{B}{D} + t\right) &= \alpha \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) + \beta \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right), \\ F'\left(\frac{B}{D} + t\right) &= \alpha \omega \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) - \beta \omega \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right), \\ F''\left(\frac{B}{D} + t\right) &= -\alpha \omega^2 \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) - \beta \omega^2 \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right), \\ F\left(\frac{B}{D} - t\right) &= -\alpha \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) + \beta \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right), \\ F'\left(\frac{B}{D} - t\right) &= \alpha \omega \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) + \beta \omega \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right), \\ F''\left(\frac{B}{D} - t\right) &= -\alpha \omega^2 \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) - \beta \omega^2 \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (6), получаем

$$a_1 \left[-\alpha \omega^2 \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) - \beta \omega^2 \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) \right] + p_1 \left[\alpha \omega \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) - \beta \omega \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) \right] + \\ + p_2 \left[\alpha \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) + \beta \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) \right] + a_1 D \left[\alpha \omega^2 \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) - \beta \omega^2 \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) \right] + \\ + q_1 \left[\alpha \omega \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) + \beta \omega \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) \right] + q_2 \left[-\alpha \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) + \beta \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) \right] = \\ = M \sin \omega t + N \cos \omega t.$$

После некоторых вычислений, сравнивая коэффициенты при $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$, получаем эти два уравнения для определения α и β :

$$\left. \begin{aligned} &\alpha \left(-2a_1 D \omega^2 \cos \frac{\omega B}{D} - p_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + p_2 \cos \frac{\omega B}{D} - q_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + q_2 \cos \frac{\omega B}{D} \right) - \\ &\quad - \beta \left(p_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} + p_2 \sin \frac{\omega B}{D} + q_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} - q_2 \sin \frac{\omega B}{D} \right) = M, \\ &\beta \left(-2a_1 D \omega^2 \cos \frac{\omega B}{D} - p_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + p_2 \cos \frac{\omega B}{D} - q_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + q_2 \cos \frac{\omega B}{D} \right) + \\ &\quad + \alpha \left(p_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} + p_2 \sin \frac{\omega B}{D} + q_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} - q_2 \sin \frac{\omega B}{D} \right) = N. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для краткости введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -2a_1 D \omega^2 \cos \frac{\omega B}{D} - p_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + p_2 \cos \frac{\omega B}{D} - q_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + q_2 \cos \frac{\omega B}{D}, \\ \sigma_2 &= p_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} + p_2 \sin \frac{\omega B}{D} + q_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} - q_2 \sin \frac{\omega B}{D}. \end{aligned}$$

Тогда система (10) примет вид

$$\begin{cases} \sigma_1 \alpha + \sigma_2 \beta = M, \\ \sigma_1 \beta + \sigma_2 \alpha = N, \end{cases}$$

откуда

$$\alpha = \frac{M\sigma_1 + N\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad \beta = \frac{N\sigma_1 - M\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}.$$

Таким образом получим общее решение неоднородного уравнения (6) в виде

$$F(t) = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t = \frac{M\sigma_1 + N\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \sin \omega t + \frac{N\sigma_1 - M\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cos \omega t. \quad (11)$$

Вывод. Используя (11), построим теперь искомое решение задачи (1) - (3):

$$\begin{aligned} u(x, t) &= (Cx + D) \left\{ \frac{M\sigma_1 + N\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \sin \left[\omega \left(\frac{Ax + B}{Cx + D} + t \right) \right] + \right. \\ &+ \frac{N\sigma_1 - M\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cos \left[\omega \left(\frac{Ax + B}{Cx + D} + t \right) \right] + \frac{M\sigma_1 + N\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \sin \left[\omega \left(\frac{Ax + B}{Cx + D} - t \right) \right] + \\ &\left. + \frac{N\sigma_1 - M\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cos \left[\omega \left(\frac{Ax + B}{Cx + D} - t \right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Пример. Найти решение (1) – (3) при $a_1 = a_4 = 0$, $A = C = D = 1$, $B = 0$.

Решение. В данном случае уравнение (6) имеет вид

$$p_1 f'(t) + p_2 f(t) + q_1 f'(-t) + q_2 f(-t) = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) будем искать в виде $F(t) = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t$. Тогда будем иметь:

$$\begin{aligned} &p_1 (\alpha \omega \cos \omega t - \beta \omega \sin \omega t) + p_2 (\alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t) + q_1 (\alpha \omega \cos \omega t + \beta \omega \sin \omega t) + \\ &\quad + q_2 (-\alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t) = M \sin \omega t + N \cos \omega t \\ &\begin{cases} -p_1 \beta \omega + p_2 \alpha + q_1 \beta \omega - q_2 \alpha = M, \\ p_1 \alpha \omega + p_2 \beta + q_1 \alpha \omega + q_2 \beta = N, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha(p_2 - q_2) + \beta \omega(q_1 - p_1) = M, \\ \alpha \omega(p_1 + q_1) + \beta(p_2 + q_2) = N, \end{cases} \\ &\Rightarrow \begin{cases} \alpha(p_2 - q_2) - \beta \omega(p_1 - q_1) = M, \\ \alpha \omega(p_1 + q_1) + \beta(p_2 + q_2) = N, \end{cases} \\ &\alpha = \frac{M(p_2 + q_2) + N(p_1 - q_1)\omega}{(p_2^2 - q_2^2) + (p_1^2 - q_1^2)\omega^2}, \quad \beta = \frac{N(p_2 - q_2) - M(p_1 + q_1)\omega}{(p_2^2 - q_2^2) + (p_1^2 - q_1^2)\omega^2}. \end{aligned}$$

В нашем случае $p_1 = a_2 + a_3$, $p_2 = a_3$, $q_1 = a_3 - a_2$, $q_2 = a_3$ и, следовательно,

$$\alpha = \frac{2a_3 M + 2a_2 N \omega}{((a_2 + a_3)^2 - (a_3 + a_2)^2)\omega^2} = \frac{a_3 M + a_2 N \omega}{2a_2 a_3 \omega^2}, \quad \beta = -\frac{M}{2a_2 \omega}.$$

Мы нашли $F(t)$ для примера

$$F(t) = \frac{a_3 M + a_2 N \omega}{2a_2 a_3 \omega^2} \sin \omega t - \frac{M}{2a_2 \omega} \cos \omega t.$$

Используя найденное $F(t)$, построим искомое решение:

$$u(x, t) = (x + 1) \left\{ \frac{a_3 M + a_2 N \omega}{2 a_2 a_3 \omega^2} \sin \left[\omega \left(\frac{x}{x+1} + t \right) \right] - \frac{M}{2 a_2 \omega} \cos \left[\omega \left(\frac{x}{x+1} + t \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{a_3 M + a_2 N \omega}{2 a_2 a_3 \omega^2} \sin \left[\omega \left(\frac{x}{x+1} - t \right) \right] - \frac{M}{2 a_2 \omega} \cos \left[\omega \left(\frac{x}{x+1} - t \right) \right] \right\}.$$

Литература

1. Кутунаев Ж.Н. Обобщенные решения волновых уравнений одного класса. // Проблемы автоматизации и управления. - 2019. - С. 141 - 146.
2. Турумбеков А. Функционально-дифференциальные уравнения с конечной группой преобразований аргумента в смешанных задачах. - Ош: Ошский технологический университет, 2002. - 73с.
3. Кутунаев Ж.Н. Решение модельных задач с помощью уравнения гиперболического типа с переменными коэффициентами // Проблемы автоматизации и управления. - 2017. - С. 11 -14.
4. Турумбеков А. Функционально-дифференциальные уравнения с конечной группой преобразований аргумента в смешанных задачах. - Ош: Ошский технологический университет, 2002. - 73с.

*Джураев Х.Ш., Джураева Г.Х.**НИИ Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан**E-mail: hayrullo_58@mail.ru*

О ПРИБЛИЖЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ СИНГУЛЯРНО-ВОЗМУЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Дан метод приближенного аналитического решения краевых задач сингулярно-возмущенных уравнений стационарной теплопроводности, которое близко к решению задачи для невозмущенного уравнения. Исследованы основные задачи, которыми и определяется структура статьи: разработка математических и компьютерных моделей стационарной теплопроводности в конденсированных средах и модельного диффузионно-реактивного переноса энергии в зависимости теплопроводности. Представлены интерпретации полученных результатов, численных экспериментов зависимости теплового потока от значения температуры. При проведении численных экспериментов использовали существующие литературные паспортные данные одной из типичных задач. На основе полученных результатов можно заключить, что с ростом температуры поток тепла остается неизменным, а теплопроводность иллюстрируется наличием двух пограничных слоев и качественным совпадением с литературными данными.

Ключевые слова; модель, малый параметр, сингулярно-возмущенный, методы малого параметра, пограничные и переходные слои, поток тепла, теплопроводность.

1. Введение и постановка задачи

Рассмотрим уравнение с частными производными

$$\frac{\varepsilon^2}{x^\mu} \cdot \frac{d}{dx} \left(x^\mu \frac{du}{dx} \right) - q(x)u = f(x), \quad (1)$$

которое соответствует сингулярно-возмущенным дифференциальным уравнениям второго порядка и учитывает стационарную теплопроводность в конденсированных средах и модельный процесс диффузионно-реактивного переноса. Здесь μ и ε параметры, удовлетворяющие условиям: $\mu \geq 0$, $0 < \varepsilon \leq 1$. Если $\mu = 0$, то уравнение (1) является математическим моделированием процесса диффузионно-разностного переноса в декартовой системе координат, если $\mu = 1$, $\varepsilon = \frac{1}{r}$, то уравнение (1) рассматривается в цилиндре с радиусом r , а при $\mu = 2$, $\varepsilon = \frac{1}{r}$ уравнение (1) будет сферическим. Считая, что функции $q(x)$ и $f(x)$ заданы и, по крайней мере, непрерывны на отрезке $[0, 1]$, причем $q(x) \geq 0$ будем искать решение уравнения (1) при предельных условиях:

$$\left(\gamma_1 \frac{du}{dx} + \gamma_2 u \right) \Big|_r = \begin{cases} |u(0)| < +\infty & \text{при } x = 0, \\ \psi & \text{при } x = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь γ_1, γ_2 – числа, а ψ – заданное число. Если $\gamma_1 = 0$, то имеем первую краевую задачу, если $\gamma_2 = 0$ – вторую, а при $\gamma_1 \neq 0$ и $\gamma_2 \neq 0$ третью.

Для уточнения решения, полученного из модели, а также для выяснения погрешности этого решения применяются различные варианты метода возмущения, и им посвящена обширная литература [1-3]. Удачный выбор модели для невозмущенного и возмущенного решения позволяет во многих обстоятельствах, даже при действии начального приближения, получить решение с допустимой точностью при относительно незначительной себестоимости исследования.

Пусть нас интересуют колебания, описываемые уравнением (1), при заданных краевых условиях (2). Может показаться, что надо просто выбросить первый член в уравнении (1), то есть перейти к уравнению

$$q(x)v(x) + f(x) = 0 \quad (3)$$

Но ведь произвольно заданные условия (2) могут не удовлетворять уравнению (3) при $x = 0$ или $x = l$. Если невозмущенное уравнение (3) при $x = 0$ или $x = l$ противоречит условиям (2), то это означает, что сила инерции в этот момент отлична от нуля, то есть в так называемом релаксационном этапе движения пренебрегать первым членом в уравнении (1) нельзя.

Задачи, при решении которых применяется прием малого аргумента, бывают двух типов. В задачах начального типа малый аргумент включается в саму их постановку, и цель исследования состоит в выяснении влияния этого параметра на решение; метод приводит к асимптотическим формулам, из которых видно это влияние [4-8].

Задачи второго типа, в которых применяется метод малого параметра, в своей постановке такого параметра не содержат, и его приходится ввести, чтобы можно было применить данный метод. Для этого надо сначала «организовать» нулевое приближение, то есть постараться так видоизменить задачу, по возможности мало, чтобы ее решение можно было найти легко или сравнительно легко. После этого в видоизмененную задачу так ввести параметр, например ε , чтобы при $\varepsilon = 0$ получилась видоизмененная задача, а при некотором значении $\varepsilon = \varepsilon_0$ – исходная. Затем надо решение задачи, включающее ε , разложить по степеням этого параметра, после чего в полученном решении положить $\varepsilon = \varepsilon_0$. Если эту программу удастся осуществить, то при благоприятном стечении обстоятельств мы получаем в итоге решение исходной задачи [9-13].

Для дифференциального уравнения, включающего некоторый параметр при старшей производной, вырождением обычно называют понижение порядка этого уравнения. Пример такого вырождения, это уравнение (3), полученное из уравнения (1) при $\varepsilon = 0$. Видно, что для сингулярно-возмущенного уравнения возникает кратковременный этап релаксации, на протяжении которого значение $u(x, \varepsilon)$ существенно изменяется. Продолжительность этого этапа пропорционально ε , а изменение $u(x, \varepsilon)$ на нем идет по некоторому закону, «крутизна» которого обратно пропорциональна значению ε . При построении такой зависимости (во всяком случае, ее главной части) в мало меняющейся на релаксационном этапе правой части уравнения решение $u(x, \varepsilon)$ можно «заморозить», заменив их соответствующими значениями при $x = 0$.

Если в уравнение входит малый параметр ε и при $\varepsilon = 0$, он вырождается, понижая порядок на единицу, но при $\varepsilon \rightarrow 0$ решение сингулярно-возмущенной задачи остается конечным в некотором интервале (c, d) , то вблизи точек a и b могут возникнуть зоны, ширина которых имеет порядок ε и на которых решение или его производные изменяются по

описанному выше «крутому» закону: вне этих зон решение возмущенной задачи близко к решению вырожденного уравнения. Поэтому представляет интерес нахождение приближенно аналитического решения граничных задач сингулярно-возмущенного дифференциального уравнения как в зонах пограничного слоя, так и вне этих зон, а также методы выяснения того, что действительно ли решение возмущенной задачи остаётся конечным, когда $\varepsilon \rightarrow 0$, если это не ясно из физических соображений.

Теперь рассмотрим обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка (1) с предельными условиями:

$$u(0, \varepsilon) = |u(0)|, \quad u(l, \varepsilon) = \psi \quad (4)$$

Если положить $\varepsilon = 0$, то есть отбросить возмущение, то получим уравнение (3) с условиями:

$$v(0) = \frac{f(0)}{q(0)}, \quad (q(0) \neq 0); \quad v(l) = \frac{f(l)}{q(l)}, \quad (q(l) \neq 0) \quad (5)$$

Видно, что порядок невозмущенного уравнения на единицу меньше, чем порядок возмущенного дифференциального уравнения. Это означает, что любое дифференциальное уравнение лишь приближенно описывает процесс развития. Поэтому учет каких-то факторов, влияние которых на исследуемый процесс подразумевается «малым», сводится к анализу зависимости решений сингулярно-возмущенных дифференциальных уравнений от малых параметров. В модельной постановке прикладных задач всегда возникает проблема действия решения $u(x, \varepsilon)$ задачи (1)-(2) при значениях коэффициентов, характеризующих «малыми» параметрами. Изучение решения задачи с малым параметром в силу ее прикладной важности (приложение теории этих уравнений в гидро- и аэродинамике, нелинейной механике, химической и биологической кинетике, экологии, теории оболочек и многих других областях) стало одним из важных направлений в области дифференциальных уравнений и математической физики (см. [1, 2, 6, 14]).

В [15] анализировался вопрос нахождения доверенных аналитических решений начальных задач сингулярно-возмущенных дифференциальных уравнений, которые близки к решению задачи Коши для невозмущенного уравнения. Поэтому, согласно этому анализу, представляет интерес нахождение приближенного аналитического решения задачи (1) - (2), которое близко к решению задачи (3) - (2).

2. Метод построения приближенно-аналитического решения

Будем исходить из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x^\mu \frac{du}{dx} = \omega - \vartheta_1 u, \\ \frac{\varepsilon^2}{x^\mu} \frac{d\omega}{dx} = f(x) - \vartheta_2 \omega, \end{cases} \quad (6)$$

где $u = u(x, \varepsilon)$, $\omega = \omega(x, \varepsilon)$, $\vartheta_1 = \frac{x^\mu}{\varepsilon} \sqrt{q(x)}$ и $\vartheta_2 = -\frac{\varepsilon}{x^\mu} \sqrt{q(x)}$ – число компонентов, характеризующих коэффициенты уравнения (1).

Рассмотрим состояние равновесия и устойчивость системы. Приравняв левые части уравнений (6) к нулю, получим:

$$\begin{cases} \omega - \vartheta_1 u = 0, \\ f(x) - \vartheta_2 \omega = 0, \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7) позволяет определить особую точку в фазовой плоскости (u, ω) . В зависимости от значения функции $f(x)$ можно иметь бесконечное число

равновесных состояний, то есть уравнения (7) могут иметь бесконечное множество решений, которые могут быть устойчивыми или неустойчивыми.

Однако часто бывает невозможным найти аналитическое решение системы уравнений (6). В этих случаях применяются известные методы из теории дифференциальных уравнений, которые позволяют, не решая в явном виде уравнения (6), определить характер стационарного состояния, устойчивость или неустойчивость её решения. При этом используются некоторые свойства правых частей уравнений (6), а также особенности переходных процессов вблизи стационарного состояния $f(x)$. Следовательно, состояние равновесия является особой точкой, в которой плотность теплового потока сливается с потоком энергии [17], то есть

$$-\lambda \frac{du}{dx} \Big|_{x=x^*} = \omega(x^*) \quad (8)$$

где $u = u(x^*)$ – температура в точке x^* , (K или C), $\omega = \omega(x^*)$ – теплового потока, λ – коэффициента теплопроводности конденсированных сред. Подчеркнем, что такого рода общие характеристики сложных систем уравнений представляют, как правило, наибольший интерес.

Сложная система может обладать несколькими стационарными состояниями, что соответствует существованию нескольких корней в алгебраических уравнениях (7) для определения координат стационарной точки. В случае одной переменной кривая пересекает ось абсцисс в нескольких точках, в каждой из которых функция $f(x)$ обращается в нуль. Любая из этих точек $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ и другие, в которой функция $f(x)$ обращается в нуль, являются состоянием равновесия. В зависимости от значений тех или иных параметров системы или констант, а также теплового потока изменяется состояние равновесия, и, кроме того, в системе могут реализоваться различные стационарные структуры.

При дальнейшем нагреве вещества плотность теплового потока изменяется в пространстве. Поэтому для исследования характера изменения величины ω в пространстве с температурой определим, используя уравнения (6), отношение $\frac{d\omega}{du}$:

$$\frac{d\omega}{du} = \frac{x^\mu f(x) + \varepsilon \sqrt{q(x)} \omega}{\varepsilon \omega - x^\mu \sqrt{q(x)} u} = F(u, \omega) \quad (9)$$

Обозначение правой части (9) через $F(u, \omega)$ значит, что нас интересует характер и число состояний равновесия в системе в зависимости от величины ω .

Стационарные точки $\omega = \bar{\omega}$ определяются из уравнения:

$$F(u, \omega) = 0 \text{ или } x^\mu f(x) + \varepsilon \sqrt{q(x)} \omega = 0. \quad (10)$$

Используя уравнение (9), проследим, как будет двигаться изображающая точка по интегральным кривым на фазовой плоскости. Так как ω представляет $\varepsilon \omega > x^\mu \sqrt{q(x)} u$, то в этом случае в верхней фазовой полуплоскости изображающая точка движется так, что ω возрастает, а при $\varepsilon \omega < x^\mu \sqrt{q(x)} u$ в нижней полуплоскости она уменьшается. Таким путем определяется направление движения температуры по фазовым траекториям.

Из уравнения (10) непосредственно вытекает уже отмеченное нами обстоятельство, что во всякой точке фазовой плоскости изображающая точка имеет конечную и отличную от нуля скорость, за исключением состояний равновесия, в которых

$$x^\mu f(x) = -\varepsilon \sqrt{q(x)} \omega \text{ и } \varepsilon \omega = x^\mu \sqrt{q(x)} u.$$

В силу этих условий все состояния равновесия расположены в фазовой плоскости на оси x , причем их абсциссы удовлетворяют уравнению

$$x^\mu f(x) = -\varepsilon \sqrt{q(x)} \omega.$$

Предположим, что на фазовой плоскости задана точка (ω_0, u_0) . Спрашивается, можно ли всегда найти интегральную кривую, которая проходила бы через заданную точку и будет ли такая кривая единственной? Уравнение (6) определяет в каждой точке фазовой структуры единственное направление касательной, за исключением состояния равновесия, где $x^\mu f(x) = -\varepsilon \sqrt{q(x)} \omega$ и $\varepsilon \omega = x^\mu \sqrt{q(x)} u$.

Теперь, дифференцируя уравнение (8) по температуре, будем искать экстремум функции:

$$\frac{dF}{du} = - \frac{(x^\mu f(x) + \varepsilon \sqrt{q(x)} \omega) x^\mu \sqrt{q(x)}}{(\varepsilon \omega - x^\mu \sqrt{q(x)} u)^2}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что условие $\varepsilon \omega = x^\mu \sqrt{q(x)} u$ есть геометрическое место точек на фазовой траектории, где критерий Коши нарушен.

