

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 27 № 1 / 2023



Известия Юго-Западного государственного университета

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

До 2011 года журнал издавался под названием
«Известия Курского государственного технического университета».

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как технология и оборудование механической и физико-технической обработки, сварка, роботы, мехатроника и робототехнические системы, управление в социальных и экономических системах, методы и системы защиты информации, информационная безопасность, автоматизация и управление технологическими процессами, строительные конструкции, теплоснабжение, вентиляция, газоснабжение и освещение, строительная механика.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Бредихин Владимир Викторович, д-р экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агеев Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Алексеев Юрий Владимирович, д-р архитектуры, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

Бобырь Максим Владимирович, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Бок Томас, д-р техн. наук, профессор, Мюнхенский технический университет (г.Мюнхен, Германия);

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (Мальта);

Дегтярев Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Димитров Любомир Ванков, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Софии (г.София, Болгария);

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Кузнецов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Кукарас Даниэль, д-р философии (PhD), профессор, факультет гражданского строительства, Нови-Садский университет (г.Суботица, Сербия);

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, доцент,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Пановко Григорий Яковлевич, д-р техн. наук,
профессор, Институт машиноведения
Российской академии наук (г.Москва, Россия);

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Смирнов Игорь Михайлович, д-р техн. наук,
доцент, АО «Научно-исследовательский
инженерный институт» (г. Балашиха, Россия);

Сотникова Ольга Анатольевна, д-р техн. наук,
профессор, Воронежский государственный
технический университет (г.Воронеж, Россия);

Титов Виталий Семенович, д-р техн.наук,
профессор, заслуженный деятель науки России,
Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук,
профессор, Орловский государственный университет
им. И.С.Тургенева (г.Орел, Россия);

Щербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук,
доцент, Воронежский государственный технический
университет (г.Воронеж, Россия);

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор,
Заслуженный деятель науки России,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия).

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Емельянов Сергей Геннадьевич, (председатель)
д-р техн.наук, профессор, чл.-кор. Российской академии
архитектуры и строительных наук, Лауреат
премии правительства РФ в области науки и техники,
ректор, Юго-Западный государственный университет»
(г.Курск, Россия)

Бертрам Торстен, д-р техн. наук, профессор, Институт
теории управления и системного проектирования
Технического университета (г. Дортмунд, Германия);

Гриднев Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент,
Воронежский государственный технический
университет (г.Воронеж, Россия);

Ежов Владимир Сергеевич, д-р техн. наук,
профессор, Изобретатель СССР, Юго-Западный
государственный университет (г.Курск, Россия);

Зотов Игорь Валерьевич, д-р техн. наук, профессор,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Ивахненко Александр Геннадьевич, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Колмыков Валерий Иванович, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Колчунов Владимир Иванович, д-р техн.наук,
профессор, член Российской академии архитектуры
и строительных наук, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Корневский Николай Алексеевич, д-р техн. наук,
профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-
Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Латыпов Рашид Абдулхакович, д-р техн. наук,
профессор, Московский политехнический университет
(г.Москва, Россия);

Локтионова Оксана Геннадьевна, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Шах Райнер, д-р техн. наук, профессор, Дрезденский
технический университет (г.Дрезден, Германия).

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

Сайт журнала: <https://science.swsu.ru>

Типография:

Полиграфический центр
Юго-Западного государственного
университета, 305040, г.Курск,
ул. 50 лет Октября, д. 94

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.
Подписной индекс журнала 41219
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре выпуска в год

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

© Юго-Западный государственный университет, 2023



Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Подписано в печать 14.04.2023.
Дата выхода в свет 05.06.2023. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 19,9.
Тираж 1000 экз. Заказ 20.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Аспекты природы изнашивания	8
<i>Горленко А. О., Давыдов С. В., Тихомиров В. П., Агеев Е. В.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Исследование теплотехнических процессов в пластинчатом теплообменнике	19
<i>Саввин Н. Ю., Куцев Л. А., Уваров В. А., Окунева Г. Л.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Цифровые технологии для оценки и прогнозирования влияния пространственно-временного распределения парниковых газов на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных культур	29
<i>Иващук О. А., Кузичкин О. Р., Гончаров Д. В., Дунаева В. А.</i>	

Разработка системы управления технологической линией для производства изделий из вспененного полистирола	45
<i>Рыбин И. А., Рыбина А. В.</i>	

Модель размещения данных во внутренней памяти вычислителя, реализующего схему кодирования данных в режиме сцепления блоков	59
<i>Таныгин М.О., Ахмад А.А., Казакова О.В., Голубов Д.А.</i>	