Далее рассмотрим характер изменения u в зависимости от изменения значения теплового потока ω . Тогда из дифференциального уравнения (6) получим:

$$\frac{du}{d\omega} = \frac{\varepsilon \omega - x^\mu \sqrt{q(x)} u}{x^\mu f(x) + \varepsilon \sqrt{q(x)} \omega} = G(\omega, u). \quad (12)$$

Причем $\frac{dG}{d\omega} = - \frac{(\varepsilon \omega - x^\mu \sqrt{q(x)} u) \varepsilon \sqrt{q(x)}}{(x^\mu f(x) + \varepsilon \sqrt{q(x)} \omega)^2}$. Условие $x^\mu f(x) = -\varepsilon \sqrt{q(x)} \omega$ приводит к нарушению критерия непрерывности, и, следовательно, для этого уравнения критерий Коши не выполняется.

Таким образом, дифференциальные уравнения (9) и (12) с разных точек зрения дают различные результаты. Эти результаты отнюдь не противоречивы, так как критерий Коши является только достаточным, но не необходимым условием единственности решения. Следовательно, можно утверждать, что через каждую точку фазовой плоскости проходит одна и только одна интегральная кривая, за исключением, может быть, точек, где одновременно выполняются следующие условия:

$$x^\mu f(x) = -\varepsilon \sqrt{q(x)} \omega \text{ и } \varepsilon \omega = x^\mu \sqrt{q(x)} u.$$

Теперь исследуем кривые на фазовой плоскости (ω, u) , в которых касательные к фазовым траекториям имеют один и тот же наклон. Если динамическая система описывается уравнением (9), касательные к фазовым траекториям определяются выражением

$$\frac{x^\mu f(x) + \varepsilon \sqrt{q(x)} \omega}{\varepsilon \omega - x^\mu \sqrt{q(x)} u} = k. \quad (13)$$

где k – constant. Придавая k различные значения, получаем семейство касательных к фазовой траектории. На фазовой плоскости построим определенное число касательных, необходимых для построения фазовой траектории. Чем ближе друг к другу расположены касательные, тем точнее можно будет провести фазовую траекторию.

Уравнение касательной к фазовой траектории можно получить из выражения (13):

$$\omega = \frac{x^\mu (f(x) + k \sqrt{q(x)} u)}{\varepsilon (k - \sqrt{q(x)})}, \text{ при } \varepsilon \neq 0, \sqrt{q(x)} \neq k. \quad (14)$$

3. Численный расчёт зависимости теплового потока от температуры

Для наглядной интерпретации полученных результатов, используя выражение (13), проведем численный расчёт зависимости ω от u . При проведении численных расчётов функцию $f(x)$, $q(x)$ и параметры принимаем в следующем виде: $q(x) = 1$, $f(x) = 4$, $\varepsilon = 0.01$ (0,015; 0,020), $\mu \geq 0$ (0;1;2) взяты из работ [16, 17]. Результаты численного расчета при различных значениях числа k представлены на рис. 1.

Как видно из рис.1, при $k = -2$ кривые пересекаются, координаты этой точки (0, 2). Для данного частного случая $u=2$ формула (8) справедлива в интервале (-200К, 200К) с точностью до 2-3%. Функция $f(x)$ является функцией источника и при температуре горения порядка 200К пересекается с функцией ω в виде (13), а при дальнейшем возрастании температуры она остается неизменной.

Функция ω вида (13) в зависимости от изменения температуры при различных значениях числа k либо возрастает, либо уменьшается. Если функция ω вида (13) с увеличением температуры возрастает, то в горячей среде возможен взрыв, если ω вида (13) с ростом температуры уменьшается, то в среде возможно прекращение горения.

Теперь найдем критическое условие для температуры горения или взрыва среды. Для этого подставим значение ω в виде (14) во второе уравнение системы (6) и получим:

$$u(x, \varepsilon, \mu) = \frac{f(x) \left[\varepsilon \mu (k - \sqrt{g(x)}) - x (k^2 - \varepsilon (\sqrt{g(x)})') \right]}{k \mu \sqrt{g(x)} (1 - \sqrt{g(x)}) - x (k^2 g(x) - \varepsilon (\sqrt{g(x)})')}. \quad (15)$$

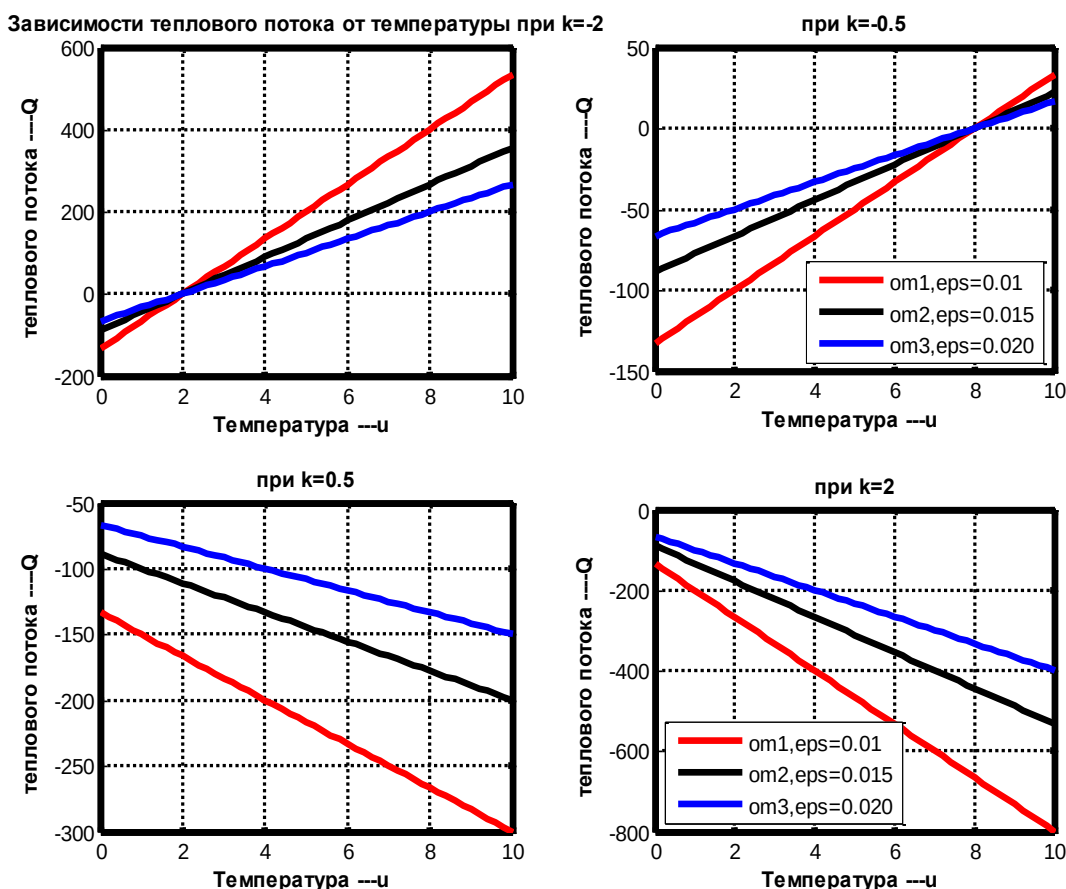


Рисунок 1 – Температурная зависимость теплового потока при разных значениях числа ε

Из условия (8) касания обеих кривых при температуре u^* (температура особой точки) следуют равенства самих функций и их первых производных.

Применяя эти условия к выражению (15), определим зависимости функции температуры u от значения координат x при различных значениях параметров: $q(x) = 1$, $f(x) = 4$, $\varepsilon = 0.01$ (0,015; 0,020), $\mu \geq 0$ (0; 1; 2). Численные расчёты представлены на рис. 2. При проведении численных расчетов были использованы данные работ [16, 17].

Как видно из рис.2, графики иллюстрируют наличие двух пограничных слоев и качественное совпадение с литературными данными [18].

4. Выводы

Таким образом, проведенный анализ сингулярно-возмущенных уравнений стационарной теплопроводности, близкий к решению задачи для невозмущённого уравнения, показал, что сформулированный алгоритм и расчёты на его основе могут быть использованы для исследования полей и связанных полей температуры и теплового потока, концентрации и других задач.

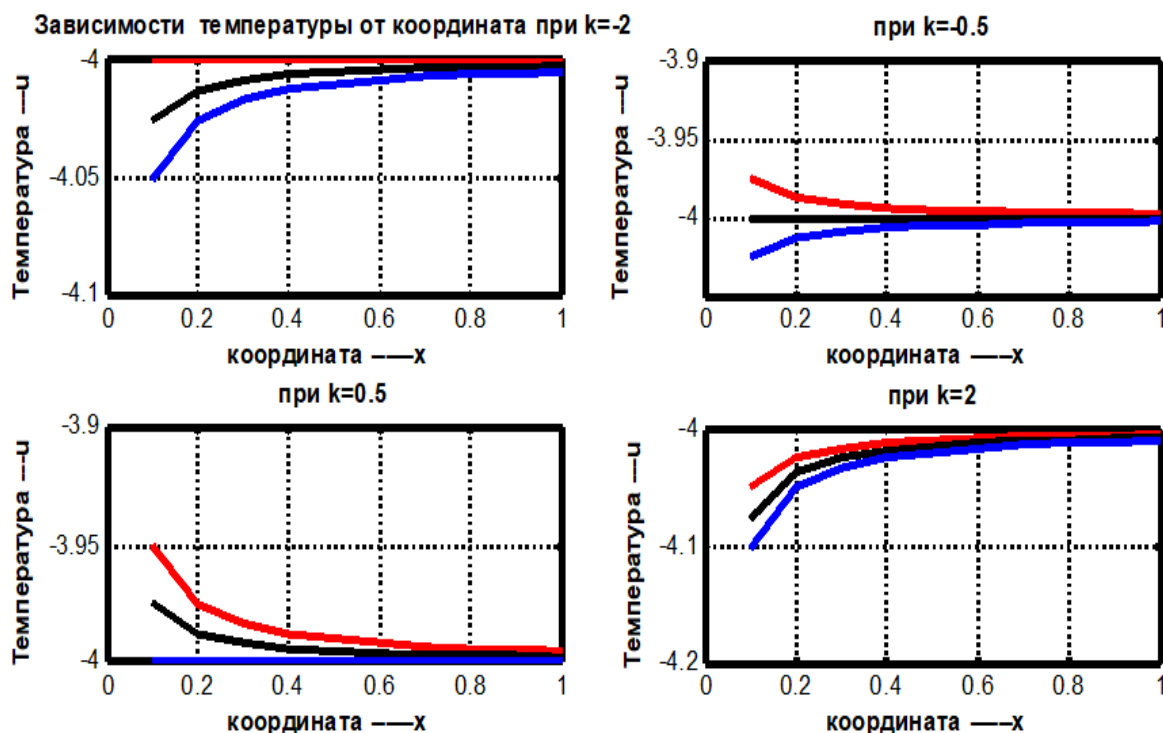


Рисунок 2 – Зависимости функций u от значений координат и числа ε

В заключение отметим, что предложенное модельное исследование схемы решения сингулярно-возмущенных уравнений стационарной теплопроводности, которое близко к решению задачи для невозмущённого уравнения, позволило исследовать изменение потока тепла и температуры в широком интервале температур и является более общим методом по сравнению с другими методами.

Литература

1. Васильева А.Б., Бутузов В.Ф. Сингулярно-возмущенные уравнения в критических случаях. – М.:Изд-во МГУ, 1978. –108 с.
2. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. –М.: Наука, 1974. – 410 с.
3. Мищенко Е.Ф., Розов Н.Х. Дифференциальные уравнения с малым параметром и релаксационные колебания. – М.: Наука, 1975. –227 с.
4. Бутузов В.Ф. Сингулярные возмущения. // Математика, кибернетика. –1988. –№1. –50 с.
5. Джакалья Г.Е. Методы теории возмущений для нелинейных систем. – М.: Наука, 1979. – 455 с.
6. Ломов С.А. Введение в общую теорию сингулярных возмущений. – М.: Наука, 1981. – 400 с.
7. Кононюк А.Е. Обобщенная теория моделирования. Начала. К.1.Ч.1. –Киев: Освіта України,2012. – 602 с.
8. Пененко В. В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. – Новосибирск: Наука, 1985. –209 с.
9. Алиев Б., Джураев Х.Ш. О корнях сингулярно- возмущенных алгебраических уравнений /Б. Алиев, Х.Ш. Джураев // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2004. –Т. 47, №4. – С.92–98.
10. Крутов Ю.М. Моделирование горения пылевидной коксовой частицы в присутствии водяного пара / Ю.М. Крутов, Д.В. Решетняк, И.И.Токарев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – №5(111). – С.47–57.
11. Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко В.Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 264 с.
12. Латтес Р. Лионс Ж.Л. Метод квазиобращения и его приложения. – М.: Мир,1970. – 507 с.
13. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. –288 с.
14. Джураева Г.Х. Исследование математических моделей и соответствующих краевых задач с сингулярными коэффициентами: Автореферат на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – 2019. – 26 с.
15. Джураев Х.Ш. О решениях задачи Коши для сингулярно - возмущенных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами / Х.Ш. Джураев // Матер. I I Между.- науч. кон. «Перспективы развития науки и образования в XXI веке», часть 2. –Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2006 г. – С.21–23.
16. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616с.
17. Джураев Х.Ш. Модельное исследование и оптимизация явлений переноса энергии и массы в конденсированных средах: Автореферат на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – 2019. – 40 с.
18. Скляр С.Н., Бакиров Ж.Ж. Проекционный метод построения разностных схем для задач с пограничными слоями // Известия НАН Кыргызской Республики. Эхо науки, 1997. – №2–3. –С.36–47.

КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДВОЙНОГО ШУНТА МЕЖДУ ВИТКАМИ ВИНТОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

И.Р. Урусова, Э.М. Бакирова, А.Н. Сапаралиева

Институт фундаментальных наук при КНУ им. Ж.Баласагына, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: moon4ik_29@mail.ru, elizabetta_83@mail.ru, saparaliev1980@mail.ru

В рамках нестационарной трехмерной математической модели в приближении частичного локального термодинамического равновесия плазмы выполнены расчеты открытой электрической дуги постоянного тока в однородном внешнем аксиальном магнитном поле. При некоторых значениях силы тока, межэлектродного расстояния и внешнего магнитного поля обнаружен режим двойного шунтирования между витками спирали столба дуги. Причиной шунтирования являются конвективный теплоперенос потоками плазмы и скольжение теплового поля дуги. В результате воздействия указанных факторов формируется тепловое поле, которое создает новую локальную электропроводящую область, где происходит электрический пробой.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, открытая электрическая дуга во внешнем аксиальном магнитном поле, винтовая форма столба дуги.

Введение. В различных технологических процессах и научных исследованиях находит применение электрическая дуга, горящая во внешнем магнитном поле [1-4]. Установлено, что в результате воздействия внешнего аксиального магнитного поля дуговой столб может приобретать винтовую пространственную форму [5-9].

В ходе численных экспериментов [10] было обнаружено также явление шунтирования дуги между витками спирали, когда происходил электрический пробой между витками спирали винтовой дуги. В настоящей работе приводится описание явления двойного шунтирования дуги между витками спирали.

Полученные результаты позволяют расширить знания о протекающих процессах в электрической дуге во внешнем аксиальном магнитном поле и могут быть использованы с целью оптимизации и разработки новых плазменных технологий.

Постановка задачи и математическая модель. Рассчитывается электрическая дуга постоянной силы тока I , межэлектродным расстоянием L , горящая в аргоне атмосферного давления в однородном внешнем аксиальном магнитном поле (ВАМП) величиной H^{Ext} . Расчеты проводятся на основе нестационарных 3-D уравнений электрической дуги, записанных в приближении частичного локального термодинамического равновесия плазмы. В декартовой системе координат (x, y, z) уравнения могут быть записаны в следующем виде [11, 12]:

уравнение непрерывности газа тяжелых частиц

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

уравнение непрерывности газа электронов

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \text{div}(N_e \mathbf{V}_e) = R_e, \quad (2)$$

уравнение баланса энергии газа электронов

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} k T_e N_e \right) + \text{div} \left(\frac{5}{2} k T_e N_e \mathbf{V}_e \right) = \text{div}(\lambda_e \text{grad} T_e) + j^2 / \sigma - \psi - B(T_e - T) - U_i R_e,$$

(3)

уравнение баланса энергии газа тяжелых частиц

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{3}{2} kT(N_i + N_a) + \operatorname{div} \left(\frac{5}{2} kT(N_i + N_a) \mathbf{V} \right) = [\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + B(T_e - T)], \quad (4)$$

уравнение баланса импульса газа вдоль осей координат x, y, z

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} u) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_x + s_x + (\rho - \rho_\infty) g, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} v) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_y + s_y, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} w) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_z + s_z, \quad (7)$$

уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad (8)$$

закон Ома в обобщенной форме

$$\mu_0 (\mathbf{V}_e \times \mathbf{H}) + \mathbf{E} = \mathbf{j} / \sigma + (\mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H}) - \operatorname{grad} P_e) / q_e N_e, \quad (9)$$

закон Дальтона

$$P/kT = N_i + N_a + N_e T_e / T. \quad (10)$$

Отметим, что в алгоритме расчета напряженность внешнего аксиального магнитного поля H^{Ext} добавляется к x -компоненте собственного магнитного поля дуги H_x , т.е. $H_x + H^{Ext}$. В соответствии с оценками [11] в математической модели принято, что плазма является однократно ионизованной, квазинейтральной, течение ламинарное, звуковое, излучение объемное; вязкая диссипация энергии и приэлектродные процессы не рассматриваются.

При записи уравнений (1–10) использованы следующие обозначения: t – время, ρ , λ_e , λ , μ , σ , ψ – соответственно плотность газа, теплопроводность электронного газа и газа тяжелых частиц, вязкость, электропроводность, излучение; m – масса атома плазмообразующего газа; N_i , N_a , N_e – концентрации ионов, атомов и электронов соответственно; $R_e = N_e(N_a K_i - N_e N_i K_r)$ – скорость генерации электронов, где K_i , K_r – константы ударной ионизации и трехчастичной рекомбинации соответственно; U_i – потенциал ионизации плазмообразующего газа; $P_e = N_e k T_e$ – парциальное давление электронов, k – постоянная Больцмана; $B = 3m_e / m k_B v_e N_e$ – коэффициент обмена энергией между электронами и тяжелыми частицами при упругих столкновениях, m_e – масса электрона, v_e – частота столкновений; $\mathbf{g}$ – вектор ускорения свободного падения; q_e – элементарный заряд; μ_0 – магнитная постоянная; $\mathbf{V}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{H}$ – соответственно векторы скорости, напряженности электрического поля, плотности электрического тока, напряженности собственного магнитного поля дуги; T , T_e – температура тяжелых частиц и электронов; P – давление; u , v , w – соответственно компоненты вектора скорости в направлениях осей координат x, y, z ; $\mathbf{V}_d$, $\mathbf{V}_t$, $\mathbf{V}_a$ – векторы скоростей дрейфа электронов, термо- и амбиполярной диффузии, определяемые по формулам: $\mathbf{V}_d = \mathbf{j} / (q_e N_e)$, $\mathbf{V}_t = -D_a / T_e \operatorname{grad} T_e$, $\mathbf{V}_a = -D_a / N_e \operatorname{grad} N_e$, где D_a – коэффициент амбиполярной диффузии; $\mathbf{V}_e = \mathbf{V} + \mathbf{V}_d + \mathbf{V}_t + \mathbf{V}_a$ – суммарная скорость электронов; s_x , s_y , s_z – дополнительные к $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u)$, $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v)$, $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w)$ вязкие слагаемые.

Коэффициенты переноса и теплофизические свойства неравновесной аргоновой плазмы рассчитываются в соответствии с методикой [11].

Электромагнитная часть задачи решается в переменных φ, A , где φ – скалярный потенциал электрического поля $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$, A – векторный потенциал магнитного поля [12]. Температура неплавящихся графитовых электродов определяется из уравнения теплопроводности. Диаметр электродов принят равным 1 мм.

Метод решения уравнений, постановка граничных и начальных условий. В соответствии с методикой [13] систему уравнений (1–10) представим в форме обобщенного дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \beta \rho u \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \beta \rho v \Phi}{\partial y} + \frac{\partial \beta \rho w \Phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \delta, \quad (11)$$

здесь Φ является одной из неизвестных (N_e , T_e , T , u , v , w , ρ , A_x , A_y , A_z). Для каждой переменной Φ имеются свои коэффициенты α , β , γ , δ .

Численное решение уравнения (11) проводим методом контрольного объема на основе конечных разностей. Используется неявная разностная схема, неизвестные переменные (скорость и давление) рассчитываются по алгоритму SIMPLE'R [13]. Полученная система алгебраических уравнений решена итерационным методом Зейделя–Гаусса с использованием нижней релаксации.

Для рассчитываемых переменных постановка граничных условий проведена по периметру расчетной области $ABCDEFGH$ (рис. 1). Начальные условия задаются в некоторый условный момент времени $t = 0$.

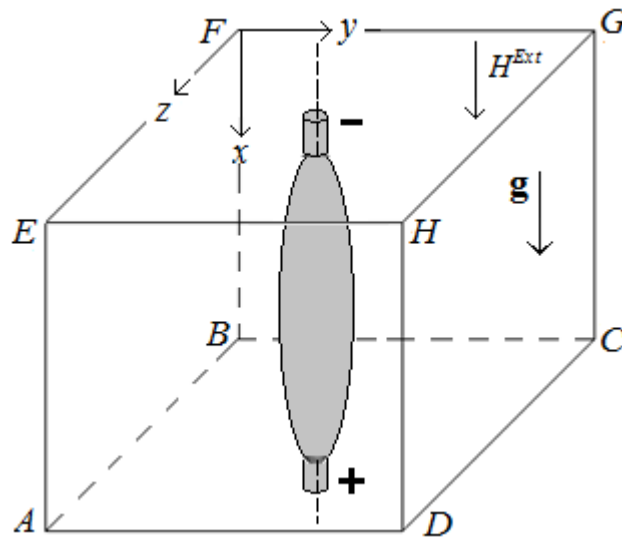


Рисунок – 1. Схема расчетной области в декартовых координатах x , y , z .
Пунктирная линия - - - – центральная ось дуги

На внешних границах прямоугольной расчетной области значения температуры и концентрации электронов равны значениям температуры $T_e^{\min}$ и концентрации $N_e^{\min}$ «холодного» не ионизованного газа: $T_e = T_e^{\min} = 3$ КК, $N_e = N_e^{\min} = 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Температура тяжелых частиц принята равной температуре холодного газа $T = 300$ К.

При отсутствии электрического тока потенциал электрического поля ϕ рассчитывается из условия $\partial \phi / \partial n = 0$, где n – нормаль к поверхности границы. На внешней токоведущей торцевой поверхности катода S_c и анода S_a потенциал электрического поля ϕ рассчитывается из условия протекания электрического тока I по нормали к поверхности. Такое же условие для ϕ используется на границе «катод–плазма». Вне катода и анода электрический ток отсутствует. Отметим, что в настоящей работе за направление электрического тока I выбрано направление движения электронов от катода (–) к аноду (+).

Компоненты векторного потенциала A_x , A_y , A_z магнитного поля определяются из условия равенства нулю первой производной $\partial A / \partial n = 0$ по нормали к границе.

Давление P полагается равным относительному значению $P = 1$ Па. Компоненты скорости u , v , w определяются из условия равенства нулю $\partial^2 V / \partial n^2 = 0$.

В начальный момент между электродами задаётся высокотемпературная ($T = 9$ КК) зона с неподвижным газом в форме цилиндра.

Расчет характеристик в нерегулярной области, включающей в себя дуговую плазму и электроды, проводится в рамках метода фиктивных областей [14], адаптированного для расчета электрической дуги [15].

Для моделирования винтовой формы дуги во внешнем аксиальном магнитном поле используется схемный аналог флуктуаций температуры электронов [16].

Обсуждение результатов расчета.

1. Рассмотрим расчетные характеристики дуги при значениях $L = 50$ мм, $I = 40$ А, $H^{Ext} = 5$ кА/м. Отметим, что вначале, до выхода характеристик дуги на стационарный режим, расчет проводится без внешнего аксиального магнитного поля, т.е. $H^{Ext} = 0$. Начиная с момента времени $t = 30$ мс принято, что дуга горит во внешнем аксиальном магнитном поле $H^{Ext} = 5$ кА/м, и «схемный» аналог флуктуации температуры электронов [14] «включён» в вычислительный алгоритм.

Как отмечалось выше, в ходе численных экспериментов было обнаружено явление шунтирования между витками спирали [10]. В качестве примера на рис. 2 показано развитие шунтирования на интервале времени $t = 134 \div 136$ мс. Из рисунка видно, что между витками спирали винтовой дуги происходит электрический пробой в аксиальном направлении.

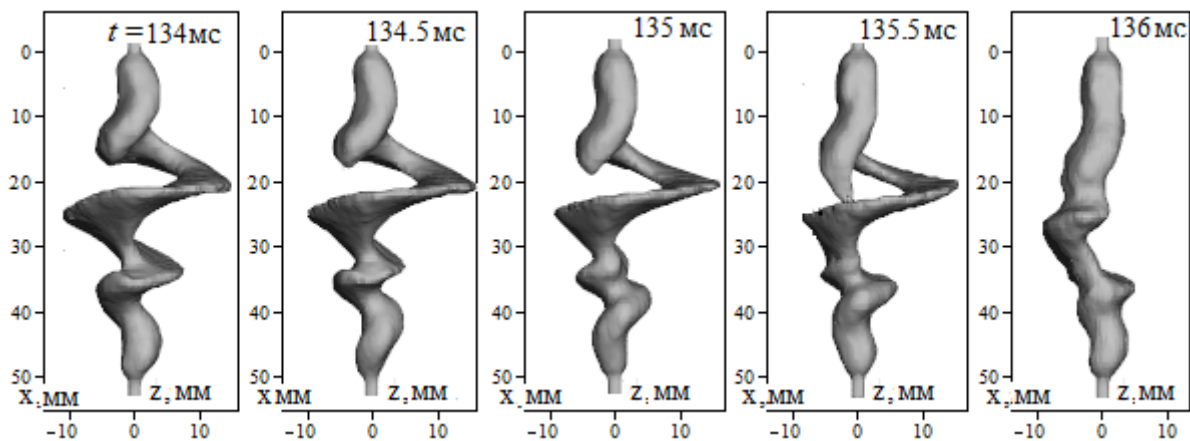


Рисунок – 2. Шунтирование в аксиальном направлении со стороны катода;
 $L = 50$ мм, $I = 40$ А, $H^{Ext} = 5$ кА/м

Вследствие этого происходит разрушение регулярной винтовой структуры. Вычислительный эксперимент показал, что шунтирование может быть как со стороны катода, так и со стороны анода (рис. 3).

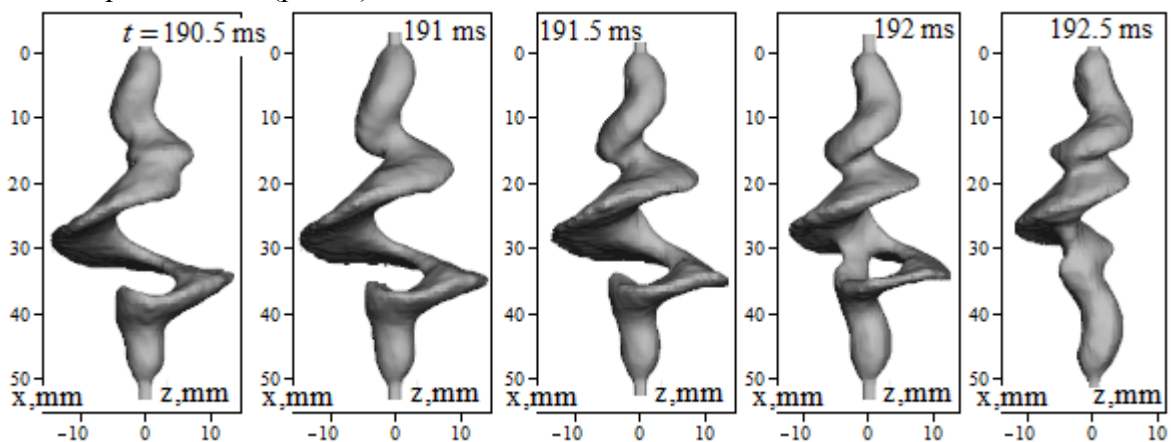


Рисунок – 3. Шунтирование в аксиальном направлении со стороны анода;
 $L = 50$ мм, $I = 40$ А, $H^{Ext} = 5$ кА/м

Катодный и анодный потоки плазмы стремятся выпрямить столб дуги и способствуют теплопереносу в аксиальном направлении в приосевой области. Возникающее новое тепловое поле формирует зону электрической проводимости, и в этой зоне происходит пробой. 2. Увеличение ВАМП от 5 до $H^{Ext} = 7$ кА/м при тех же значениях $L = 50$ мм, $I = 40$ А приводит к разрыву столба дуги (рис. 4).

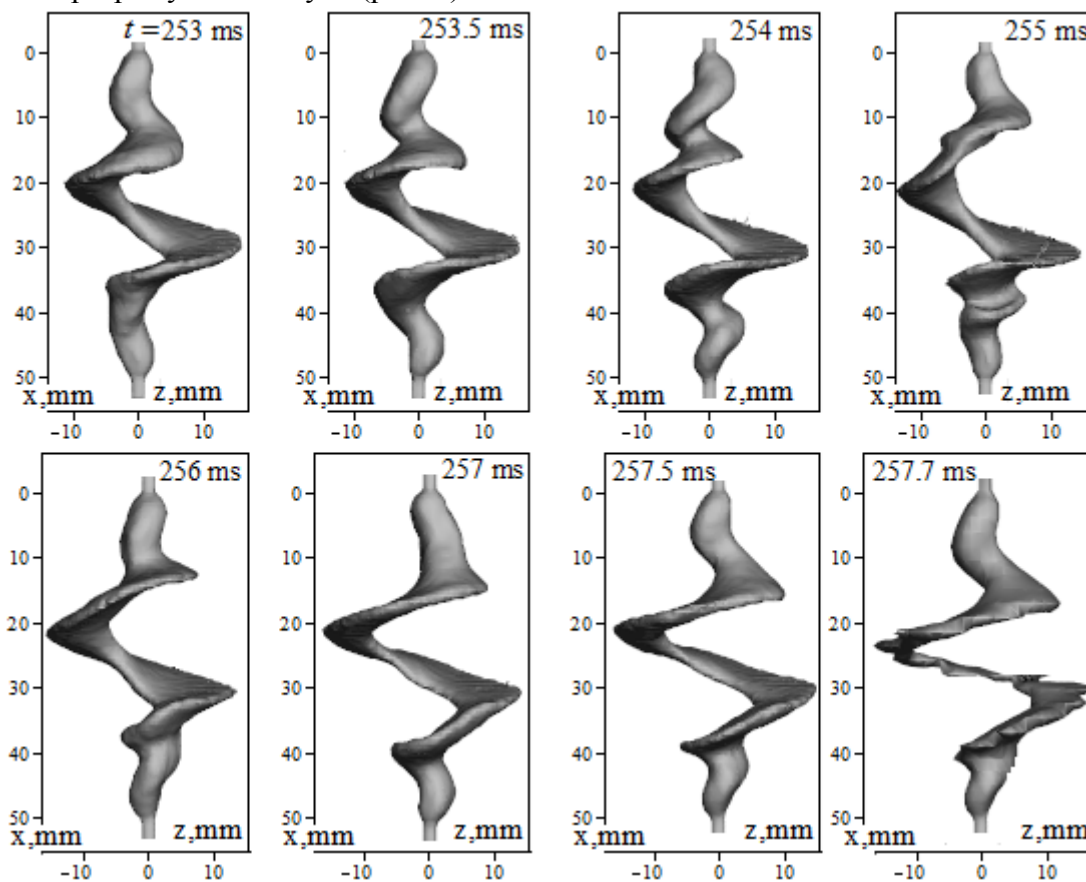


Рисунок – 4. Фрагмент эволюции формы дуги перед разрывом,
 $L = 50$ мм, $I = 40$ А, $H^{Ext} = 7$ кА/м

На рис. 4 показано изменение формы дуги, когда с момента времени $t = 253$ мс значение ВАМП в вычислительном алгоритме увеличено с 5 до 7 кА/м. Из рисунка видно, что столб дуги превращается в один большой виток, диаметр которого возрастает во времени. К моменту $t = 257.7$ мс практически происходит разрыв дуги. Разрыв обусловлен увеличением силы Ампера $F_A \sim (j_r \times H^{Ext})$, которая ещё больше деформирует столб дуги. Таким образом, в сравнительно больших внешних магнитных полях шунтирования не будет происходить, а будет происходить разрыв столба дуги.

3. Далее рассмотрим результаты расчета при значениях параметров $L = 70$ мм, $I = 40$ А, $H^{Ext} = 1,1$ кА/м. По сравнению с предыдущими вариантами (см. п.1, 2) увеличено межэлектродное расстояние от 50 до 70 мм при одинаковой силе тока 40 А. Однако при этом уменьшена величина ВАМП до 1,1 кА/м. Известно, что аксиальные потоки плазмы со стороны электродов способствуют стабилизации дугового столба. Вместе с тем увеличение межэлектродного расстояния (при одинаковой силе тока) уменьшает стабилизирующее влияние аксиальных потоков плазмы.

В этом случае столб дуги является более чувствительным к воздействию ВАМП. По этой причине величина ВАМП уменьшена до $H^{Ext} = 1,1$ кА/м. В противном случае в численном расчете происходит разрыв дуги.

Анализ результатов (рис. 5) показывает, что в данном случае тоже наблюдается шунтирование витка спирали. Отметим, что при заданных параметрах дуги формируется только один виток спирали. Физика процессов здесь аналогичная варианту п.1. – катодный и

анодный потоки плазмы стремятся выпрямить столб дуги и способствуют теплопереносу в аксиальном направлении в приосевой области. Возникающее тепловое поле формирует зону электрической проводимости и происходит пробой.

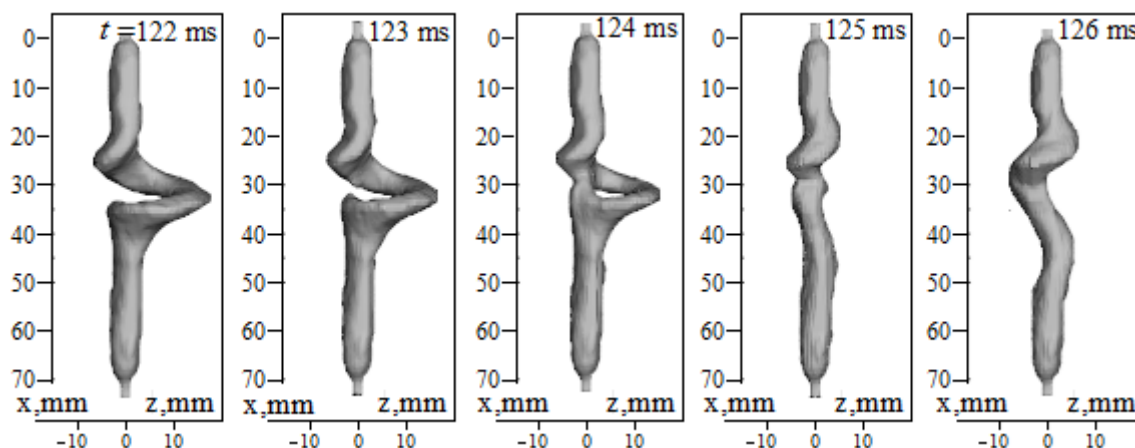


Рисунок – 5. Фрагмент эволюции формы столба дуги $L = 70$ мм, $I = 40$ А, $H^{Ext} = 1,1$ кА/м

Результаты расчетов показали, что увеличение ВАМП от 1,1 до 1,3 кА/м приводит уже к разрыву столба дуги. Качественно процесс разрыва столба дуги является аналогичным, как показано на рис. 4.

4. Рассмотрим результаты расчета при $L = 70$ мм, $I = 60$ А. По сравнению с предыдущим вариантом (см. п.3) сила тока увеличена с 40 до 60 А. Была проведена серия численных расчетов для различных значений $H^{Ext} = 1; 1,5; 2; 3$ и 4 кА/м.

Анализ результатов показал, что при значениях $H^{Ext} = 1$ и 1,5 кА/м столб дуги принимает винтовую форму, однако шунтирования не наблюдается. Шунтирование происходит с увеличением ВАМП до значений $H^{Ext} = 2 - 3$ кА/м.

На рис. 6 показан фрагмент эволюции пространственной формы столба дуги для следующих значений: $L = 70$ мм, $I = 60$ А, $H^{Ext} = 3$ кА/м.

Как и в предыдущих вариантах, пространственная форма дуги не является постоянной и меняется во времени. На интервале времени $\Delta t = 173 \div 174,7$ мс показан процесс шунтирования витка спирали дуги. Шунтирование между витками спирали, как уже отмечалось выше, вызвано конвективным теплопереносом катодным потоком плазмы в аксиальном направлении.

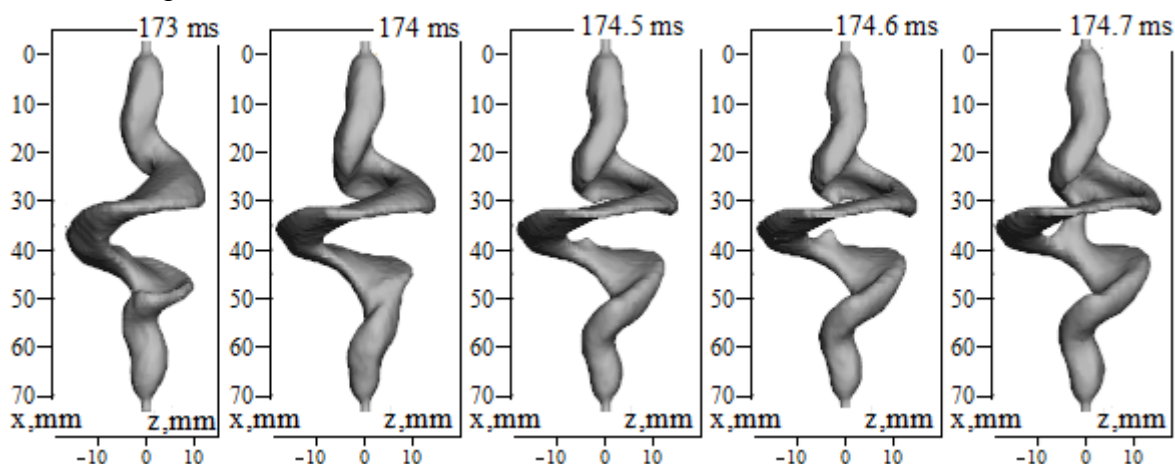


Рисунок – 6. Фрагмент эволюции формы столба дуги на интервале времени $\Delta t = 170,5 \div 174,7$ мс. $L = 70$ мм, $I = 60$ А, $H^{Ext} = 3$ кА/м

Для дуги при значениях параметров $L = 70$ мм, $I = 60$ А, $H^{Ext} = 3$ кА/м выявлена особенность – наблюдается одновременно двойное шунтирование (рис. 7). Пробой происходит одновременно в двух местах.

Аналогично одиночному шунтированию при двойном шунтировании наряду с конвективным теплопереносом дополнительно возникает кондуктивный теплоперенос, обусловленный скольжением теплового поля дуги [17, 18]. Вслед за новым тепловым полем формируется локальная зона электропроводности, где происходит пробой.

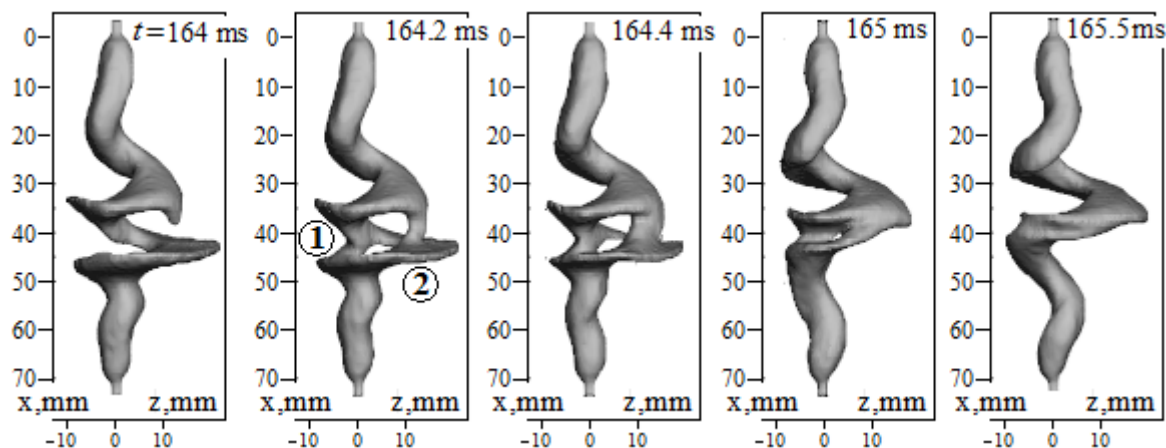


Рисунок – 7. Пример одновременного двойного шунтирования участков дуги.

Цифрами 1 и 2 в момент времени $t = 164,2$ мс указаны участки шунтирования.

$L = 70$ мм, $I = 60$ А, $H^{Ext} = 3$ кА/м

Дальнейшее увеличение ВМП до $H^{Ext} = 4$ кА/м приводит к разрыву столба дуги, качественно аналогичное тому, как ранее показано на рис. 4.

Закключение. Выполнено компьютерное моделирование открытой дуги во внешнем аксиальном магнитном поле. Обнаружен режим двойного шунтирования витков спирали между собой, когда пробой происходит одновременно в двух местах. Явление шунтирования обусловлено конвективным теплопереносом потоками плазмы и скольжением теплового поля дуги. При этом зарождающееся новое тепловое поле создает локальную область электропроводности, где наблюдается двойной пробой газа между витками спирали винтовой дуги.

Литература

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Иностранная литература, 1961. – 370 с.
2. Лебедев А.Д., Урюков Б.А., Энгельшт В.С. и др. Низкотемпературная плазма. Т. 7. Сильноточный дуговой разряд в магнитном поле. – Новосибирск: Наука, 1992. – 267 с.
3. Синкевич О.А. Нелинейная теория винтовой неустойчивости электрической дуги во внешнем магнитном поле // ДАН. 1985. – Т. 280. – № 1. – С. 99.
4. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: НГТУ, 2005. – 508 с.
5. Ментель Ю. Магнитная неустойчивость электрической дуги. В кн. Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1977. – 182 с.
6. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. –Л.: Энергия, 1978. – 160 с.
7. Асиновский Э.И., Кузьмин А.К., Пахомов Е.П. Измерение геометрических параметров винтовой дуги // Теплофизика высоких температур. 1980. – Т. 18. – № 1. – С. 9.
8. Ганефельд Р.В. О винтовой неустойчивости дугового разряда в литиевой плазме // ТВТ, 2000. – Т. 38. – № 3. – С. 507.
9. Недоспасов А.В. Токово-конвективная неустойчивость газоразрядной плазмы // УФН. – 1975. – Т.16. – №4. – С.643.