Построение LDPC-кодов с использованием модифицированного метода выборки по значимости Коула	74
<i>Усатюк В.С., Егоров С.И.</i>	

Адаптивный алгоритм системы пользовательского интерфейса инвалидной коляской-вертикализатором	90
<i>Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Щербакова М.П.</i>	

Рекурсивный алгоритм закрашивания областей распознанных объектов	103
<i>Бобырь М.В., Храпова Н.И., Супрунова О.Г., Дородных А.А.</i>	

Автотестирование встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы	114
<i>Мартышкин А. И., Кирюткин И. А., Мереняшева Е. А.</i>	

Двухмодульный нейросетевой способ обработки информации в газоаналитических системах	124
<i>Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А., Поляков Н.В.</i>	

К сведению авторов	141
---------------------------------	------------

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-8-18>



Аспекты природы изнашивания

А. О. Горленко ¹, С. В. Давыдов ¹, В. П. Тихомиров ¹, Е. В. Агеев ² ✉

¹ Брянский государственный технический университет,
бул. 50 лет Октября, д. 7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Целью работы являлось комплексное изучение природы изнашивания трущихся поверхностей.

Методы. Изнашивание трущихся поверхностей деталей всегда сопряжено с протеканием в них сложных физико-химических процессов. Материал, качество обработки трущихся поверхностей, характер контакта и скорости их перемещения относительно друг друга, вид и значения нагрузки, виды трения и смазки, качество смазочного материала, а так же наличие третьего тела между рассматриваемыми поверхностями и некоторые другие факторы оказывают колоссальное влияние на скорость изнашивания. В ГОСТ 27674-88 приведено классическое определение изнашивания, в соответствии с которым, ключевой причиной изнашивания является разрушение кристаллической решетки твердого тела, вследствие потери ее прочности, на фрагменты (блоки или частицы) определенной размерности с их последующим удалением из зоны контакта трибоперехватов. Однако детальный механизм отделения материала с поверхности трения далеко не ясен и не проработан с позиций классического материаловедения. Предложена новая концепция природы трения и изнашивания. Кристаллическая решетка любого металла, а тем более сплава, есть анизотропная среда и эта анизотропность значительно усиливается на масштабе кристаллической структуры сплава, поскольку ориентация кристаллической структуры внутри каждого зерна разнонаправлена. Следовательно, напряженно-деформированное состояние структуры в поверхностном слое трибосопряжения необходимо оценивать с позиций анизотропности среды.

Результаты. Для оценки влияния на процессы изнашивания были исследованы следующие факторы: нагрузочно-скоростные; физико-механические; структурные; теплофизические. Разработана оригинальная методика определения интенсивности изнашивания, позволяющая оценить и прогнозировать долговечность конкретного узла трения. Сравнение с экспериментом показало удовлетворительную сходимость в данном диапазоне изменения факторов, влияющих на процесс изнашивания.

Заключение. Природа изнашивания заключается в наличии напряжений в материалах контактирующих поверхностей, которые стремятся избавиться от них диспергированием отдельных частиц различной размерности, приближаясь к минимуму производства энтропии.

© Горленко А. О., Давыдов С. В., Тихомиров В. П., Агеев Е. В., 2023

Ключевые слова: поверхностный слой; качество поверхностного слоя; трение; изнашивание; аспекты природы изнашивания.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Аспекты природы изнашивания / А. О. Горленко, С. В. Давыдов, В. П. Тихомиров, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 8-18. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-8-18>.

Поступила в редакцию 16.01.2023

Подписана в печать 10.02.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Наиболее известные в настоящее время теории трения и изнашивания охватывают в основном только молекулярные (адгезионные) и механические (деформационные) составляющие процесса и не учитывают параметры качества обработки сопряженных поверхностей трения [1-5].

В связи с этим, предлагается новый подход к оценке природы процессов трения и изнашивания.

При контакте перемещающихся относительно друг друга поверхностей, которые имеют определенные неровности профиля и предрасположенность к межатомному взаимодействию, начинают развиваться процессы, которые и обуславливают изменения микрогеометрических и физико-механических характеристик сопряжения, что и является природой трения. Контактующие трущиеся поверхности стремятся избавиться от напряжений в материалах (природа изнашивания) методом диспергирования отдельных частиц различной размерности, стремясь к минимуму энтропии [6-10].

Целью настоящей работы являлось комплексное изучение природы изнашивания трущихся поверхностей.

Материалы и методы

Процесс изменения размеров тела при трении, который сопровождается отделением с соприкасающихся поверхностей материала и (или) образованием остаточной деформации в соответствии с ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка» называется изнашиванием.