10. Урусова И.Р. Численный эксперимент шунтирования витков спирали винтовой формы электрической дуги // Проблемы автоматизации и управления. – №1 (36). – 2019.
11. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. Низкотемпературная плазма. Т. 1. Теория столба электрической дуги. – Новосибирск: Наука, 1990. – 374 с.
12. Урусов Р.М., Урусова И.Р. Нестационарная трехмерная модель электрической дуги. ч. 1. Математическая модель и результаты тестирования // Теплофизика и аэромеханика, – Новосибирск, 2014, № 1. – С. 121.
13. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. –М.: Энергоатомиздат, 1984. – 146 с.
14. Смагулов Ш., Сироченко В.П., Орунханов М.К. Численное исследование течений жидкости в нерегулярных областях. – Алматы: Гылым, 2001. – 276 с.
15. Урусов Р.М., Урусова Т.Э. Применение метода фиктивных областей для расчета характеристик электрической дуги // Теплофизика высоких температур, 2004. –Т. 42. – № 3. – С. 374.
16. Урусов Р.М., Урусова И.Р. Численное моделирование винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле // Теплофизика высоких температур, 2017. – Т. 55. –№ 5. – С. 661.
17. Меккер Г. Причины движения и смещения дуги // ТИИЭР. 1971. – Т. 59. – № 4. – С. 4.
18. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. – Л.: Энергия, 1978. – 160 с.

Р.Н. Аскарбеков¹, Т.Б. Дуйшеналиев²¹Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,
Бишкек, Кыргызстан²НИУ «Московский энергетический институт», Москва, РоссияE-mail: askarbekovu@gmail.com, duishenaliev@mail.ru**БОЛЬШИЕ УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ
МНОГОСЛОЙНЫХ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

При описании деформации резинометаллических элементов появляется необходимость рассмотрения геометрической и физической нелинейности. Изучая все существующие методы, в статье предложен альтернативный подход. В статье рассматривается аналитический метод описания большой упругой деформации резинового слоя. Аналитические методы механики деформируемого твердого тела содержат идеи, которые во многих случаях помогают и при численном решении задач.

Ключевые слова: деформация резинового слоя, аналитический метод, краевая задача, резинометаллическая опора.

Введение. Статическая краевая задача

В теории упругости известны различные варианты общих решений статической краевой задачи. Обзор известных решений приведен в первой главе диссертации Аскарбекова Р.Н. [1]. В большинстве решений напряжения или перемещения представлены через произвольные независимые функции (например, гармонические или бигармонические) таким образом, чтобы уравнения равновесия или движения удовлетворялись тождественно. На данный момент имеется множество вариантов решений уравнений линейной теории упругости [8] в перемещениях или напряжениях [4, 6, 11, 12]. В подавляющем все они опираются на устоявшийся подход к постановке и решению краевых задач. В статье применен другой подход, аналитический метод для моделирования напряженно-деформированного состояния резинометаллических элементов.

Аналитический метод моделирования

Для рассмотрения процесса сжатия многослойных резинометаллических опор (РМО) воспользуемся математической моделью, предложенной Дуйшеналиевым Т.Б. [1, 3]. Торцы закреплены жестко, смещений нет. Запишем через напряжения приложенные усилия к РМО. Тело с заданными силами внутри своего объема V и на его поверхности S находится в равновесии. Необходимо найти напряжения и деформации внутри тела. Тут объем тела V и его поверхность S , разумеется, должны быть заданы [1]. Пусть f_i и p_i – соответственно внешние силы, заданные в V и на S . Обозначая через σ_{ij} компоненты тензора напряжений, представим постановку математически, где ν – коэффициент Пуассона.

$$\sigma_{ji,j} + f_i = 0, \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, x_i \in V, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu}\sigma_{kk,ij} + \frac{\nu}{1-\nu}\delta_{ij}f_{k,k} + f_{i,j} + f_{j,i} = 0, x_i \in V, \quad (2)$$

$$\sigma_{ji}n_j = P_i, \quad x_i \in S. \quad (3)$$

Величины внешних сил в статической краевой задаче могут быть разными. Зададимся областью определения уравнений статической краевой задачи. Начало прямоугольной декартовой системы координат поместим в самом центре, что соответствует положению $(X,Y,Z)=(0,0,0)$. Итак, под обозначением V будем подразумевать следующую область в миллиметрах:

$$-0.05 \leq x_1 \leq 0.05, \quad -0.05 \leq x_2 \leq 0.05, \quad 0 \leq x_3 \leq 0.1. \quad (4)$$

Рассмотрим вторую краевую задачу без массовых сил. Резинометаллическая опора с усилиями (7) на своей поверхности находится в равновесии.

$$\sigma_{ji,j} = 0, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \quad x_i \in V, \quad (5)$$

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu} \sigma_{kk,ij} = 0, \quad x_i \in V, \quad (6)$$

$$\sigma_{ji}n_j = \delta_{i2}c x_3, \quad x_i \in S, \quad (7)$$

где V определяется выражениями (4).

Более подробное описание нового аналитического метода приводится в главе 3 [1], где в пункте 3.4 приводится решение для резинометаллических опор.

В системе MATLAB был создан программный код по предложенной математической модели. Результаты расчета приводятся на рис.1. При расчете рассматриваются четыре вида резинометаллической опоры (РМО), которые отличаются друг от друга. Геометрические параметры сохраняются, изменяется толщина резиновых слоев и количество металлических пластин. На рис. 1 сплошным цветом показаны металлические пластины, а в виде сетки – однородные резиновые слои.

При действии нагрузки резиновые слои, как правило, выпучиваются по краям, и происходит ее осадка (деформация). Резиновые элементы могут допускать значительные относительные деформации, достигающие более 100% с полным восстановлением геометрической формы и размеров [5, 7, 9, 10], если нагрузка статическая или имеет медленно изменяющийся характер. Из-за наличия в резине значительного внутреннего сопротивления расчет деталей, работающих при статических нагрузках, существенно отличается от расчета на динамические нагрузки. С использованием нового аналитического метода и реализацией программного кода в MATLAB можно получить значения перемещений точек резинового слоя.

Для подтверждения эффективности используемого метода воспользуемся уже общеизвестным методом конечных элементов [14], реализованным в таком программном вычислительном комплексе, как ANSYS.

Моделирование сжатия при помощи МКЭ

Для создания РМО в системе ANSYS будем использовать те же геометрические и физические параметры, которые были заданы в MATLAB. Точно такие же условия, распределённая сжимающая сила приложена к верхнему торцу. Разбиваем на сетки РМО и приложим постепенно силу сжатия.

Разделение области на конечные элементы является первым шагом в методе конечных элементов (МКЭ). Это эквивалентно замене области, имеющей бесконечное число степеней свободы, на область, имеющей конечное число степеней свободы. На рис. 2 приведен результат расчета цилиндрического резинометаллического элемента, параметры которого: высота – 0,1м, диаметр – 0,1м, модуль упругости – 12 МПа, плотность резины – 1350кг/м³.

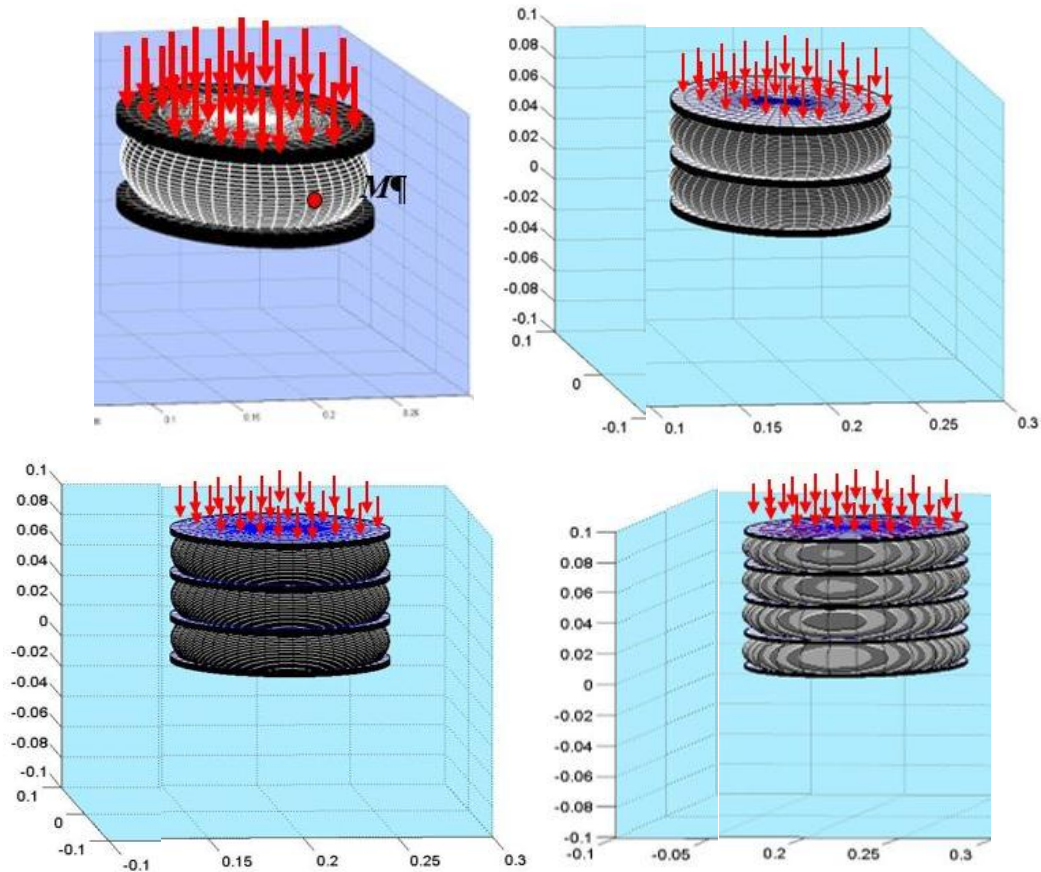


Рисунок 1 – Деформация РМО при сжатии в системе MATLAB

В процессе сжатия большие напряжения и деформацию испытывает только резиновый слой, а металлические пластины распределяют усилия по всему телу. Поэтому на рис. 2 видно, как резина деформируется и образует бочку.

Для корректности использования таких программных расчетных комплексов приведем ниже результаты натурных экспериментов РМО на сжатие.

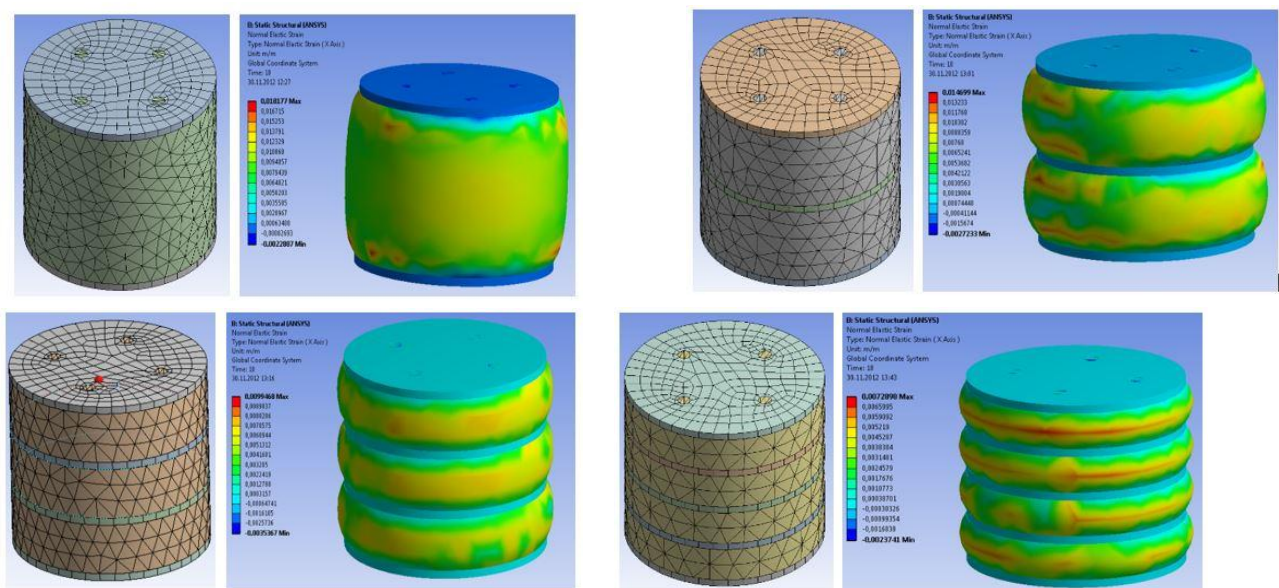


Рисунок 2 – Конечно-элементная сетка и распределение напряжений в резиновых слоях РМО

Сжатие резинометаллических опор

Эксперимент на сжатие РМО был проведен в лаборатории кафедры «Механика» Кыргызского государственного технического университета им.И.Раззакова на прессе УМ-100. Нагружение выполнялась постепенно (1тонна/мин), максимальная нагрузка равна 6 тоннам. Параметры РМО точно такие же, как и в системе MATLAB, так и в ANSYS. При сжатии наблюдаются большие упругие деформации резинового слоя. Это объясняется наличием трения в зоне соприкосновения резины и металлической пластины, а также относительно большой высотой резинового слоя. Металлические пластины не деформируются и лишь равномерно распределяют нагрузку на резиновый слой. При разгрузке резиновый слой полностью восстанавливается и приобретает первоначальный вид. Деформации происходят в упругой зоне. Никаких внешних повреждений при восстановлении после сжатия не наблюдалось.



Рисунок 3 – Испытание на сжатие РМО на прессе УМ-100

Из рисунка видно, что чем больше высота резинового слоя, тем больше упругие деформации такой опоры. Высота резинового слоя, несомненно, влияет и на частоту собственных колебаний самой опоры. При увеличении количества металлических пластин жесткость и прочность РМО заметно повышаются, что позволяет использовать их как опоры зданий и сооружений. При достижении максимальной деформации резины в резиновом слое начинается процесс накопления упругой энергии, что позволяет резиновому слою сохранять полученную форму и продолжать сопротивляться приложенной нагрузке. Процесс сжатия происходит в упругих пределах.

Результаты расчетов

Приведем по вышеизложенным методам и экспериментальным данным результаты расчетов. Напряженно-деформированные состояния резинометаллических опор, определенные по предлагаемой математической модели, сопоставлялись с результатами экспериментальных исследований и численными расчетами, выполненными МКЭ. Предложенный метод по своим результатам ничем не уступает методу МКЭ и относится к аналитическим методам. И данный метод позволяет моделировать большие упругие деформации.

Из выше приведенных графиков (рис. 4) видно, что расчеты, выполненные на основе аналитического метода (разработанная авторами модель), хорошо совпадают с экспериментальными данными, а также с результатами, полученными при расчетах по МКЭ.

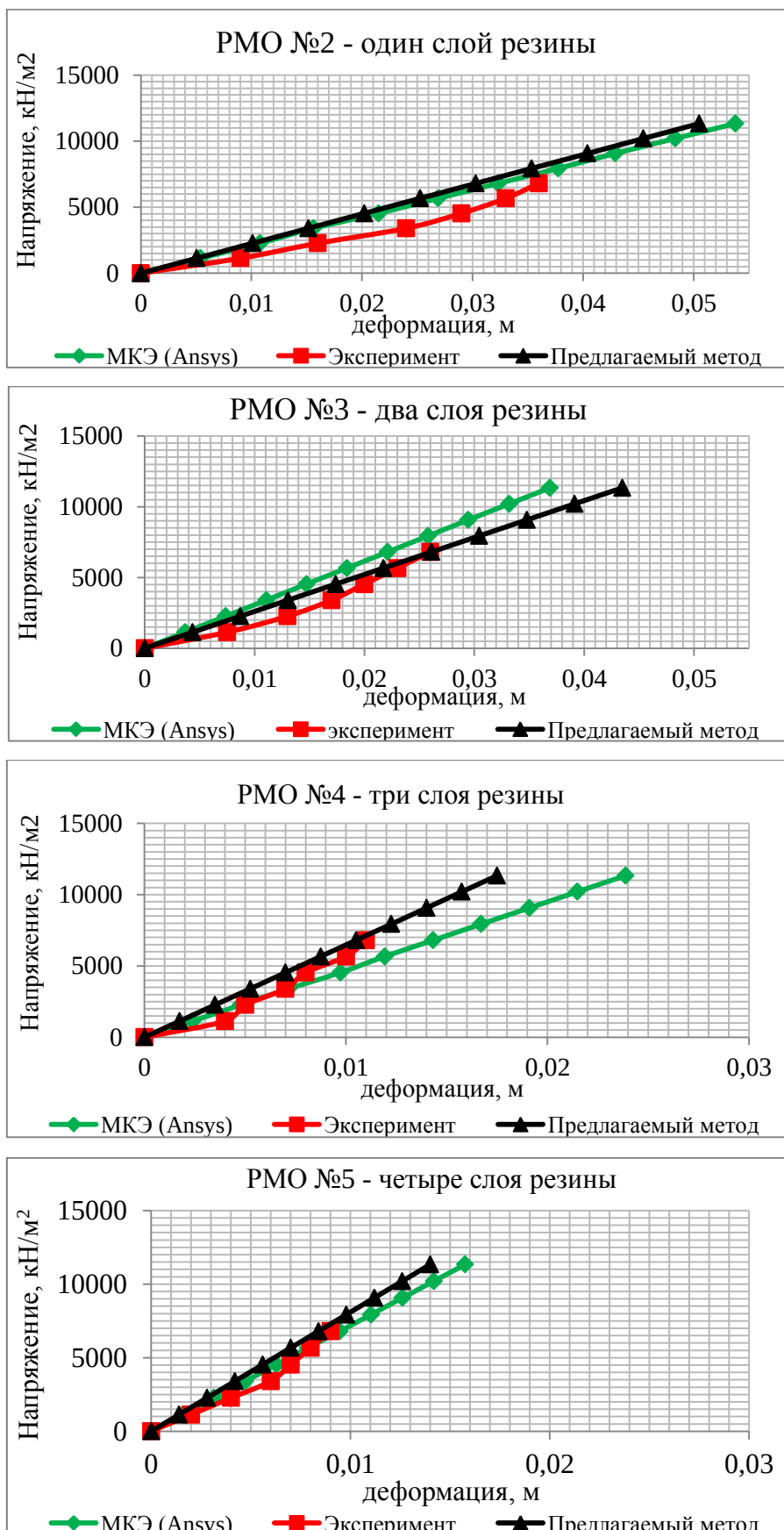


Рисунок 4 – Расчетные данные в системе MATLAB, ANSYS и результаты экспериментов

Экспериментальные линии, как видно из рис. 4, имеют точку преломления, что говорит о нелинейном поведении резины при сжатии. Описать этот процесс можно следующим образом: при росте нагрузки микропоры и микропустоты резинового тела могут закрываться, увеличивая однородность и сплошность. Модуль упругости растет, сама резина как бы упрочняется.

Заключение

Предлагаемая математическая модель развивает применительно к резиноподобным материалам аналитический метод решения статических краевых задач теории упругости, предложенный Т.Б.Дуйшеналиевым, и удобна для использования современных компьютерных программ.

Новые результаты получены на основе применения фундаментальных положений и законов механики сплошных сред. Хорошо согласуются с данными экспериментальных и численных исследований, в т. ч. в системе ANSYS и MATLAB, а также с результатами исследований других авторов.

Результаты данной работы и разработанной математической модели, реализованные в системе MATLAB, могут найти применение при решении и других задач механики деформируемого твердого тела, механики горных пород, механики композиционных материалов, а также в инженерной практике. Экспериментальные данные и полученные теоретические результаты представляют интерес при проектировании систем активной сейсмо- и вибрационной защиты инженерных сооружений.

Литература

1. Аскарбеков Р.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния вибро- и сейсмоизолирующих резинометаллических элементов: Дис.... канд. физ.-матем. наук. – Бишкек, 2017. – 126 с.
2. Дуйшеналиев Т.Б., Аскарбеков Р.Н. Нетрадиционный метод расчета напряженно-деформированного состояния резинометаллических опор // Труды университета РГКП Карагандин. гос. техн. ун-т. – 2016. – Вып. 1 (62). – С. 96–100.
3. Жакыпбек А.Б., Дуйшеналиев Т.Б. Новое воззрение на некоторые основы механики деформируемого тела. – Бишкек: [Б.И.], 1999. – 238 с.
4. Лавендел, Э.Э. Расчёт резинотехнических изделий. – М.: Машиностроение, 1976 – 232 с.
5. Мальков В.М., Круглякова В.И. Критические нагрузки многослойных резинометаллических элементов // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 298, № 5. – С. 1090–1093.
6. Мирошкин К.П. Нелинейное деформирование неоднородных элементов машиностроительных конструкций из резинометаллических материалов с учетом старения: Дис.... канд. техн. наук. – Москва, 2007. – 157 с.
7. Мондрус В.Л., Сизов Д.К. Определение собственных частот резинометаллического виброизолятора в конечно-элементных программных комплексах // Сборник научных трудов Института строительства и архитектуры. – М., 2008. – С. 63–65.
8. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
9. Потураев В.Н. Резиновые и резинометаллические детали машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 298 с.
10. Ормонбеков Т.О., Бегалиев У.Т., Деров А.В. и др. Применение тонкослойных резинометаллических опор для сейсмозащиты зданий в условиях территории Кыргызской

Республики. – Бишкек: «Учкун», 2005. – 212 с.

11. Сергаева М.Ю. Обоснование работоспособности резинометаллических виброизоляторов систем виброзащиты авиационного оборудования: Дис.... канд. техн. наук. – Омск, 2005. – 163 с.
12. Сизов Д.К. Статика и динамика резинометаллического виброизолятора: Дис.... канд. техн. наук. – Москва, 2008. – 149 с.
13. Duishenaliev T.B., Askarbekov R.N. Calculation of deformation of rubber layer in rubber metal elements // Proceedings of 15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. – Jelgava, Latvia, 2016. – P. 1402–1410.
14. Zienkiewicz, O.C. The generalized finite element method-state of the art and future direction // Trans. ASME: J. Appl. Mech. – 1983. – No. 50. – P. 1210–1217.

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

УДК: 628.336.6:006.74(045)

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ БГУ С УЧЕТОМ ГРАФИКА НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЯ

А. Дж. Обозов, С.М. Насирдинова, А.Н. Салбаев

Кыргызский Государственный Технический Университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: obozov-a@mail.ru, sai-ra@mail.ru

В статье представлены результаты разработки технологической схемы непрерывного режима работы биогазовой установки с обоснованием структурной схемы управления и учетом графика нагрузки потребителя. Обоснование и практическая апробация предложенной технологии на основе созданной действующей демонстрационной БГУ.

Целью работы является обобщение опыта проектирования и эксплуатации биогазовых установок. В статье также представлен анализ производства биогаза на отходах животноводства, перспективы и проблемы развития биогаза в Кыргызстане. Для этой цели разработаны принципиально-технологическая схема переработки сырья и структурная схема управления биогазовой установки. По разработанным схемам реализовано практическое внедрение биогазовой установки.

Актуальность определена потребностью в использовании новых инновационных технологий получения энергии с использованием экологически чистых возобновляемых источников.

Ключевые слова: биогаз, биогазовая установка, схема управления, график нагрузки, органические отходы, реактор.

Глобальные проблемы охраны окружающей среды и сокращение запасов традиционных источников энергии, таких, как газ, нефть, уголь и т.д., подтолкнули человеческое общество к поиску новых экологически чистых источников энергии [1].

В этой связи в последние годы интенсивное развитие получило использование возобновляемых источников энергии. Освоение таких источников энергии стало одним из стратегических направлений развития энергетики многих стран мира. Данное направление определяет также перспективы устойчивого развития энергетики и экономики Кыргызстана [2].

Практика последних лет позволяет утверждать, что использование ВИЭ в значительной мере снижает выбросы парниковых газов (CO₂) в атмосферу и позволит в качестве топлива покрыть к 2030–2050 годам от 30 до 50 % энергетической потребности развитых стран [3].

Получение энергии из биомассы как одного из источников ВИЭ является весьма перспективным. В частности, переработка отходов животноводства без ущерба для экологии, использование этих переработанных отходов для удовлетворения потребностей сельского хозяйства в удобрениях, повышение урожайности, устранение загрязнений водных

бассейнов и атмосферы и получение дешевой энергии для бытовых нужд являются одним из актуальнейших направлений для Кыргызстана.

Сегодня развитие биотехнологии для получения энергии нашло наиболее широкое распространение в КНР, Бразилии, Швеции, Мексике и во многих развитых странах [4].

Кыргызстан также имеет достаточно большой потенциал для использования энергии биомассы, и в первую очередь это отходы животноводства, растительности и других материалов органического происхождения, из которых можно получить более 1,61 млрд. куб. м горючего биогаза в год [5; 6; 7; 10].

По данным исследований, проведенных учеными республики, переработка только отходов в животноводческих комплексах за счет БГУ позволит обеспечить 30% сельских жителей в бытовом газе, снизить выбросы парниковых газов в атмосферу, поднять урожайность полей на 15–20 %, за счет использования экологически чистых органических удобрений снизить потребление традиционного топлива [8].

В Кыргызстане накоплен определенный опыт проектирования и эксплуатации БГУ различных типов и мощностей [11].

В целом по республике в рамках международных проектов, осуществляемых при поддержке ПРООН, японской ассоциации JICA, проекта ARIS, а также ряда отечественных государственных и общественных организаций, осуществлено проектирование, строительство и практическая эксплуатация более 100 БГУ.

Следует отметить, что эти установки были использованы в основном для выработки биогаза, которым осуществлялось отопление помещений, приготовление пищи и подогрев воды. Эти установки, как правило, небольшой мощности и предназначены для автономных потребителей [9], не имеют системы управления и автоматики. Большинство из них используют периодический режим работы. Вопросы автоматизации технологического режима с целью повышения эффективности БГУ и ее КПД не рассматривались.

В данной статье представлены результаты исследований БГУ технологической *схемой непрерывного режима работы* с возможностью использования бросового отработанного тепла и получения электрической энергии для электроснабжения с использованием автономного блока бесперебойного питания.

Принципиальная технологическая схема биогазовой установки с непрерывной переработкой сырья приведена на рис. 1.

Работа установки осуществляется в следующей последовательности. Отходы животных предварительно собираются, очищаются от различных твердых примесей (мелкие камни, ветки деревьев, куски глины и т.д.) и загружаются в емкость 3. В данной емкости влажность сырья доводится до 90–95 % путем добавления теплой воды температурой 30–35 °C, путем нагретой предварительно за счет бросового отработанного сырья, тщательно перемешивается насосом – 2, а затем с его помощью готовое сырье перекачивается далее через трубопровод – 5 в метантенки – 4, 8. После заполнения метантенков – 4 до требуемого уровня, который контролируется уровнемером – 10, насос – 2 отключается. В процессе работы установки сырье в метантенках периодически перемешивается, в это время запорные вентили – 11 закрываются, и через трубопровод – 8 сырье в метантенках – 4 при помощи циркуляционного насоса – 9 перемешивается. Расположенные на дне метантенка – 4 электронагреватели нагревают температуру сырья до 37 °C, и далее температура поддерживается на этом уровне в течение всего периода брожения за счет системы управления. Перемешивание субстрата в метантенках – 4 выполняется автоматически. В

процессе эксплуатации БГУ необходимо контролировать концентрацию кислотности субстрата. Кислотность должна быть в пределах $pH =$ от 6,9 до 7,6. После заполнения биореактора жидкими отходами сероводород будет высвобожден в течение первых 5–7 дней. Затем наступает основной режим, при котором вырабатывается биогаз. При выделении

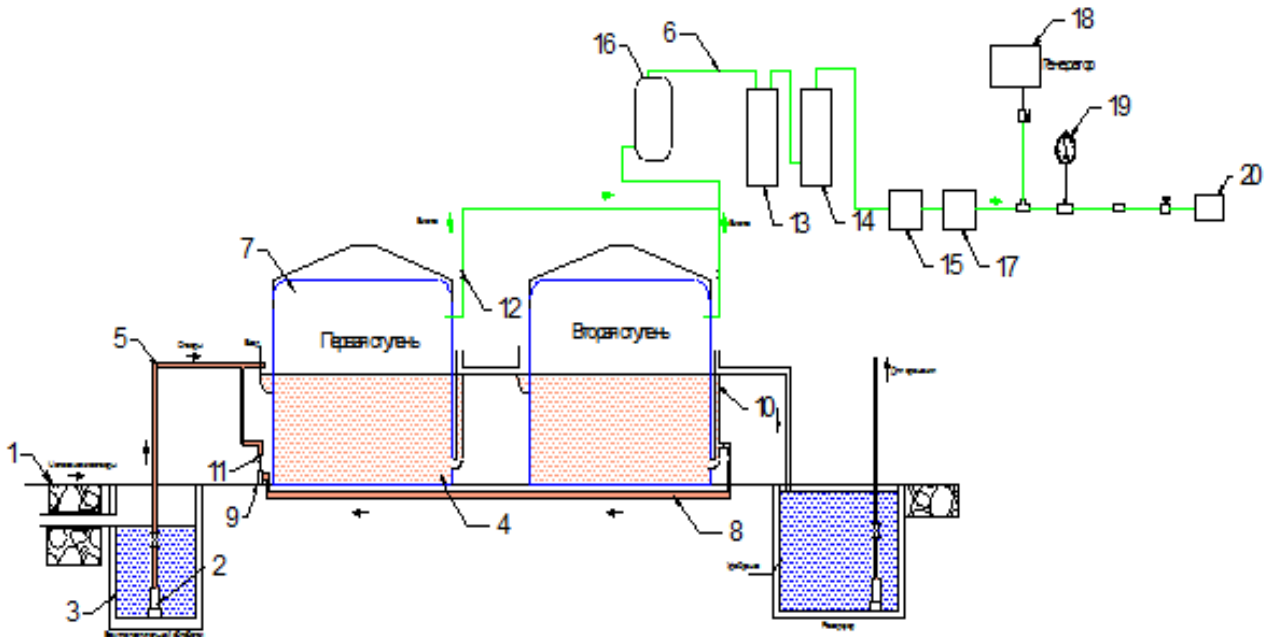


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема БГУ с непрерывным режимом переработки сырья:

1 – сырье; 2 – насос для загрузки сырья; 3 – загрузочная емкость; 4 – метантенки; 5 – трубопровод для загрузки сырья; 6 – газовые трубы; 7 – биогаз; 8 – трубопроводы для перемешивания сырья; 9 – перемешивающий насос; 10 – уровнемер; 11, 12 – запорные вентили; 13 – влагоотводчик; 14 – очиститель газа; 15 – компрессор; 16 – газгольдер; 17 – расходомер; 18 – электрогенератор; 19 – редуктор; 20 – потребитель

биогаза открываются запорные вентили – 12, и биогаз из метантенка – 4 через влагоочиститель – 13, очиститель газа – 14, компрессором – 15 подается в газгольдер – 16.

Газгольдер имеет максимальное давление в 20 атм. Компрессор нагнетает давление газа до – 15 атм. Предохранительный клапан – 21 газгольдера должен регулироваться на 20 атм. Биогаз через расходомер – 17 поступает к газотурбине генератора, после чего начинается функционирование электрогенератора – 18. Далее через редуктор – 19 биогаз поставляется потребителю – 20. Непрерывная загрузка емкости с суспензией происходит по мере высвобождения загрузочной емкости – 3. Для обеспечения непрерывного режима работы БГУ периодически через каждые 5–10 дней загружается свежее сырье и столько же выгружается в яму – 10, которое в последующем вывозится и используется как высокоэффективное органическое удобрение. Максимальная эффективность технологического процесса достигается, если 2/3 бака метантенка заполнено сырьем с влажностью 90–95 %. В течение всего цикла поддерживается температура в метантенке 35–37 °C⁰ (мезофильный режим), систематическое перемешивание сырья в метантенке и обеспечение работы установки без доступа кислорода (анаэробный процесс). Давление газа в биореакторе не должно превышать 0,4 атм. Данная синтезированная технологическая схема позволяет работать

системе в различных режимах: последовательный (общий), когда оба метантенка работают параллельно, одиночный, когда каждый может работать самостоятельно. В нашем случае представляет интерес работа системы в общем режиме, когда одновременно задействована вся общая мощность БГУ, работающая в непрерывном режиме. Схема перехода на непрерывный режим работы установки представлена на рис. 2.

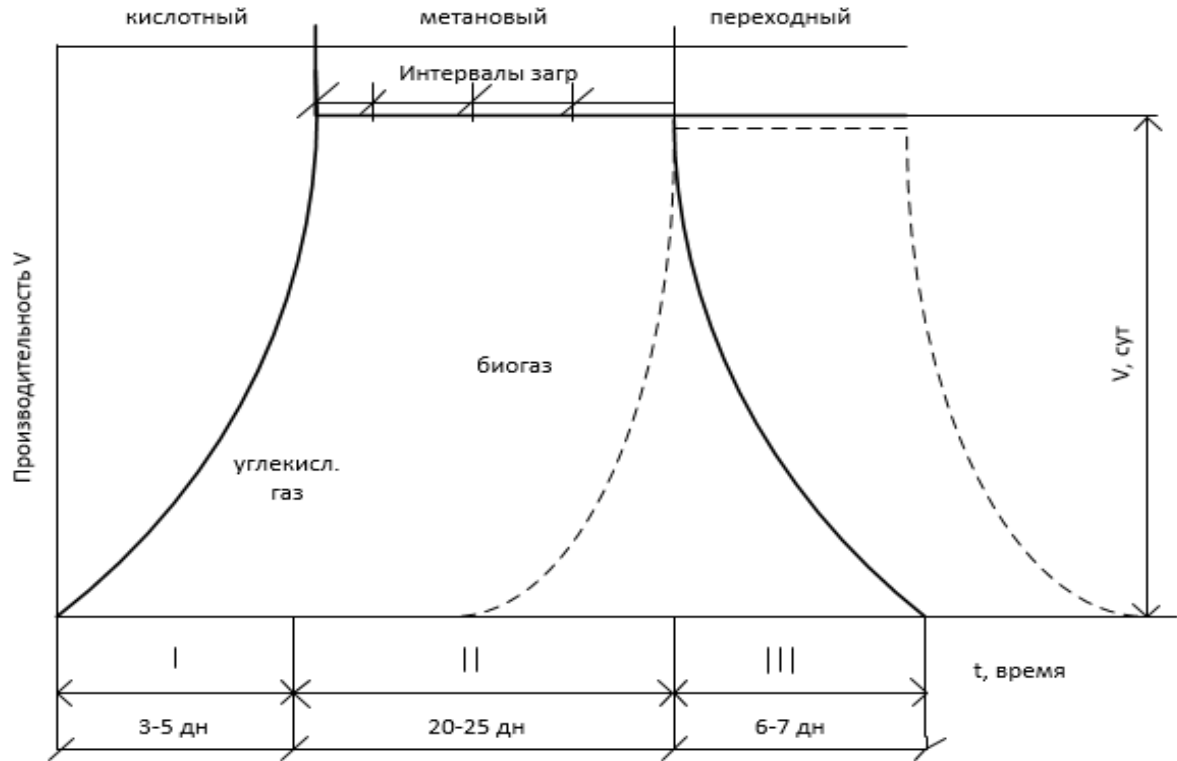


Рисунок 2 – Схема перехода на непрерывный режим работы установки

Как видно из представленной схемы, периодический режим работы метантенка совмещается, и в результате их совмещения появляется возможность перейти на непрерывный режим, при котором выход биогаза становится устойчивым и постоянным. Такое решение позволило убрать период перезагрузки метантенков и сократить активный период выхода биогаза, тем самым была увеличена его производительность порядка 20–30 %. Такое решение позволило также обеспечить бесперебойную выработку электрической энергии за счет установленного газогенератора и фактически 100 %-ю его загрузку. Весьма важным вопросом в надежном функционировании рассматриваемой системы является вопрос управления, который должен обеспечить не только логическую взаимосвязь работы ее элементов как единое целое, но и синхронизировать ее непосредственно с графиком нагрузки у потребителя. Как было показано ранее при описании технологической схемы установки, система представляет собой достаточно сложный объект, обеспечивающий одновременно работу многих элементов в определенной временной взаимосвязи. Для ее успешной работы необходимо осуществлять контроль и управление ее многими параметрами и в первую очередь температурного режима работы метантенка, производства электрической энергии, производительности компрессора и т.д. С учетом особенностей данной технологии была разработана *структурная схема управления* (рис. 3), связывающая

воедино работу всех ее элементов в реальном масштабе времени с графиком суточной нагрузки у потребителя.

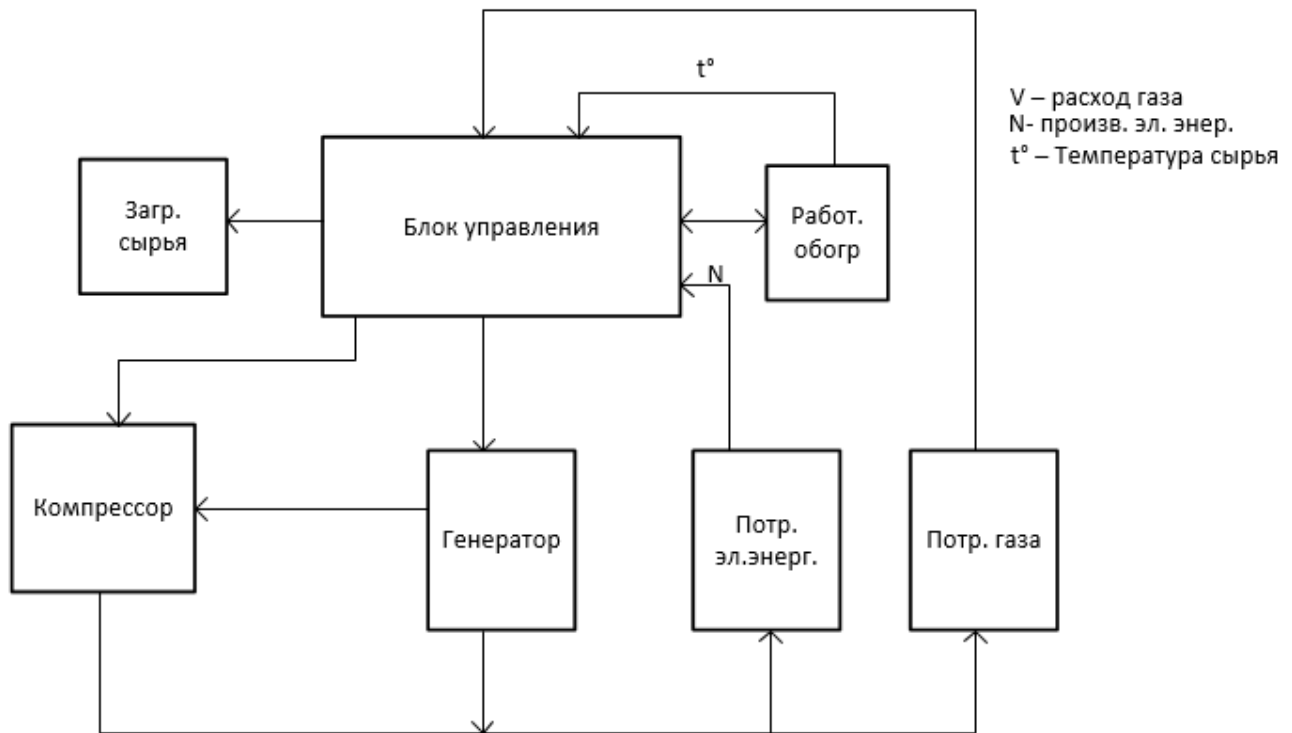


Рисунок 3 – Принципиальная структурная схема управления

Данная структурная схема управления позволяет осуществлять контроль влажности и температуры загрузки сырья, обеспечить непрерывный режим работы установки. Включение и отключение компрессора в зависимости от избыточного давления в метантенке и электрической нагрузки у потребителя. Контроль за температурным режимом осуществляется за счет температурных датчиков, по сигналу которых совершается управление нагревательными приборами. Работа любой генерирующей электрической системы происходит в такой взаимосвязи с потребной мощностью потребителя и в обязательном порядке. С учетом затрат на собственные нужды. Это в особенности важно для автономных систем, когда нет возможности использовать параллельное питание, как, например, сетевое. Во-вторых, в автономных системах в обязательном порядке необходимо закладывать избыток мощности с учетом расхода на собственные нужды, в противном случае не будет обеспечиваться основной принцип автономности. Как правило, при оценке потребной мощности на собственные нужды необходимо иметь график суточной нагрузки, построенный с учетом технологической схемы работы установки и временной нагрузки его элементов. Была разработана методика построения подобных графиков, отработаны его алгоритм и проведен практический расчет для демонстрационной версии. На рис. 4 приведен пример построения суточного графика нагрузки электроэнергии на собственные нужды с учетом предложенной технологической схемы и принятой схемой управления.