Материал, качество обработки трущихся поверхностей, характер контакта и скорости их перемещения относительно друг друга, вид и значения нагрузки, виды трения и смазки, качество смазочного материала, а так же наличие третьего тела между рассматриваемыми поверхностями и некоторые другие факторы оказывают колоссальное влияние на скорость изнашивания [11, 12].

Если исходить из определения изнашивания по ГОСТ, ключевой причиной изнашивания является разрушение кристаллической решетки твердого тела, вследствие потери ее прочности, на фрагменты (блоки или частицы) опре-

делённой размерности с их последующим удалением из зоны контакта трибоповерхностей. Однако детальный механизм отделения материала с поверхности трения далеко не ясен и не проработан с позиций классического материаловедения.

Внешние силовые параметры контакта (характер нагружения) и возникающие физико-химические процессы при изнашивании являются вторичными по отношению к собственно процессу разрушения кристаллических решеток контактирующих тел в трибосопряжении, и либо ускоряют, либо замедляют данный процесс.

С позиций общей термодинамики процесс изнашивания есть циклический процесс накопления и сброса внутренней энергии структурой сплава (материала) в процессе внешнего силового контакта трибоповерхностей. Из этого положения процесс изнашивания можно условно разделить на две стадии:

1. *Стадия накопления энергии.* Накопление энергии структурой металла с

исходным равновесным уровнем до предельного критического уровня.

2. *Стадия сброса энергии.* Отделение областей кристаллической структуры металла с накопленным предельным (неравновесным или критическим) уровнем энергии за счет их удаления через разрушения структуры с сохранением структурных областей металла с не критическим уровнем накопленной внутренней энергии.

Процесс накопления энергии кристаллической структурой металла есть процесс ее эволюции от равновесных структур с минимальным уровнем внутренней энергии, до неравновесных структур с предельным уровнем энергии с последующим их удалением из зоны трибоконтакта. Следовательно, изнашивание есть процесс структурной самоорганизации трибоповерхностей при их энергосиловом контакте.

Данный вывод можно проиллюстрировать с высокой степенью корреляции на типовой нормальной кривой изнашивания (рис.1).



Рис. 1. Нормальная кривая изнашивания трибосопряжений

Структурную самоорганизацию материала поверхностей трибосопряжения необходимо рассматривать только парно, в условиях их сопряжения и взаимного влияния при контакте. Если исходная структура каждой трибоповерхности перед трибоконтактом и соответствовала минимальной равновесной внутренней энергии (условно – «нулевой» энергии), то в начальный момент трибоконтакта их структурная организация уже не соответствовала взаимному внутреннему энергетическому равновесию.

Следовательно, в период приработки t_n (см. рис. 1) происходит взаимное структурное изменение материалов трибоузла до их структурного состояния, соответствующего взаимной минимальной разнице внутренней энергии для каждой структуры материала в точке А (см. рис.1). Чем меньше разница в уровнях исходной («нулевой») внутренней энергии материала, тем меньше время t_n приработки трибосопряжения и скорости его износа. Таким образом, в т.А (см. рис. 1) разница накопленной внутренней энергии структурами сплавов трибосопряжений в процессе приработки должна быть минимальной.

Из этого положения следует, что чем дольше сохраняется данный минимум разности внутренней энергии структур контактирующих сплавов при заданных условиях трибоконтакта, тем более износостойкой будет данное трибосопряжение двух сплавов. Тем более длительным будет период нормального изнашивания $t_{ни}$ (рис.1, участок А-Б). Фактически, период $t_{ни}$ (см. рис. 1) есть

время стабильного существования равновесных структур сплавов в трибосопряжении.

Для дальнейшего анализа введем понятие «внутренней структурной энергоемкости» сплава – U_{str} .

Исходное или «нулевое» энергетическое состояние структуры трибосплавов (после их финишной механической обработки в поле допуска под трибопосадку) соответственно обозначим как U^0_{str1} и U^0_{str2} .

Перед началом процесса износа в т.0 (см. рис. 1) возможны два варианта:

1. $U^0_{str1} - U^0_{str2} = U_{str} (max)$ – разница исходной внутренней структурной энергоемкости сплавов максимальна, максимально как время приработки, минимален и уровень износа.

2. $U^0_{str1} - U^0_{str2} = U_{str} (min)$ – разница исходной внутренней структурной энергоемкости сплавов минимальна, минимально как время приработки, минимален и уровень износа.

В процессе приработки происходит взаимная самоорганизация структур сплавов, внутренняя структурная энергоемкость которых соответствует их минимальной разнице:

$$U_{str1} - U_{str2} = U_{str} (min).$$

Данное выражение справедливо, прежде всего, для анизотропных структур, даже при условии одинакового фазового состава каждого сплава в трибоконтакте.

Абсолютная структурная совместимость по завершению периода приработки должна соответствовать нуле-

вой разнице их внутренней структурной энергоемкости:

$$U_{str1} - U_{str2} = 0.$$

В этом случае структурная организация сплава не обязательно должна быть одинаковой, т.е. структуры могут быть совершенно разными по фазовому составу и степени дисперсности, однако это условие реализуется только для изотропных структур трибоповерхности (монокристалл, твердые растворы, полимерные покрытия и т.п.).

Равновесная структура в трибосопряжении не может сохраняться бесконечно долго, что связано с ростом энтропийного фактора или необратимой деградацией структуры сплава, которая связана, прежде всего, с ростом остаточных напряжений (микродеформаций), которые накапливаются, например, в результате закрепления (блокировки) фрагментированных (полосовых, блочных) дислокационных структур (субструктур) в кристаллической решетке сплава и их самоорганизации, а также в результате воздействия других термо-силовых факторов.

При оценке уровня внутренней структурной энергоемкости сплава необходимо учитывать его состояние – анизотропности или изотропности.

В механике твердого тела принято считать, что все кристаллические макротела есть тела изотропные. Применение физики изотропности к напряженно-деформированному состоянию трибоповерхностей может привести не только к ошибкам в построении моделей их разрушения, но и к неверной в

целом физической модели разрушения или износа трибосопряжения.

Кристаллическая решетка любого металла, а тем более сплава, есть анизотропная среда и эта анизотропность значительно усиливается на масштабе кристаллической структуры сплава, поскольку ориентация кристаллической структуры внутри каждого зерна разнонаправлена. Следовательно, напряженно-деформированное состояние структуры в поверхностном слое трибосопряжения необходимо оценивать с позиций анизотропности среды.

Динамику и профиль кривой изнашивания $I=f(t)$ (см. рис. 1) можно объяснить влиянием анизотропности структуры поверхностных слоев трибосопряжения. Деградация структуры сплава или рост энтропийного фактора (разупорядочивание) в каждой структуре контактирующих сплавов может протекать по-разному.

Возможны два варианта:

1. Анизотропность структуры контактирующих поверхностных слоев сплава в достаточной степени однородная. Деградация структуры и динамика накопления избыточной внутренней энергоемкости структуры также примерно одинакова. Следовательно, разница энергий $U_{str1} - U_{str2} = U_{str}(\min)$ практически постоянна и сохраняется довольно длительное время. Кривая изнашивания имеет большую протяженность, малый угол подъема при минимальном износе.

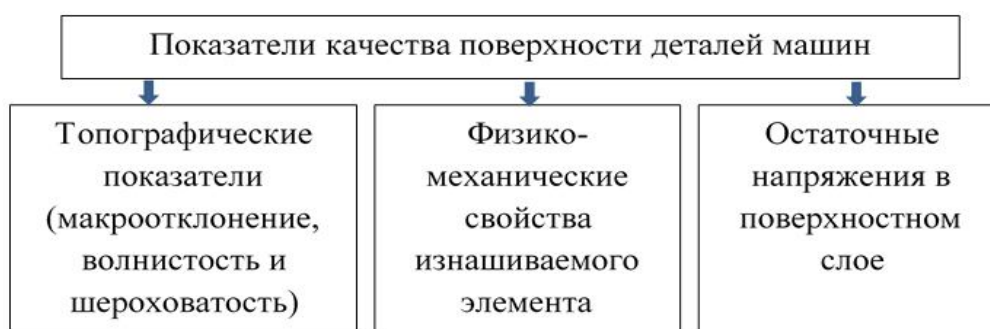
2. Анизотропность структур контактирующих поверхностных слоев сплава резко отличается. Деградация структуры

и накопление избыточной внутренней энергоемкости структуры в одном из сплавов резко возрастает. Следовательно, разница энергий $U_{str1} - U_{str2} = U_{str}(\min)$ с течением времени изнашивания увеличивается и ускоряется. Кривая изнашивания укорачивается, угол подъема возрастает при максимальном износе.

В точке Б (см. рис. 1) процессы структурной деградации начинают преобладать над процессами структурной восстановительной самоорганизации по всему контактному объему сплава, внут-

ренние микронапряжения переходят в локальные микроразрывы внутри зерна или по границам зерен структуры и начинается процесс лавинообразного разрушения контактной поверхности с недопустимым изменением полей допуска на трибосопряжение, т.е. достигается аварийное состояние трибосопряжения.