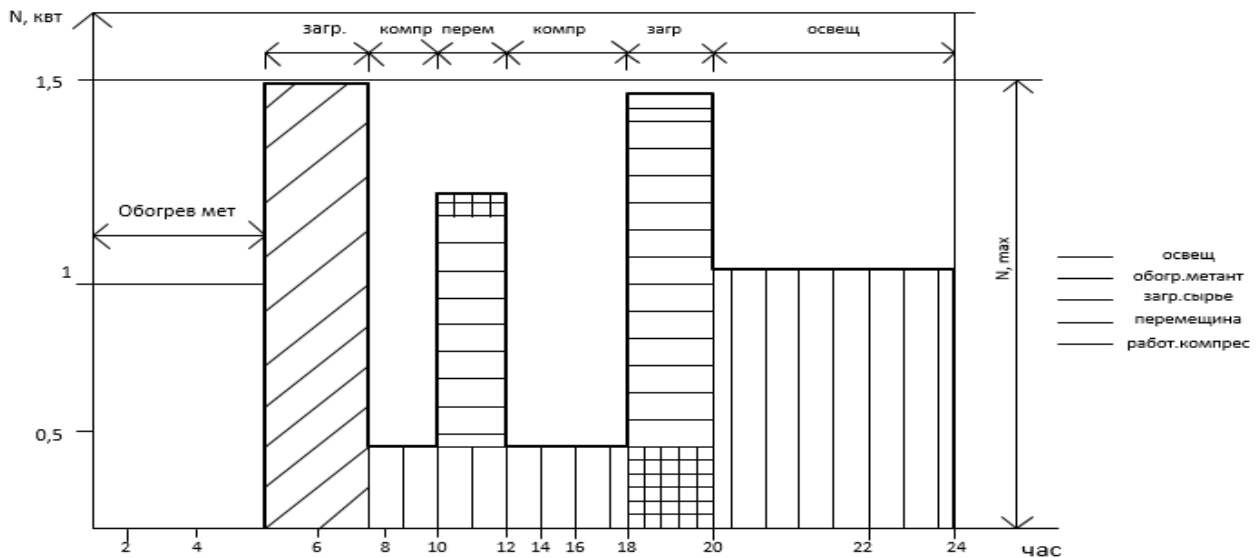


Рисунок 4 – График потребления электроэнергии на собственные нужды

Как видно из представленного графика, в схеме предусмотрены практически все технологические операции, предусмотренные работой установки (нагрев, освещение, перемешивание, загрузки, компрессор и т.д.). Следует обратить внимание, что построение подобных графиков должно быть в обязательном порядке обусловлено ограничением типовой нагрузки, определяемой рациональной в нижней мощности газогенератор. Другими словами, при расчете и проектировании системы необходимо уже заранее заложить процентное соотношение выработки электрической энергии для автономного потребителя и на собственные нужды. Так как это в конечном счете будет определять технико-экономическую привлекательность всего проекта. Таким образом, проведенные исследования позволили провести анализ сырьевых ресурсов органических отходов и сделать как качественную, так и количественную ее оценку. Проведенный обзор опыта проектирования и эксплуатации технологий БГУ показал, что в республике пока отсутствуют технологические схемы, имеющие возможность адаптироваться этим установкам в генерирующие станции как в традиционные электрические сети, а также автономное обеспечение потребителя электроэнергией.

В заключении следует отметить:

- Впервые разработана и предложена новая технологическая схема непрерывного режима работы, обеспечивающая возможность установки адаптироваться к традиционным электрическим сетям и автономным системам.
- Рассмотрена и предложена структурная схема управления установки с учетом разработанной непрерывной технологии взаимосвязи с графиком нагрузки потребителя.
- Результаты полученных в данном разделе работ практически позволяют адаптировать БГУ как один из источников выработки электроэнергии при создании комбинированных систем электроснабжения с адаптивными блоками бесперебойного питания при построении в будущем «умных микросетей» с использованием возобновляемых источников энергии.
- По разработанной новой технологической схеме и подробно изложенным техническим (схемным) решениям в с. Нурманбет Ысык-Атинского района была построена демонстрационная биогазовая установка, общий вид приведен на рис. 5.



Рисунок 5 – Демонстрационная биогазовая энергетическая установка. Ысык-Атинский район, село Нурманбет

Таким образом, доказана возможность практического использования предложенной новой технологической схемы непрерывного режима работы и разработанных технических решений для проектирования БГУ.

Литература

1. Kerr R. A. Sun's role in warming is discounted \ Science, 1995. Vol. 268. – P. 28–29 .
2. Обозов В.Д., Исаев Р.Э. Техничко-экономические, экологические и научно-технологические аспекты использования ВИЭ в КР – III Международный научно-методический семинар экспертов по ВИЭ. Беларусь, г. Минск. 2016 г.
3. <https://renen.ru/dolya-vie-v-vyrobote-elektroenergii-v-es-dostignet-60-k-2030-godu/>
4. Barbara Rischkowsky & Dafydd Pilling. The State of the World's Animal Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome. <http://www.fao.org/3/a1250r/a1250r.pdf> Состояние всемирных генетических ресурсов животных в сфере продовольствия и сельского хозяйства /ФАО, 2010. ВИЖРАСХН, 2010. Москва /Перевод с англ. ФАО. 2007.
5. https://www.unescap.org/sites/default/files/-C_Kyrgyz_Orozaliev_R.pdf
6. Обозов А.Дж., Ботпаев Р.М. Возобновляемые источники энергии. – Б.: КГТУ, 2010. – 270 с.
7. Обозов А.Д., Асанкулова А., Нышанов З.А. Получение горючего газа на биогазовых установках. Труды международной конференции, г.Актау, Казахстан, 2010.
8. https://www.unescap.org/sites/default/files/-C_Kyrgyz_Orozaliev_R.pdf
9. Обозов А.Д., Асанкулова А. Биогазовые технологии – новые возможности для энергоснабжения сельских регионов. Материалы 4-й Казахстанской международной конференции по энергетике, г.Алматы, 2005.
10. Обозов А.Д., Асанкулова А. Анализ процесса получения биогаза. Международный научный журнал НОТ-. №1.– 2009г. –Бишкек, Кыргызстан.

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.013

О.И. Ширяева

Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК,

Алматы, Казахстан

E-mail: oshiryayeva@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ

В данной статье сформулированы теоретические основы для синтеза сложных систем управления с использованием алгоритмов искусственных иммунных систем управления сложными объектами: канонического алгоритма клональной селекции (CLONALG), алгоритма негативной селекции (NSA). В качестве сложной системы представлен многомерный многосвязный объект, для которого синтезировано оптимальное управление на основе алгоритмов искусственных иммунных систем. Поставлена задача синтеза оптимального управления сложным объектом, для решения которой сформированы выражения типовых регуляторов и квадратичных критериев качества. С целью минимизации выбранных критериев качества применены поисковые алгоритмы CLONALG и NSA. Построены теоретические основы синтеза сложной системы, включающей шаги синтеза оптимального управления для изолированных подсистем сложной системы, включение взаимосвязей и применения процедуры развязывания для учёта данных взаимосвязей.

Ключевые слова: искусственная иммунная система, синтез оптимального управления, сложная система, алгоритм клональной селекции, алгоритм негативной селекции.

Введение

Проблема синтеза управления сложными технологическими процессами является актуальной задачей в теории управления. Перспективным направлением при проектировании подобных сложных (ММО-систем) является применение биоинспирированных алгоритмов, эффективно использующихся при решении оптимизационных задач [1].

В настоящее время разработано большое количество биоинспирированных методов для синтеза оптимального управления для одномерных (SISO) систем [2,3], в том числе таких, как искусственная иммунная система (AIS) [4]. Алгоритмы, сформированные на основе функционирования искусственных иммунных систем, хорошо зарекомендовали себя при решении задач нахождения оптимальных решений, что эффективно используется для синтеза оптимального управления одномерных систем [5].

В данной статье сформулированы теоретические основы для синтеза сложных систем управления с использованием алгоритмов искусственной иммунной системы: алгоритма CLONALG, алгоритма NSA. Алгоритм клональной селекции основан на механизмах иммунного ответа при внедрении в организм чужеродных антигенов. При этом проводится

процесс распознавания антителами чужеродных антигенов [6]. Для решения задач управления, с целью обнаружения локальных минимумов оптимизационной задачи, разработано программное обеспечение алгоритма негативной селекции, NSA. В ходе реализации программного обеспечения сделан вывод, что данный механизм позволяет распознать и проигнорировать нежелательные экстремумы при поиске оптимальных значений критериев качеств. Методом исключения найденных локальных минимумов задача поиска глобального минимума на основе модифицированного алгоритма решается эффективнее.

Механизм негативной селекции, свойственный иммунной системе, заключается в том, чтобы различать клетки организма от чужеродных клеток. Базовый алгоритм на основе теории отрицательной селекции, созданный Форрестом [7], включает механизм вычисления допустимых отклонений от стандартного функционирования системы. В алгоритме отрицательного отбора используется процесс генерирования отрицательных положений системы. Начальная популяция генерируется случайным образом, но в дальнейшем отрицательные положения системы устраняются [8,9]. Результатом всего этого процесса являются обнаруженные аномалии, и это представляет интерес в рамках обнаружения локальных минимумов.

В биологических системах процесс негативной селекции используется перед клональной селекцией. В данной работе принцип негативной селекции используется для формирования алгоритма начального нахождения оптимумов после алгоритма клональной селекции нахождения глобального минимума.

Алгоритм CLONALG представляет интерес в качестве развития его на класс ММО-систем управления. Целью данной статьи является формирование теоретических основ синтеза оптимального управления на основе алгоритма клональной селекции CLONALG искусственных иммунных систем для сложной многомерной и многосвязной системы управления. Пусть математическая модель, описывающая сложную систему управления, имеет вид:

$$\begin{pmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ \dots \\ y_n(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \dots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \dots & G_{2n}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{n1}(s) & G_{n2}(s) & \dots & G_{nn}(s) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ \dots \\ u_n(s) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

где $G_{ij}, i = j$ – передаточные функции подсистем;

$G_{ij}, i \neq j$ – передаточные функции взаимосвязей между подсистемами.

1. Постановка задачи

Необходимо синтезировать сложную систему управления (1) с целью достижения заданных значений выходных сигналов на основе алгоритмов AIS.

Синтез системы управления определяется нахождением управляющих воздействий, для которых выбран PI-закон регулирования:

$$u_i(s) = P_i \cdot e_i(s) + I_i \cdot \frac{1}{s} \cdot e_i(s), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $e_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ – ошибки между заданными, $r_i(t)$, и выходными сигналами, $y_i(t)$.

Передаточные функции PI-регуляторов (2) имеют вид [10]:

$$C_{Pli}(s) = P_i + I_i \frac{1}{s}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

Настройка регуляторов выполняется с целью минимизации интегральных квадратичных критериев:

$$ISE_i = \int_{t=0}^{t_1} e_i^2(t) dt, \quad i = \overline{1, n} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Критерии качества (4) соответствуют локальным регуляторам, u_i , $i = \overline{1, n}$, которые стоят в отдельных контурах [10].

2. Решение задачи

Решение поставленной задачи осуществляется на основе сформированных шагов, включающих алгоритмы AIS:

Шаг 1. Ввод в рассмотрение изолированные контура системы без взаимосвязей:

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ \dots \\ y_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{22}(s) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & G_{nn}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ \dots \\ u_n(s) \end{bmatrix}.$$

Шаг 2. Решение задачи синтеза типовых регуляторов изолированных подсистем без взаимосвязей, регуляторы AIS.

Шаг 3. Подключение взаимосвязей сложной системы.

Шаг 4. Реализация процедуры развязывания в развязывающем устройстве для компенсации влияния взаимосвязей объекта управления (рис. 1).

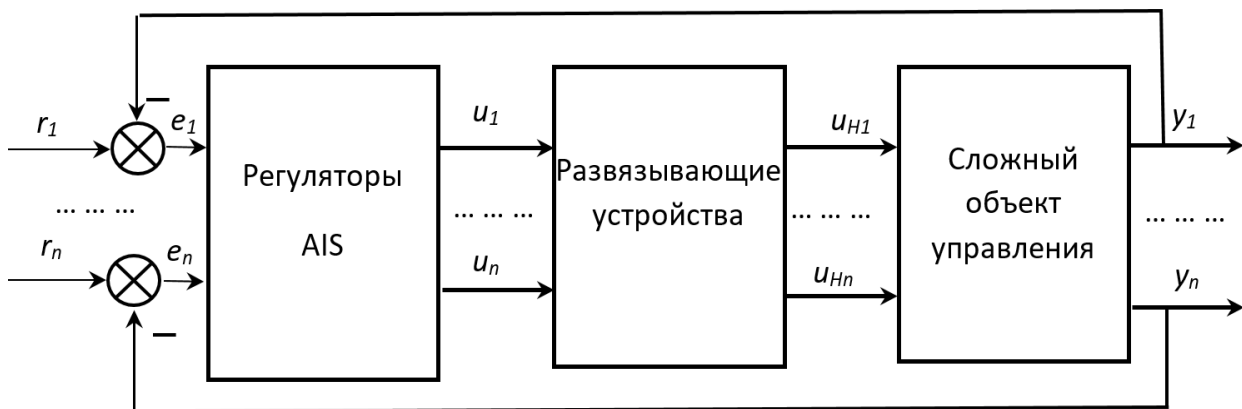


Рисунок 1 – Сложная система управления

Для расчёта параметров регуляторов, обеспечивающих минимум критериям (4), используются алгоритмы искусственных иммунных систем [10]: AIS-NSA, AIS-CLONALG (рис. 2).

В соответствии со свойствами систем автоматического управления и системным требованиям к PI-регуляторам сформулируем ограничения на решения (4):

$$P_i > 0, \quad I_i > 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

при этом имеют место ограничения на область изменения параметров регуляторов для обеспечения устойчивости системы.

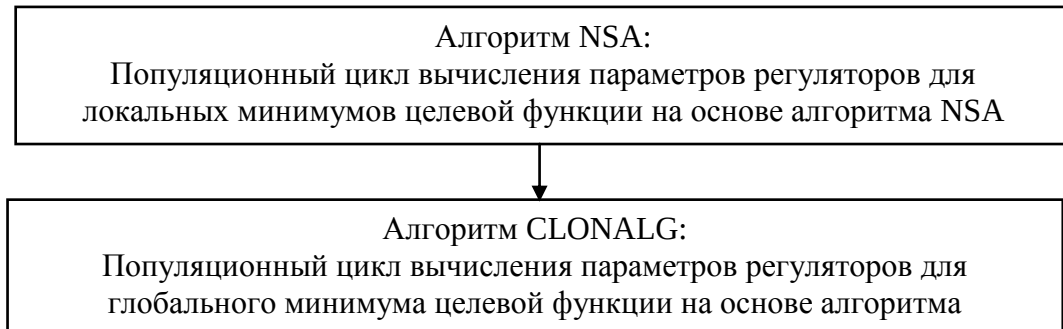


Рисунок 2 – Алгоритмы AIS

Для поиска локальных минимумов и определения диапазона нахождения глобального минимума критериев качеств реализуется алгоритм AIS-NSA – алгоритм негативной селекции. На основе представленного алгоритма для критериев качества (4) была реализована технология негативной селекции построения интеллектуальной системы управления в среде MATLAB.

Концептуальной основой применения алгоритма CLONALG для решения синтеза типовых регуляторов для МИМО-систем является формирование понятий, соответствующих теории иммунных систем и алгоритму клональной селекции. В контексте постановки задачи для системы управления (1) обобщённая форма антител соответствует вектору аргументов:

$$Ab = (y_i, u_i, i = \overline{1, n}), \quad (6)$$

и представляет собой набор решений системы.

В качестве антигенов используются критерии качества (4):

$$Ag = f(e_i, u_i, i = \overline{1, n}). \quad (7)$$

В соответствии с полученными выражениями критериев качества (4) и (7) подмножество антигенов тождественно выражению, включающему параметры PI-регуляторов (3), $(P_i, I_i, i = \overline{1, n})$:

$$Ag = f(P_i, I_i, u_i, P_i, I_i, i = \overline{1, n}). \quad (8)$$

Формально алгоритм клональной селекции можно представить в виде [10]:

$$CLONALG = (Ag, Ab, G, S, C, M, f, d, t),$$

где Ag – подмножество антигенов;

Ab – популяция антител;

G – представление пространства;

S – оператор селекции;

C – оператор клонирования;

M – оператор мутации;
 f – критерий качества;
 d – количество антител, подлежащих замене новыми;
 t – номер поколения.

На рис. 3 представлена схема алгоритма клональной селекции, AIS-CLONALG, который используется для синтеза сложной системы.

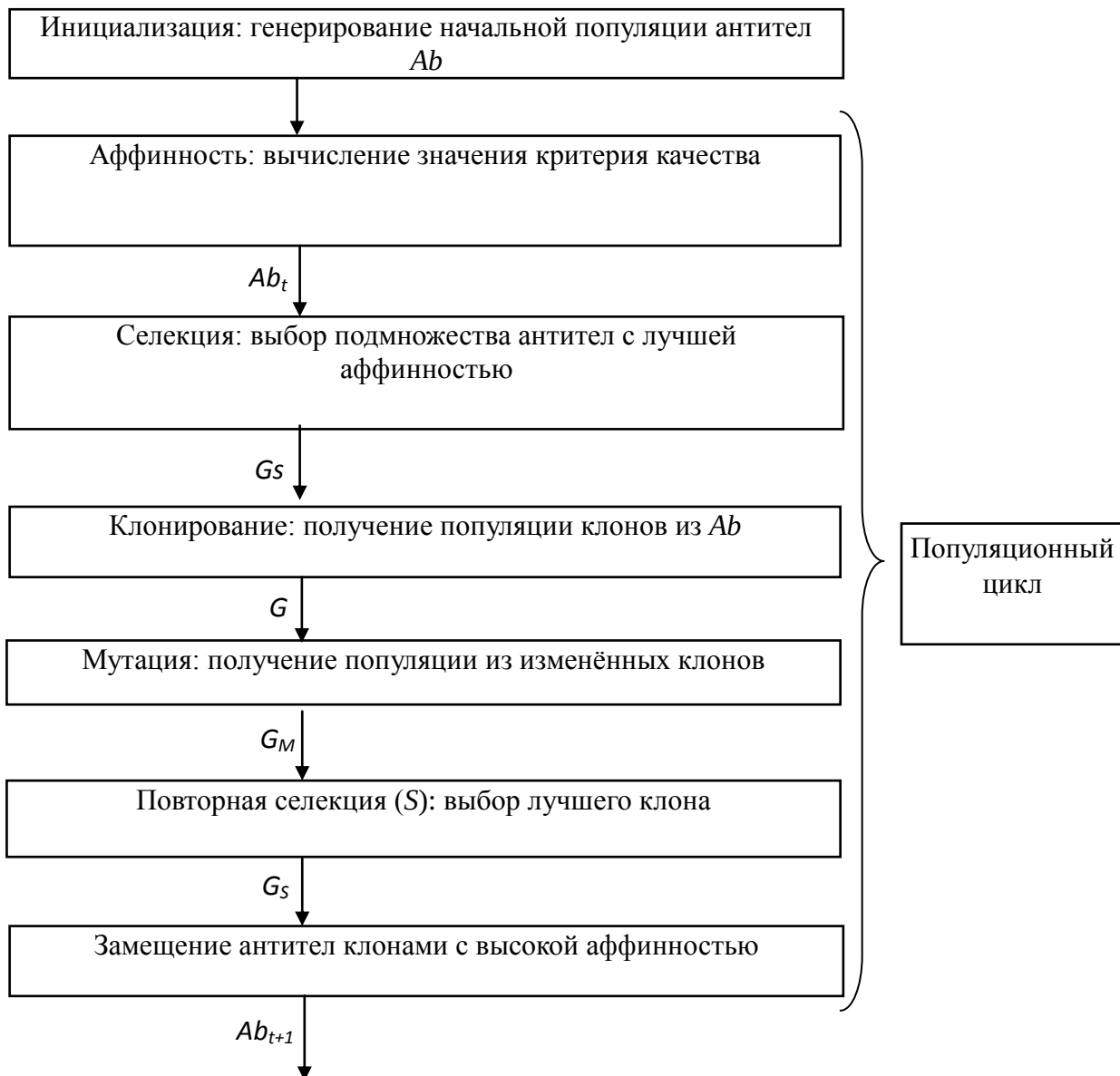


Рисунок 3 – Алгоритм клональной селекции для синтеза оптимального регулятора

В ходе определения глобального минимального значения оптимизационной задачи сложной системы управления и реализации алгоритма AIS-NSA выполнены следующие шаги алгоритма:

Шаг 1. Вероятностное формирование популяции.

Шаг 2. Вычисление аффинности каждого члена популяции с целевой функцией.

Шаг 3. Выбор членов популяции с наихудшими характеристиками (негативных).
Нахождение локальных минимумов.

Шаг 4. Проверка полученного решения на соответствие выражению (4).

Представленные шаги алгоритма обеспечивают решение задачи оптимального управления сложным объектом.

Заключение

В данной работе приведены результаты формирования теоретических основ построения алгоритмов решения задач оптимального управления сложными системами.

В частности, синтезированы оптимальные PI-регуляторы для подсистем сложной системы управления на основе алгоритма клональной селекции (CLONALG) искусственных иммунных систем (AIS). В результате реализации процедуры синтеза оптимального управления получены коэффициенты типовых PI-регуляторов изолированных подсистем. Среди шагов синтеза системы сформулирован этап реализации процедуры развязывания для решения задачи влияния взаимосвязей.

Исследования проводятся по гранту №AP09258508 КН МОН РК «Разработка интеллектуальной технологии управления сложными объектами на основе унифицированной искусственной иммунной системы для промышленной автоматизации с использованием современной микропроцессорной техники» (2021-2023 гг.).