Функциональное назначение деталей машин обуславливается качеством их поверхности, которое складывается из показателей, представленных на схеме [12]:



Построение физической модели объекта исследования и проведение математического описания процесса его изнашивания – это безусловно два необходимых подхода для проведения надежной оценки показателей изнашивания и прогнозирования работоспособного состояния. Для каждого конкретного случая рассмотрения пары трения экспериментальным путем необходимо найти безразмерный коэффициент износа, используемый в уравнении Арчарда [13, 14].

В целом на процесс изнашивания трущихся деталей оказывает влияние порядка 20 различных факторов. Учесть в эксперименте сразу все их технически невозможно, поэтому исследователи

пришли к выводу, что выбрав только два из них можно провести испытания на износ в условиях, близких к эксплуатационным. И такими факторами являются нормальная нагрузка и твердость изнашиваемого элемента трибосистемы по Арчарду. Нахождение и анализ коэффициента износа делает уравнение Арчарда адекватным

При рассмотрении модели пары трения первого типа (рис. 2 а), в которой одна поверхность шероховатая, а вторая – гладкая и менее твердая, следовательно, шероховатость должна быть описана высотными, шаговыми, гибридными параметрами и фрактальными показателями. Обязательно надо рассмотреть модули упругости и коэффициенты Пуассона

элементов данной пары, а для гладкой поверхности обязательно учесть ее физи-

ко-механические свойства (предел прочности, твердость и т.п.).



Рис. 2. Типы моделей контактного взаимодействия: а – первого типа; б – второго типа

На рис. 2 б представлена модель взаимодействия 2 типа: выступа с упруго-пластическим полупространством, в котором фрикционная связь – пространственное временное образование. Время жизни такой связи составляет $10^{-3} \dots 10^{-7}$ с и зависит от диаметра пятна контакта и от скорости скольжения. Данная связь –

это модель внешнего трения отдельного выступа с упруго-пластическим полупространством, отражающая деформационную и адгезионную природу взаимодействия твердых тел. Формулой Герца возможно описать упругое состояние рассматриваемой связи:

$$a_i = (3/4)^{2/3} \pi (E^{-1} F_i R)^{2/3} \text{ – площадь пятна контакта;}$$

$$E^{-1} = (1 - \mu_1^2 / E_1) + (1 - \mu_2^2 / E_2),$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; F_i – нагрузка на выступ; R – радиус верхней части выступа.

$$h = \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} \left(E^{-1} F_i R^{-1/2}\right)^{2/3} \text{ – внедрение;}$$

$$d_n = 1,816 (E^{-1} F_i R)^{1/3} \text{ – диаметр пятна;}$$

В полной мере пластическое состояние контакта возможно описать следующими зависимостями (I), а интен-

сивность линейного изнашивания зависимостью (II):

$$\text{I) } a_i = F_i / H; \\ h = F_i / (2\pi R H); \\ d_n = 2[F_i / (\pi H)]^{1/2}.$$

$$\text{II) } i_h = \frac{h^*}{n d_n},$$

где h^* – средняя толщина износа;
 n – число циклов нагружения, приводящих к отделению материала (износу).

И.В. Крагельский ввел для нахождения линейной интенсивности изнашивания при множественном контакте соотношение (III), а в источнике [1]

предложено приближение (IV), при помощи которого возможно оценить линейную интенсивность изнашивания:

III)

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_a},$$

где A_r – фактическая площадь;
 A_a – номинальная площадь контакта.

IV)

$$I_h = \frac{0,15}{n} \sqrt{\frac{h}{R} \frac{A_r}{A_a}}.$$

Для различных типов контакта расчет циклов можно проводить по следующим соотношениям:

**Упругий
контакт**

$$n = (\sigma_b / k' \tau_n)^{t_e}$$

Пластическое состояние контакта

$$n = (2\varepsilon_p / \epsilon)^{t_p},$$

где σ_b – предел прочности; k' – коэффициент, равный трем для высокоэластичных материалов и пяти – для хрупких; τ_n – касательные напряжения, обусловленные межмолекулярными взаимодействиями неровности с полупространством; t_e – показатель степени $t_e \in [3 \dots 14]$; ε_p – относительное удлинение, приводящее к разрушению; ϵ – текущее относительное удлинение; $t_p \in [2 \dots 3]$

При рассмотрении модели адгезионного износа уравнение Арчарда можно записать в виде (V) соотношения, а

при пластическом контакте в виде соотношения (VI) и с другой стороны можно применить выражение (VII):

V)

$$V_w = k_w \frac{F_n L}{H},$$

где V_w – объем изношенного материала; F_n – нормальная нагрузка; L – путь трения; H – твердость изнашиваемого материала.

VI)

$$V_w = k_w A_r L.$$

VII)

$$V_l = i_h n d_n A_r.$$

С учетом некоторых допущений получим соотношение $k_w = i_h$, приравняв (V) и (VI). Величина, обратная n , приводящая к износу – это и есть коэффициент износа.

Интенсивность изнашивания не является постоянной величиной и она пропорциональна давлению в контакте,

модулю упругости, коэффициенту трения и параметру h/R :

$$I_h \propto (\sigma^{1+bt}; E^{t-bt-1}; f^t; \dots).$$

Результаты и их обсуждение

Наиболее существенно влияющие на процессы изнашивания факторы представлены на схеме [15, 16]:



Предлагаем в качестве основных единиц взять следующие параметры: M – масса, кг; L – длина, м; T – время, с. То-

гда количество критериев подобия k_π в соответствии с π – теоремой Букингэма будет равно:

$$k_\pi = n - r = 6 - 3 = 3,$$

где n – число факторов; r – число основных единиц.

Задав критерии подобия (VIII) (безразмерные комплексы и безразмерный

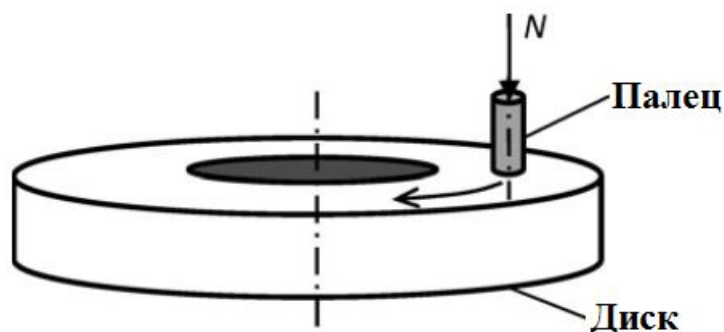
параметр) можем составить критериальное уравнение (IX):

$$\text{VIII)} \quad \Pi_1 = \frac{p}{H}; \quad \Pi_2 = \frac{vd_n}{a}; \quad \Pi_3 = I_h.$$

$$\text{IX)} \quad \Pi_3 = \Pi_1^\alpha \Pi_2^\beta.$$

Показатели степени в критериальном уравнении находят экспериментальным

методом на машине трения (рис. 3) по схеме палец-диск (pin-on-disc).



Характеристика	Палец	Диск
Материал	Сталь А576-1045 / российский аналог – сталь 45)	
Химический состав стали, %	$C - 0,42-0,50$	
	$Si - 0,40$	
	$Mn - 0,50-0,80$	
	$P - 0,045$	
Твердость	$Cr - 0,40$	
	HRC 40	HRC 20

Рис. 3. Схема проведения эксперимента

Износ диска (рис. 4) измерялся с точностью до 0,01 мл гр.



Номинальное давление	$p \in [(1 \dots 12)10^6] \text{ Па}$
Скорость скольжения	$v \in \frac{[0,016 \dots 0,345] \text{ м}}{\text{с}},$
Коэффициент температуропроводности	$a = 11,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Площадь контакта пальца с диском	$12,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
Время, за которое оценивался износ	$t = 1800 \text{ с}$
Диаметр пятна контакта (по Эшби [4])	$d_n = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 10^6}{H}$ $= \frac{0,2 \cdot 10^6}{2290 \cdot 10^6} =$ $= 8,73 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$

Рис. 4. Внешний вид диска и характеристики испытания

Fig. 4. Appearance of the disk test characteristics

Запишем критериальное уравнение
в следующем виде:

$$\Pi_3 = C_0 + C_1 \Pi_1 + C_2 \Pi_2.$$

Решая векторное уравнение (рис. 5)
можно найти его постоянные.

$$X1 := \begin{pmatrix} 1 & 8.734 \cdot 10^{-4} & 0.483 \\ 1 & 1.31 \cdot 10^{-3} & 0.843 \\ 1 & 3.493 \cdot 10^{-3} & 1.763 \\ 1 & 4.367 \cdot 10^{-3} & 0.881 \\ 1 & 5.24 \cdot 10^{-3} & 2.644 \end{pmatrix}$$

$$Y1 := \begin{pmatrix} 1.821 \times 10^{-8} \\ 2.141 \cdot 10^{-8} \\ 1.986 \times 10^{-8} \\ 2.797 \cdot 10^{-8} \\ 0.8647 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

$$(X1^T \cdot X1)^{-1} \cdot X1^T \cdot Y1 = \begin{pmatrix} 2.444 \times 10^{-8} \\ 2.927 \times 10^{-6} \\ -1.071 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