Литература

1. Бобиков А.И. Настройка весовых матриц ЗСУР регулятора с помощью биоинспирированных алгоритмов оптимизации // Вестник РГРТУ. – 2016. – №55. – С. 77– 83.
2. Bo X, Wen-Jing G. Innovative Computational Intelligence: A Rough Guide to 134 Clever Algorithms. – Springer, 2014. – 469 p.
3. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: МГТУ, 2017. – 446 с.
4. Кушнир Н.В., Кушнир А.В., Анацкая Е.В., Катышева П.А., Устинов. Искусственные иммунные системы: обзор и современное состояние // Научные труды КубГТУ. – 2015. – №12. – 10 с.
5. Wang J., Song N., Jiang E., Xu D., Deng W., Mao L. The Application of the Particle Swarm Algorithm to Optimize PID Controller in the Automatic Voltage Regulation System. – Springer Singapore: Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles and Their Integration, 2017. – P. 529– 536.
6. Ali M., Koh S.P., Chong K.H. Design a PID Controller of BLDC Motor by Using Hybrid Genetic-Immune // Modern Applied Science. – 2011. – Vol. 5. – No.1 – P. 74– 85.
7. Forrest S. Principles of a Computer Immune System // Proceedings of the Second New Security Paradigms Workshop. – 1997. – P. 75– 82.
8. Ayara M., Timmis J., Lemos R., Castro L., Duncan R. Negative Selection: How to Generate Detectors // UK: In: Proceedings of the 1st International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS). – 2002. – Vol.1. – P. 89– 98.

9. Marciniak J., Wawryn K. An Artificial Immune Negative Selection Algorithm to Control Water Temperature in the Outlet of the Chamber // Poland: International conference on signals and electronic systems (ICSES). – 2018. – P. 236– 241.
10. Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Реализация SMART-технологии построения оптимальных систем на основе модифицированных алгоритмов // – Харків: Вісник Національного технічного університету. – 2020. – № 1 (3). – С.41– 49.

УДК 004(075.8)

Г.М. Адиева

Ошский технологический университет им.акад. М.Адышева, Ош, Кыргызстан

E-mail: gulzinaadieva@gmail.com

АНАЛИЗ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА ГОРОДА ОШ

В работе дается обзор транспортной сети города Ош, рассмотрение проблем пробок на дорогах и пути их решения. Описаны проблемы, связанные с обеспечением транспортного обслуживания населения и организацией городского движения.

Ключевые слова: транспортная система, пассажирский транспорт, автомобилизация, пропускная способность, улично-дорожная сеть.

Введение. На протяжении нескольких лет в городе Ош стремительно увеличилось количество легковых и других видов автомобилей. В настоящее время приобрела особую актуальность проблема организации дорожного движения. Возросшее количество автотранспортных средств, принимая во внимание недостаточное развитие городских дорог и дорожной инфраструктуры, сказывается на регулярном образовании транспортных заторов, которые увеличивают вероятность ДТП, приводят к снижению скорости сообщения и увеличению интервалов движения пассажирского транспорта, особенно в часы пик.

Пассажирский транспорт является составной частью транспортной инфраструктуры как города, так и региона. Его слаженное, устойчивое и эффективное функционирование является необходимым условием повышения уровня жизни города [1]. Основная задача транспорта заключается в экономии времени пассажиров, затрачиваемого на преодоление расстояния между пространственно-разобщенными элементами города [2]. Общественный транспорт на данный момент служит главным инструментом, позволяющим обеспечить транспортное обслуживание местного населения и найти компромисс между инфраструктурными ограничениями городской территории и потребностями жителей в транспортных перевозках [3]. Общим направлением развития городского транспорта является стремление обеспечить высокую степень комфорта пассажирам в сочетании с необходимостью обеспечить конкурентоспособность транспорта и транспортных предприятий.

Рассматривая концепцию развития городского транспорта, в первую очередь нужно выделить проблему качества обслуживания пассажиров. Для того, чтобы общественный транспорт использовался чаще и более качественно, он не должен утратить свои главные преимущества: скорость, комфорт, доступность. В этом заключается суть проблемы качества обслуживания пассажиров городским транспортом. Эта проблема имеет взаимосвязь между качеством обслуживания пассажиров и стоимостью проезда.

Внутренний строй населения города в 2019 году составил 299,5 тысячи человек. По оценкам экспертов, более половины всего трафика общественного транспорта связаны с образованием и трудовой деятельностью. Трудоспособное население составляет около 56%. Объекты, связанные с пассажирами, – жилье, места работы, учебы, культурно-бытовые. Их «вместимость» и расположение – важная составляющая при анализе города с точки зрения создания системы общественного транспорта. Основными объектами в структуре населения

города Ош являются образовательные учреждения (3 учреждения начального профессионального образования, 29 учреждений среднего профессионального образования и 5 вузов) и учреждения занятости.

В основном все дороги города Ош находятся на обслуживании муниципального предприятия «Ошские городские дороги» и предприятия ДЭП-21, относящегося к Министерству транспорта, архитектуры, строительства и коммуникаций Кыргызской Республики (рис. 1). В ходе расширения городских границ в 2003 и 2013 годах территория города была увеличена, но не все дороги были переведены под ведомство города.

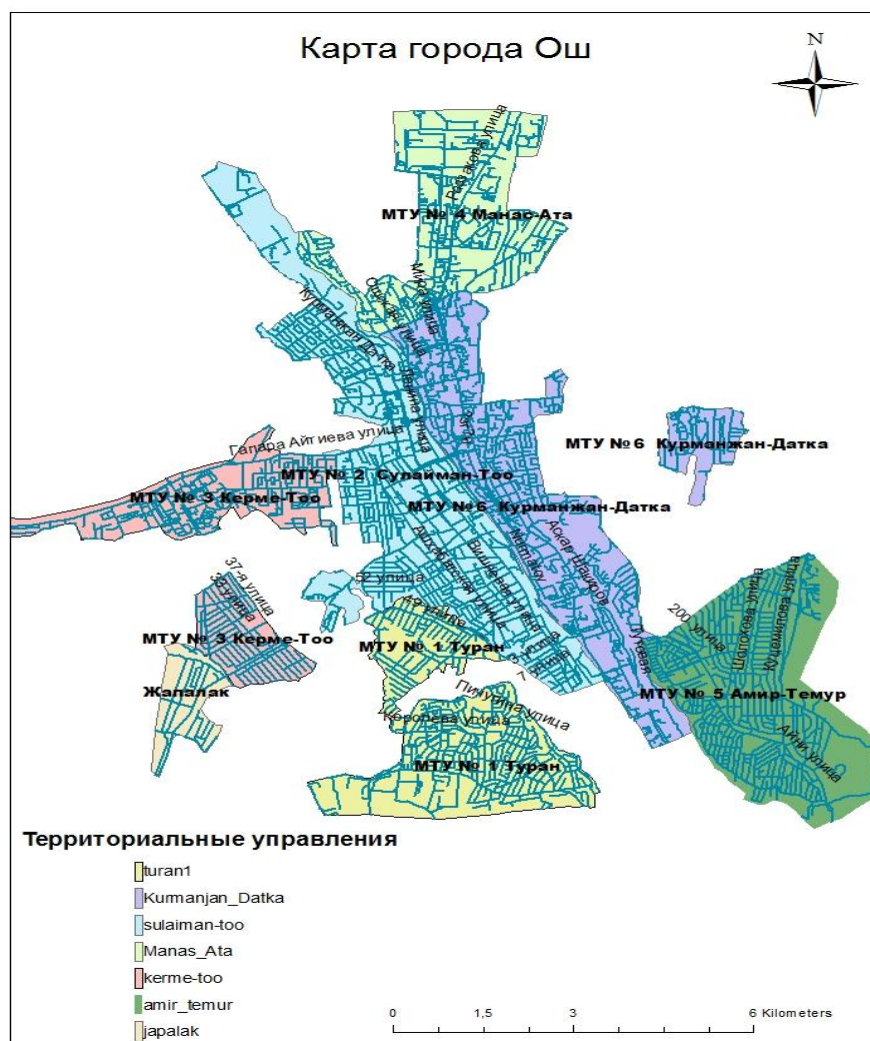


Рисунок 1 – Территориальные управления города Ош

Город Ош разделен на 7 территориальных советов. Полная длина дорог в городе Ош составляет 513,3 км, из них: с асфальтобетонным покрытием – 313 км, гравийным – 200,3 км. Основу транспортной системы любого населенного пункта, в том числе и такого крупного, как Ош, составляет улично-дорожная сеть. На рис. 2 показаны городские и пригородные дороги города, обслуживаемые Министерством транспорта, архитектуры, строительства и коммуникаций Кыргызской Республики и другими государственными ведомствами.

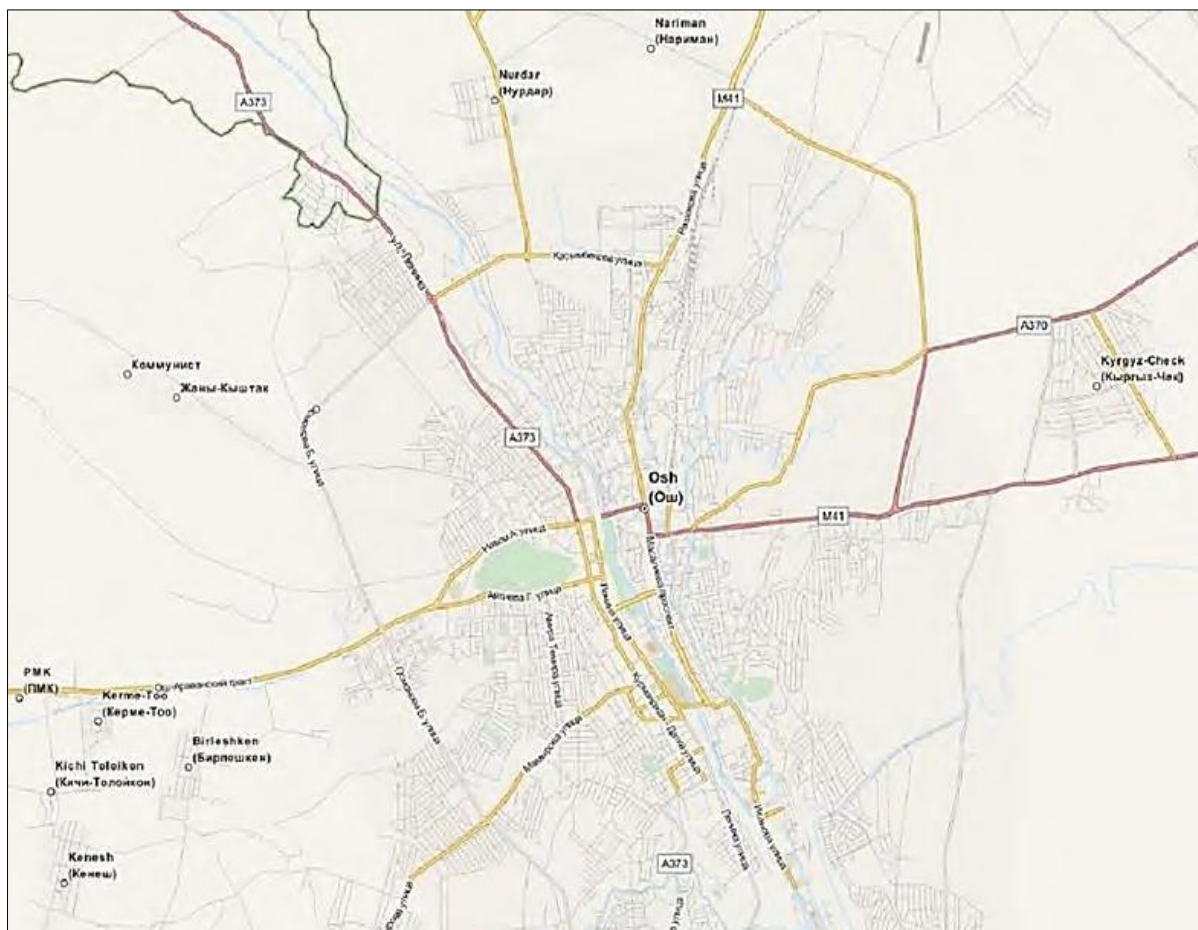


Рисунок 2 – Дорожная сеть г.Ош

Дорожная сеть города состоит из пяти радиально-магистральных городских дорог, которые связывают центр города с международными и местными дорогами. Они являются подъездным сектором от автодороги ОСИ (Ош – Сары-Таш –Иркештам) к городу, улица Масалиева связана с дорогой М14 (Ош – Кара-Суйский базар), улица Курманжан-Датки соединена с улицей А373, улицы Алишера Навои и Гапара Айтиева с улицей Кукум-Бий, улица Ноокатская с дорогой ОБИ (Ош – Баткен –Исфана). Подъездной сектор дороги ОСИ смыкается с улицей Масалиева (основная северо-южная ось), а улица Масалиева находится в восточной части центра города (по правому берегу) реки Ак-Буура. Улица Курманжан-Датки расположена в центре города параллельно с улицей Масалиева, а улица Ленина связывается с северной частью дороги А373. Ноокатская улица соединяется с дорогой ОБИ, а улицы Алишера Навои и Гапара Айтиева с улицей Кукум-Бий, обе магистральные дороги являются важными подъездными путями по левую сторону реки через мосты улиц Навои, Абдыкадырова и Нурматова. Улица Осмонова и северный обходной путь формируются на кольцевой дороге в северной части, а кольцевая дорога распределяет функции втекания и вытекания движения в восточной и западной частях города.

Исследование и сбор информации о состоянии дорожного транспорта в городе Ош, проведенные Японским агентством международного сотрудничества JICA, выявили ряд проблем, которые необходимо урегулировать [4]:

- пересечение улиц Масалиева и Алишера Навои имеет высокую интенсивность автодвижения на 3,834 PCU во время утреннего часа пик;
- длина автомобильной очереди во время утренних часов пик доходит от 100 до 300

метров;

- Участки между регулируемыми пересечениями улиц Масалиева и Алишера Навои и улицы Масалиева и дороги ОСИ показывают низкую скорость движения – 8 км/ч и 10 км/ч соответственно во время вечернего часа пик.

Предполагается, что причиной уменьшения движения является беспорядочная парковка машин внутри и вокруг перекрестков, на обочинах, остановка маршрутов и такси вблизи перекрестков, неподобающие геометрические условия, такие, как угловые срезы и распределение на полосы. Такие перегруженные перекрестки наблюдались на улицах Курманжан-Датки и Ленина.

Час пик в вечернее время был определен в промежутке с 18.00 по 19.00. Большинство заторов на кольцевых перекрестках были в северном квадрате – приведенная интенсивность 1,768 легковых автомобилей/час, которая характеризует движение на данном перекрестке. Основными точками въезда являются ул. Осмонова (юг) и ул. Подгорная, в то же время основной точкой выезда является дорога Ош – Араван. Пропускная способность на всех перекрестках достаточно высокая, по направлению с ул. Подгорная на дорогу Ош–Араван самая высокая интенсивность движения[4].

В городе Ош сформировался крупный транспортный узел, в котором функционируют все основные виды транспорта, включая систему городского пассажирского транспорта. На балансе муниципального предприятия «Троллейбусное управление» содержится 31 троллейбус, из них 23 марки ТролЗа-5275.03 «Оптима», вмещают 100 человек, сидячих мест – 27, 8 марок ЗИУ-682ГО, вмещают 100 человек, количество сидячих мест 30. Ежедневно выходят на маршруты города троллейбусы по двум линиям (№1, №2). На балансе Ошского городского муниципального автотранспортного предприятия функционируют 30 автобусов средней вместимости производства КНР, которые курсируют по двум маршрутам (№112, №113). Также к маршрутам города подключены более чем 20 обществ с ограниченной ответственностью. Количество микроавтобусов, курсирующих по 52 маршрутам, превышает 1000, принадлежащих Агентству пассажирских перевозок. Микроавтобусы обслуживают жителей города, включая отдаленные новостройки и жилые массивы, где из-за специфических условий эксплуатация автобусов и троллейбусов невозможна.

В настоящее время тариф на перевозку пассажиров в городе Ош на транспорте, осуществляющем перевозку пассажиров, составляет 10 сомов (автобус, микроавтобусы).

Кроме автобусных перевозок, в городе осуществляются и троллейбусные перевозки, которые выполняет муниципальное предприятие «Троллейбусное управление». Троллейбус является не только экономичным и социально-значимым, но и экологически чистым видом транспорта, что особенно важно в современных условиях автомобилизации городов. Стоимость проезда на троллейбусе составляет 6 сомов. В настоящее время запущена система электронного билетирования. Также существует бесплатный проезд на общественном транспорте для льготных категорий населения, городским кенешом определено 8 льготных категорий граждан. Для компенсации льготного проезда мэрия города выделяет субсидии в Ошское троллейбусное управление.

В таблице 1 представлены основные характеристики городской маршрутной сети и количественный состав транспортных средств, осуществляющих перевозки пассажиров на маршрутах общего пользования.

Таблица 1. Характеристика маршрутной сети города Ош на 2020 год

Показатель по видам транспортных средств	2020г.
Количество городских маршрутов общего пользования	1061
автобусы	30
троллейбусы	31
микроавтобусы	1000

В настоящее время городскую маршрутную сеть обслуживают (рис. 3):

- 31 троллейбус – это 3 % от общего количества транспортных средств;
- 30 автобусов, являющихся муниципальным транспортным средством, выполняющим перевозку, составляют 3 % от общего количества транспортных средств;
- 1000 микроавтобусов являются перевозки на коммерческой основе – это 94 % от общего количества транспортных средств, осуществляющих пассажирские перевозки в городе Ош.



Рисунок 3 – Соотношение транспортных средств по видам перевозок

Объем перевезенных пассажиров за 2019 год составил 29260,4 тыс. пассажиров, из них: автобусом – 4245,0 тыс. пасс. (13% от общего количества), троллейбусом – 4332,0 тыс. пасс. (13% от общего количества), микроавтобусом – 24503,2 тыс. пасс. (74% от общего количества) (рис. 4) [5].

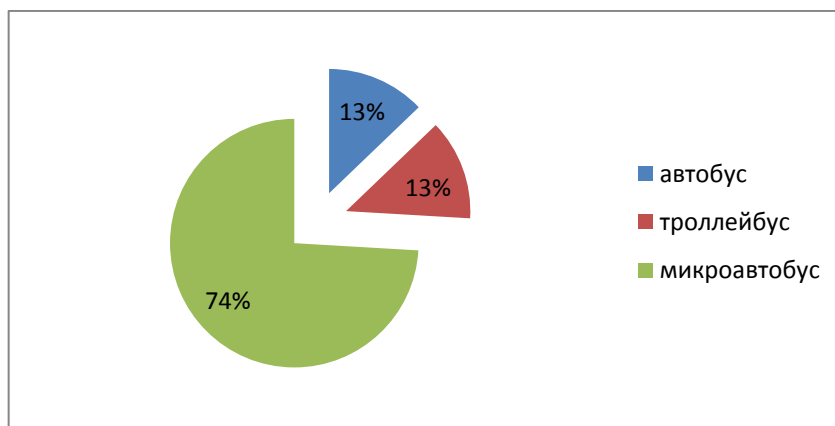


Рисунок 4 – Количество пассажиров, перевезенных общественным транспортом, %

Из таблицы 1, 2 видно, что основная нагрузка по перевозке пассажиров во

внутригородском сообщении лежит на микроавтобусах. О чем также свидетельствуют рисунки 4 и 5, характеризующие процентное соотношение транспортного обслуживания населения города Ош.

При этом не обеспечиваются:

- минимальный уровень комфортности поездок пассажиров;
- условия соблюдения безопасности при перевозках.

В 2017 году частично обновили муниципальные автобусы и троллейбусы, но, к сожалению, данного количества недостаточно для обеспечения города транспортом. Мэрия города планирует закупить к 2025 году еще 180 ед. автобусов, 200 ед. троллейбусов. В городе Ош есть пригородные районы, новостройки, куда автобусы просто не доезжают, и их обслуживают лишь маршрутные такси. Дороги в новостройках совершенно не приспособлены для курирования автобусов. Поэтому полностью отказаться от услуг частных микроавтобусов в Оше пока не готовы.

В первую очередь городским властям нужно пересмотреть и обновить план-схему маршрутных сетей. Затем добавить муниципальные автобусы, троллейбусы и микроавтобусы.

Выводы. Сегодня можно выделить следующие основные проблемы в транспортной системе города Ош:

- в связи с увеличением количества микроавтобусов общее количество регулярных маршрутов в городе значительно увеличилось, что привело к чрезмерному дублированию маршрутов;
- увеличение количества маршрутов привело к снижению пассажиропотока на каждом из них, что в свою очередь должно привести к снижению эффективности использования подвижного состава, а также уменьшению количества подвижного состава на маршрутах;
- из-за этих и ряда других факторов в системе общественного транспорта структура пропускной способности пассажирской системы не соответствует объему пассажиропотока на маршрутах и наоборот;
- увеличение количества маршруток обострит проблему потери пропускной способности транспортной системы в Оше;
- остановочные пункты общественного транспорта очень часто блокируются неправильно припаркованными автомобилями, что в свою очередь приводит к перегрузке многих остановок и обостряет проблему безопасности дорожного движения;
- неправильно припаркованные автомобили часто препятствуют проезду общественного транспорта, в первую очередь троллейбусов.

В связи с этим нужно предпринять ряд мер по регулированию и надзору за деятельностью общественного транспорта:

- обновить и увеличить автобусные и троллейбусные парки, чтобы сократить количество микроавтобусов;
- упорядочить взаимоотношения с перевозчиками, обеспечить соблюдение ими правил перевозок и правил дорожного движения.
- изменение структуры общественного транспорта с обновлением и совершенствованием парка подвижного состава пассажирского транспорта общего пользования;
- оптимизация маршрутной сети пассажирского транспорта общего пользования;
- совершенствование организации дорожного движения с разгрузкой улиц центральной части города;

- реконструкция и развитие дорожно-транспортной инфраструктуры;
- совершенствование тарифной политики и системы оплаты в общественном транспорте.