Рис. 5. Нахождение постоянных критериального уравнения: $C_0=2,444 \cdot 10^{-8}$; $C_1=2,927 \cdot 10^{-6}$; $C_2=-1,071 \cdot 10^{-8}$

Fig. 5. Finding the constants of the criterion equation: $C_0=2,444 \cdot 10^{-8}$; $C_1=2,927 \cdot 10^{-6}$; $C_2=-1,071 \cdot 10^{-8}$

Определив для первой строки критерии подобия, получаем конечное критериальное уравнение для установившегося изнашивания после приработки в течение ~ 100 с:

$$\Pi_1 = 2/2290 = 8,734 \cdot 10^{-4};$$

$$\Pi_2 = (0,063 \cdot 8,73 \cdot 10^{-5}) / (11,39 \cdot 10^{-6}) = 0,483;$$

$$\Pi_3 = 1,821 \cdot 10^{-8}.$$

$$I_h = 2,444 \cdot 10^{-8} + 2,927 \cdot 10^{-6} \Pi_1 - 1,071 \cdot 10^{-8} \Pi_2$$

Затем проводится проверка данного аналитического выражения на адекватность методом сравнения расчетных и экспериментальных данных (рис. 6).

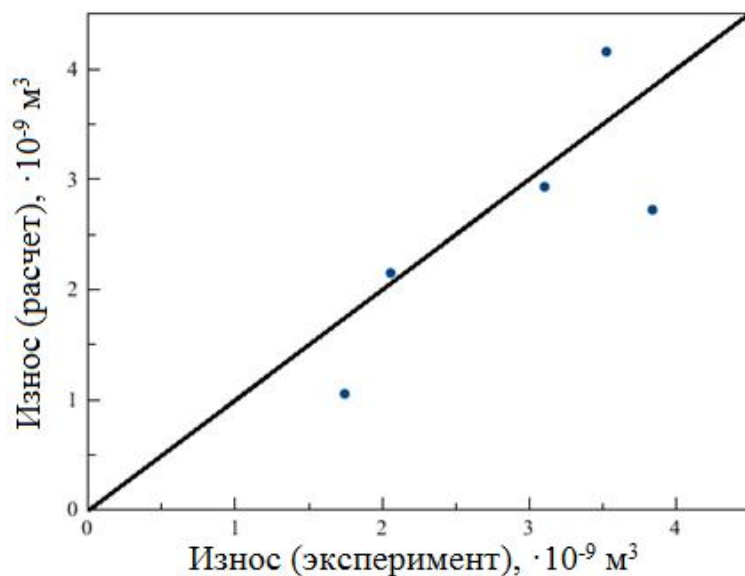


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Анализ проведенного сравнения показал удовлетворительную сходимость в данном диапазоне изменения факторов, которые оказывают наибольшее влияние на процесс изнашивания.

Расчетные данные, полученные с использованием разработанной модели, и данные, полученные экспериментальным путем, найдут практическое применение при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [17-20].

Выводы

1. Предложен подход к представлению природы трения и изнашивания.
2. Разработана оригинальная методика определения интенсивности изнашивания, позволяющая оценить и прогнозировать долговечность конкретного узла трения. Сравнение с экспериментом показало удовлетворительную сходимость в данном диапазоне изменения факторов, влияющих на процесс изнашивания.

Список литературы

1. Попов О.Н., Винокуров Г.Г. Применение теории марковских цепей для моделирования изнашивания поверхности трения порошковых материалов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2017. № 5 (61). С. 67-77.
2. Винокуров Г.Г., Старостин Е.Г., Попов О.Н. Использование теории марковских цепей для описания изнашивания порошковых покрытий при трении скольжения // Вестник машиностроения. 2018. № 2. С. 35-40.