Литература

1. Николаев А.С. Единая транспортная система [Текст]/ С.А. Николаев. — М.: Лицей , 2009. — С.135.
- 2.Семенова О.С. Математическое моделирование в задачах оптимизации движения городского пассажирского транспорта с учетом наложения маршрутных схем [Текст]: Автореф. дис.... канд. тех. наук/О.С.Семенова. — Новокузнецк, 2009. —24с.
- 3.Ташбаева, К. А. Анализ текущей ситуации и проблемы в системе пассажирского транспорта города Бишкек [Текст] / К. А. Ташбаева, Д. А. Осмоналиева// Молодой ученый. – Бишкек, 2016. — № 15 (119). — С. 326—330.
4. Исследование и сбор информации о состоянии дорожного транспорта в городе Ош Кыргызской Республики [Текст]/Краткий обзор. – Японское агентство международного сотрудничества (JICA). – 2016 г. – С. 67–69.
5. Источник: <http://www.stat.kg/> (дата обращения: 31.03.21)

УДК 004.89

Г.А. Самигулина¹, З.И. Самигулина²

¹Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК

²Казахстанско-Британский технический университет, г.Алматы, Казахстан

E-mail: kz.galinasamigulina@gmail.com, samigulinaresearch@gmail.com

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИММУННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Осуществлён аналитический обзор разработанных современных приложений на основе перспективного биоинспирированного направления искусственных иммунных систем для интеллектуального управления сложными объектами за последние пять лет. Показана актуальность и возможности развития данного подхода искусственного интеллекта для решения задачи по интеллектуализации промышленного сектора и успешного осуществления концепции индустриальной модернизации «Индустрия 4.0». Рассматриваются особенности и трудности, возникающие при разработке данных систем, а также возможные пути их реализации. Особая роль отведена изучению модифицированных алгоритмов искусственных иммунных систем, которые позволяют объединить достоинства различных подходов и существенно нивелировать их недостатки при совместном использовании. Полученные результаты будут применяться при разработке унифицированной искусственной иммунной системы, позволяющей наиболее эффективно формировать иммунный ответ для различных по характеру и размеру данных.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, сложные объекты, информационная технология, искусственные иммунные системы, модифицированные алгоритмы, промышленное оборудование, современная микропроцессорная техника.

Введение

Широкое использование полученных результатов в области искусственного интеллекта (ИИ) и активное внедрение их в автоматизацию современного производства открывает большие возможности по созданию интеллектуальных систем прогнозирования и управления нового поколения, увеличивает производительность предприятия, а также существенно повышает безопасность на производстве при реализации концепции четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» [1]. Одним из основных трендов этой программы является широкомасштабное внедрение киберфизических систем в промышленное производство [2], способных самонастраиваться и самообучаться в режиме реального времени с целью оптимизации процессов управления.

В настоящее время на промышленных объектах повсеместно применяются распределённые системы управления (например, Experion PKS фирмы Honeywell), которые способны осуществлять мониторинг и управлять сложными технологическими процессами в режиме реального времени, а также собирать и обрабатывать производственные данные для оптимизации производства и предотвращения аварийных сценариев. Проблема заключается в том, что огромный объём текущей информации о функционировании технологического процесса (показания с различных датчиков, устройств и т.д.) не успевает обрабатываться в режиме реального времени, поэтому очень актуальна разработка инновационных технологий искусственного интеллекта для прогнозирования и управления сложными объектами [3].

Современные промышленные предприятия состоят из сложного дорогостоящего оборудования и технологических средств, оснащённых высокопроизводительной микропроцессорной техникой (например, фирм производителей Schneider Electric, Siemens и Honeywell), связанных с распределёнными системами управления [4]. Поэтому еще одной важной проблемой является разработка эффективной технологии диагностики промышленного оборудования, которая способна выявлять текущие неисправности, прогнозировать отказы оборудования и оценивать степень опасности выхода из строя оборудования для всего производства [5].

Большое распространение в последнее время получили метаэвристические подходы ИИ, основанные на моделировании биологических прототипов. Наиболее развитыми являются нейронные сети [6], генетические алгоритмы [7], алгоритмы роевого интеллекта [8], искусственные иммунные системы [9] и др. В последнее время искусственные иммунные системы представляют особый интерес, так как обладают рядом достоинств: памятью, способностью к обучению и адаптации, могут принимать решение в незнакомой ситуации, успешно решать задачи распознавания образов и прогнозирования.

1. Постановка задачи

Постановка задачи формулируется следующим образом: необходимо проанализировать современное состояние и определить дальнейшие перспективы развития биоинспирированного подхода искусственных иммунных систем (AIS, Artificial Immune System), а также различных модифицированных алгоритмов AIS для интеллектуального управления сложными объектами с использованием современной микропроцессорной техники ведущих фирм производителей промышленного оборудования с целью успешного выполнения программы «Индустрия 4.0» по интеллектуализации промышленности.

2. Инженерные приложения на основе алгоритмов AIS

Применение современных подходов искусственного интеллекта является очень перспективным для решения сложных технических проблем по управлению современным высокотехнологичным и наукоемким производством. Подход искусственных иммунных систем является биологическим направлением искусственного интеллекта, которое основано на принципах работы иммунной системы человека. Современные AIS реализуют различные механизмы функционирования иммунитета, но наиболее распространёнными являются: молекулярное узнавание, клональный отбор и негативная селекция [10,11].

Глубокое изучение и осмысление основных принципов обработки информации молекулами белков в биологическом прототипе иммунной системы человека и построение на их основе новых оригинальных моделей AIS способны привести к прорывным результатам при разработке интеллектуальных систем управления сложными объектами, функционирующими в режиме реального времени.

На основе данного подхода разработано много различных приложений для решения проблем машинного обучения, кластеризации, распознавания образов, прогнозирования, диагностики и т.д. Уникальные адаптивные свойства иммунной системы [12] вдохновляют на создание высокоэффективных алгоритмов AIS, которые составляют серьёзную конкуренцию другим интеллектуальным подходам и при определённых условиях показывают лучший результат.

Например, в работе [13] рассматриваются проблемы удалённых промышленных объектов нефтегазового сектора и разработки прогностических и диагностических подходов на основе искусственных иммунных систем с мультиагентной архитектурой для технического обслуживания оборудования. Рассматриваются такие свойства AIS, как самообучение на предыдущем опыте и самовосстановление. Приводится сравнение разработанной гибридной системы прогнозирования и диагностики для различных условий эксплуатации. Исследования [14] посвящены области робототехники и отказоустойчивого управления исполнительных механизмов в опасных средах с использованием генетических алгоритмов и AIS. Анализируются основополагающие принципы функционирования и адаптивные свойства искусственных иммунных систем, а также рассматриваются возможности диагностики и безопасной работы приводов на основе компенсирующих контроллеров в реальном времени. В работе [15] предлагается использование искусственного иммунного алгоритма для решения задачи планирования работы промышленных роботов. Представлена интеллектуальная модель планирования с целью оптимального распределения ресурсов, которая позволяет скоординировать работу роботов в различных подразделениях. Модель позволяет сократить производственные расходы и равномерно распределять нагрузку между роботами. Программная реализация осуществляется в MATLAB. Результаты моделирования показали высокий результат и перспективность использования данного подхода.

Статья [16] посвящена вопросам создания киберфизической системы для распределённой диагностики на современных производственных предприятиях с использованием биовдохновлённых алгоритмов AIS с возможностью обучения. Предложенная многоагентная архитектура и полученные результаты исследований доказывают устойчивость парадигмы разработанной AIS для распределённой диагностики.

В исследовании [17] рассматривается несколько подходов AIS для проблем обнаружения и устранения неисправностей на основе алгоритмов отрицательного отбора. Приводится анализ и оценка трёх методов для различных условий обнаружения неисправностей.

Работа [18] рассматривает решение сложной проблемы диагностики неисправностей асинхронных двигателей, и в частности излома стержня ротора с использованием алгоритма AIS на основе клональной селекции. Проведён анализ существующих методов и описаны их недостатки, связанные с большими объёмами вычислений. В результате проведённых исследований был предложен новый метод выделения информативных признаков и оптимизации детекторов для различных состояний ротора асинхронного двигателя, а также разработано программное обеспечение для онлайн-диагностики. Тестирование показало хороший результат и возможность использования данного подхода на производстве.

В статье [19] предлагается новый подход для мониторинга и прогнозирования состояния сложных электромеханических систем с целью выявления аварийных ситуаций и обеспечения безопасной и надёжной работы. При построении модели идентификации рабочих параметров системы для определения аномальных характеристик используется искусственная иммунная система и инкрементное обучение (incremental learning) с целью наблюдения за динамическими изменениями шаблонов в реальном времени и адаптивных

обновлений. Достоинством данного подхода является отсутствие необходимости переобучения для обновления идентификационной модели.

3. Модифицированные алгоритмы AIS

В связи с тем, что до сих пор нет универсальных алгоритмов AIS, способных высокоэффективно обрабатывать разнородную информацию, возникает необходимость разработки модифицированных алгоритмов AIS для решения определённых задач с учётом особенностей и условий их выполнения. Появление множества таких модифицированных алгоритмов, созданных на основе базовых алгоритмов, требует систематизации и детального изучения данной области для развития теоретических основ AIS и перехода на более высокий уровень при создании приложений.

Модифицированные алгоритмы AIS широко используются для оптимизационных задач. Например, исследования [20] посвящены разработке инженерного приложения с использованием нового модифицированного алгоритма иммунной клональной системы. Решается оптимизационная задача для конструкции зубчатого привода. Сравнительный анализ с существующим дизайном показал значительное превосходство нового оптимизационного решения.

В работе [21] предложен улучшенный алгоритм отрицательного отбора с применением специализированных детекторов, который предназначен для обнаружения неисправностей технических процессов и систем. Данный модифицированный алгоритм менее специфичен и может быть использован при неограниченных типах неисправностей.

Специализированные детекторы не нуждаются в предварительных сведениях о типах неисправностей. При тестировании алгоритма на трёх наборах данных показано, что в отличие от базового алгоритма отрицательного отбора и ряда распространённых алгоритмов машинного обучения точность рассматриваемого метода выше в условиях ограниченного времени (онлайн-режим). В статье [22] рассматривается интеллектуальная модель анализа данных для поиска аномалий с использованием улучшенного алгоритма отрицательного отбора NSA и алгоритма классификации. При моделировании разработанный метод продемонстрировал преимущества улучшенного алгоритма.

В исследованиях [23] разработан алгоритм искусственных иммунных систем с механизмом социального обучения (AIS-AL). Антитела разделяются на два ряда: элитарный ES и общий CS. Соответственно антитела тоже будут двух видов, и в операторе мутации элитарные ES – антитела самообучаются, а общие CS – антитела осуществляют два вида социального обучения (стохастическое SSL и эвристическое HSL) для улучшения сходимости и увеличения точности решения. Оценка эффективности разработанного модифицированного алгоритма осуществлялась для промышленного приложения по настройке пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. Моделирование на тестовых функциях и сравнительный анализ с алгоритмами opt-aiNet, IA-AIS и AAIS-2S показал более высокую точность и скорость сходимости.

В исследованиях [24-26] разработаны и протестированы следующие модифицированные алгоритмы: RF-AIS_G с использованием алгоритма случайного леса (Random Forest) для выделения информативных дескрипторов и иммунносетевого алгоритма на основе гомологов (AIS_G); GWO-AIS_G на основе алгоритма оптимизации серых волков (Grey Wolf Optimization) и иммунносетевого алгоритма прогнозирования;

CPSOIW-AIS_G с использованием кооперативного алгоритма роя частиц с весом инерции (Cooperative Particle Swarm Optimization with Inertia Weight) и алгоритма на основе искусственных иммунных сетей, FPA-AIS_G с алгоритмом опыления цветов (Flower Polination Algorithm) и иммунносетевым алгоритмом. На примере реальных производственных данных с различных узлов технологической установки 300 по очистке газа от кислых компонентов нефтегазового предприятия «Тенгизшевройл» осуществлён сравнительный анализ эффективности применения разработанных модификаций AIS с другими известными алгоритмами AIS (алгоритмом клональной селекции CLONALG, алгоритмами распознавания искусственной иммунной системой AIRS1 и AIRS2, алгоритмом негативной селекции NSA, а также с наивным Байесовским алгоритмом NB, алгоритмом глубокого обучения DL, алгоритмом деревьев решений DT, алгоритмом случайного леса RF, методом опорных векторов SVM), который показал перспективность применения данного подхода.

Полученные результаты по анализу состояния и развитию подхода искусственных иммунных систем будут применяться при разработке унифицированной искусственной иммунной системы [27], позволяющей наиболее эффективно формировать иммунный ответ для различных по характеру и размеру данных.

Заключение

Таким образом, проведённый аналитический обзор современных публикаций за последние пять лет по применению искусственных иммунных систем показал актуальность и перспективность развития данного направления по интеллектуализации современных промышленных предприятий для управления сложными объектами, прогнозирования и диагностики состояния оборудования, а также широкого применения в различных областях науки и техники.

Благодарности

Исследования проводятся по гранту №AP09258508 КН МОН РК «Разработка интеллектуальной технологии управления сложными объектами на основе унифицированной искусственной иммунной системы для промышленной автоматизации с использованием современной микропроцессорной техники» (2021–2023 гг.).

Литература

1. Gioacchino de Candia. Industry 4.0 and its aberrations. – 2019. – P. 1–14. DOI:10.13140/RG.2.2.36086.96323.
2. Advances in Industrial Automation and Smart Manufacturing / Ed. A. Arockiarajan, M. Duraiselvam, Ramesh Raju // Lecture Notes in Mechanical Engineering. –Springer Singapore, 2021. DOI: 10.1007/978-981-15-4739-3.
3. Rieger C., Ray I., Zhu Q., Haney M. Industrial Control Systems Security and Resiliency. – Springer, 2019. – P.1–276. DOI: 10.1007/978-3-030-18214-4.
4. Samigulina G.A., Samigulina Z.I. Development of Smart technology for complex objects prediction and control on the basis of a distributed control system and an artificial immune systems approach // Advances in Science. Technology and Engineering Systems Journal. – 2019. – Vol. 4, №.3. – P. 75–87.
5. Mohapatra S., Khilar P.M., Swain R.R. Fault diagnosis in wireless sensor network using clonal selection principle and probabilistic neural network approach // International Journal of Communication Systems. – 2019. – № 32(12). DOI:10.1002/dac.4138.

6. T. Wang, H. Gao, J. Qiu. A combined adaptive neural network and nonlinear model predictive control for multirate networked industrial process control // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. - 2016. - Vol. 27(2). - P. 416–425. DOI: 10.1109/TNNLS.2015.2411671.
7. Boonyopakorn P., Meesad P. The Evaluated Measurement of a Combined Genetic Algorithm and Artificial Immune System // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. - 2017. - Vol. 7, №. 4. - P.2071–2084.
8. Карпенко А.П. Современные методы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. - Москва: Изд-во МГТУ, 2017. - 446 с.
9. Sotiropoulos D., Tsihrintzis G. Artificial Immune Systems // *Machine Learning Paradigms. Intelligent systems reference library*. - Springer, 2017. - P. 159–235.
10. Bejoy B.J., Janakiraman S. Artificial Immune System based intrusion detection systems - comprehensive review // *International Journal of Computer Engineering & Technology*. - 2017. - Vol. 8, №. 1. - P. 85–95.
11. Mikherskii R.M., Mikherskii M.R. Analysis of the Use of Artificial Immune Systems // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. - 2021. - Vol. 1069. DOI:10.1088/1757-899X/1069/1/012025.
12. Woodland D. Plasticity in Adaptive Immunity // *Viral immunology*. - 2016. - Vol. 26, №.5. - P. 301.
13. Fasanotti L., Cavalieri S., Dovere E., Gaiardelli P., Pereira C. An artificial immune intelligent maintenance system for distributed industrial environments // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part 0: Journal of Risk and Reliability*. - 2018. - Vol. 232, №. 4. - P. 401–414. DOI: 10.1177/1748006X18769208.
14. Kidd R. Artificial Immune Systems: An Overview for Faulting Actuators // *Actuators*. - 2019. - Vol. 8(3). - P. 53. DOI: 10.3390/act8030053.
15. Suma T., Murugesan R. Artificial Immune Algorithm for Subtask Industrial Robot Scheduling in Cloud Manufacturing // *J. Phys.: Conf. Ser. National Conference on Mathematical Techniques and its Applications*. - 2018. - Vol.1000. DOI: 10.1088/1742-6596/1000/1/012096.
16. Rocha A. D., Lima-Monteiro, P., Parreira-Rocha, M., & Barata, J. Artificial immune systems based multi-agent architecture to perform distributed diagnosis // *Journal of Intelligent Manufacturing*. - 2019. - Vol. 30(4). - P. 2025–2037.
17. Silva G., Caminhas W., Palhares R. Artificial immune systems applied to fault detection and isolation: A brief review of immune response-based approaches and a case study // *Applied Soft Computing*. - 2017. - Vol. 57. - P. 118–131.
18. Aydin I., Karakose M., Karakose E., Akin E. A new fault diagnosis approach for induction motor using negative selection algorithm and its real-time implementation on FPGA // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. - 2018. - Vol. 34(1). - P. 689–701. DOI: 10.3233/JIFS-161964.
19. Wang Rongxi, Xu Gao, Jianmin Gao, Zhiyong Gao. An artificial immune and incremental learning inspired novel framework for performance pattern identification of complex electromechanical systems // *Science China Technological Sciences*. - 2020. - Vol. 63(1). - P.1–13. DOI: 10.1007/s11431-019-9532-5.
20. Padmanabhan S., Chandrasekaran M., Ganesan S., Khan M., Navakanth P. Optimal Solution for an Engineering Applications Using Modified Artificial Immune System // *Materials of Science and Engineering*. - 2017. - Vol. 173. - P. 1–5. DOI:10.1088/1757-899X/183/1/012025.
21. Abid A., Khan M.T., Haq I.U., Anwar S., Iqbal J. An Improved Negative Selection Algorithm-Based Fault Detection Method // *IETE Journal of Research*. - 2020. DOI: 10.1080/03772063.2020.1768158.

22. Mehare V., Thakur R.S. Data mining models for anomaly detection using artificial immune system / Eds: Tiwari B., Tiwari V., Das K., Mishra D., Bansal J // Proceedings of International Conference on Recent Advancement on Computer and Communication. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Singapore, 2018. – Vol. 34. –P.425–432. DOI: 10.1007/978-981-10-8198-9_44.
23. Wang M., Feng S., He C., Li Z., Xue Y. An Artificial Immune System Algorithm with Social Learning and Its Application in Industrial PID Controller Design // Mathematical Problems in Engineering. – 2017. – Vol.3. – P.1–13. DOI: 10.1155/2017/3959474.
24. Samigulina G.A., Samigulina Z.I. Development of Smart-technologies for prediction and control of complex objects based on modified algorithms of artificial immune systems: Monograph. – Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2020. – 224 p.
25. Samigulina G.A., Samigulina Z.I. Modified immune network algorithm based on the Random Forest approach for the complex objects control // Artificial Intelligence Review. – 2019. –Vol.52. – P.2457–2473.
26. Samigulina G.A., Massimkanova Zh.A. Development of Modified Cooperative Particle Swarm Optimization with Inertia Weight for feature selection // Cogent Engineering. – 2020. –Vol. 7, №. 1. DOI: 10.1080/23311916.2020.1788876.
27. Самигулина Г.А., Самигулина З.И. Разработка интеллектуальной технологии управления сложными объектами на основе унифицированной искусственной иммунной системы // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2020. – Vol. 2(4). – С. 117–122.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ. РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ПРИБОРА В СРЕДЕ LABVIEW ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ <i>Абыкаева Н.А., Кабаев Т.</i>	3-11
СРАВНЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБУЧЕННЫХ CNN ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ COVID-19 ПО РЕНТГЕНОВСКИМ СНИМКАМ <i>Верзунов С.Н., Раимжанов Х.А.</i>	12-25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛЕБАНИЯ СТРУНЫ <i>Кутунаев Ж.Н., Кадыркулова Н.К., Ергешова Г.К.</i>	26-30
О ПРИБЛИЖЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ СИНГУЛЯРНО-ВОЗМУЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ <i>Джураев Х.Ш., Джураева Г.Х.</i>	31-38
КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДВОЙНОГО ШУНТА МЕЖДУ ВИТКАМИ ВИНТОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ <i>Бакирова Э.М., Урусова И.Р., Сапаралиева А.Н.</i>	39-46
БОЛЬШИЕ УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ <i>Аскарбеков Р.Н., Дуйшеналиев Т.Б.</i>	47-53

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ БГУ С УЧЕТОМ ГРАФИКА НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЯ <i>Обозов А. Дж., Насирдинова С.М., Салбаев А.Н.</i>	54-60
--	-------

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ <i>Ширяева О.И.</i>	61-67
АНАЛИЗ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА ГОРОДА ОШ <i>Адиева Г.М.</i>	68-74
АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИММУННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ <i>Самигулина Г.А., Самигулина З.И.</i>	75-81

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Литературный редактор Е.В. Комарова

Компьютерная верстка С.Н. Верзунов

Подписано к печати 03.05.2021 г. Формат 70/108 1/8

Печать офсетная. Объем 10,38 усл. п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «ИМА»

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265