3. Пальчикова Г.С., Кривцов А.Н., Москалюк Д.Д. Анализ теории трения и изнашивания полимерных материалов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7. № 1 (44). С. 279-282.
4. Применение теорий тепловой динамики и моделирования трения и изнашивания твердых тел при проектировании тормозов авиаколес / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, В.Д. Кожемякина, Ю.Г. Сверчков, А.И. Бакин, А.В. Суворов, С.С. Коконин // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 3. С. 261-268.
5. Применение теорий тепловой динамики и моделирования трения и изнашивания твердых тел при проектированиии тяжелонагруженных тормозов транспортных машин / А.В. Чичинадзе, В.Д. Кожемякина, А.В. Суворов, С.С. Коконин // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 5. С. 31-37.
6. Инженерия поверхности деталей / колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
7. Горленко А.О., Шевцов М.Ю., Агеева Е.В. Формирование в поверхности трения деталей машин градиентных износостойких структур с помощью комбинированной электромеханической обработки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 5(80). С. 24 – 35. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-24-35>.
8. Справочник технолога / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Б.М. Базров, А.П. Бабичев, П.Ю. Бочкарев, А.О. Горленко и др.; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2019. С. 391 – 398.
9. Горленко А.О. Повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей электромеханической обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 1(91). С. 8 – 16.
10. Дегтярев Н.М., Пастухов А.Г. Механическая обработка крестовин карданных шарниров, упрочненных электромеханической обработкой // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1 (1). С. 339-343.
11. Шец С.П., Горленко А.О., Болдырев Д.А. Изнашивание стальных пар трения на уровне фактического пятна контакта // Сталь. 2022. № 2. С. 27 – 32.
12. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко, В.Б. Ильицкий, А.В. Тотай, А.В. Хандожко, А.О. Горленко и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2022. С. 19 – 97; 241 – 268; 338 – 349; 517 – 533.
13. Yanqing Tan, Lianhong Zhang, Yahui Hu. A Wear Model of Plane Sliding Pairs Based on Fatigue Contact Analysis of Asperities // Tribology Transactions. 2015. 58. P.148-157.

14. Ashby M.F., Abulawi J., Kong H.S. Temperature maps for frictional heating in dry sliding // Tribology Transactions. 1991. Vol.34, Series 4. P. 577-587.

15. Shets S. P., Gorlenko A. O., Boldyrev D. A. Wear of Steel Friction Pair at the Level of the Real Contact Area // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. № 2. P. 245 – 250.

16. Gorlenko A.O., Boldyrev D. A. Maintenance of Wear Resistance of Steel by a Directed Technological Impact // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. № 5. P. 519 – 522.

17. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Чернов, Г.С. Маслов, Е.И. Паршина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (46). С. 85-90.

18. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

19. Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, Ю.А. Фадин, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 75-82.

20. Триботехнические свойства пластичных смазочных композиционных материалов с наполнителями из дисперсных частиц меди и цинка / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Н. Сергеев, Д.В. Малий, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 109-119.

Информация об авторах

Горленко Александр Олегович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильного транспорта, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: bugi12@bk.ru
SPIN-код: 4377-4421,
AuthorID: 175172

Давыдов Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор триботехнического материаловедения и технологии материалов, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: fulleren_grafen@mail.ru

Тихомиров Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры трубопроводных транспортных систем, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: vtichomirov@mail.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Исследование теплотехнических процессов в пластинчатом теплообменнике

Н. Ю. Саввин ¹ ✉, Л. А. Куцев ¹, В. А. Уваров ¹, Г. Л. Окунева ¹

¹ Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: n-savvin@mail.ru

Резюме

Целью исследования является выявление зон вихреобразования в модифицированном гофрированном канале пластинчатого теплообменника с помощью компьютерного моделирования для увеличения интенсификации теплообменного процесса.

Методы. Пластинчатые теплообменники имеют компактную конструкцию, что позволяет существенно сэкономить место на производственных площадях и облегчить монтаж и демонтаж оборудования. В соответствии с целью данной работы нами решалась задача создания искусственной турбулизации потока для увеличения теплотехнических характеристик. Для реализации поставленной задачи разработаны пластины, имеющие специальную геометрию, которая создает турбулентный поток жидкости в каналах между пластинами и увеличивает коэффициент теплоотдачи. Это позволяет достигать более высокой эффективности теплообмена при той же площади обмена, что снижает затраты на оборудование и эксплуатацию.

Результаты. Результатом данной работы является реализация компьютерной модели модифицированного гофрированного канала для визуальной оценки влияния искусственно созданных турбулизаторов на степень вихреобразования.

Заключение. Внедрение пластин, основная теплообменная часть которых содержит технологические лунки сферической формы, позволяет увеличить эффективность теплообменного процесса за счет роста коэффициента теплопередачи. Кроме того, увеличение коэффициента теплопередачи будет способствовать снижению металлоемкости и стоимости теплообменного оборудования.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменный аппарат; турбулизация; коэффициент теплопередачи; компьютерное моделирование; вихреобразование.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Исследование теплотехнических процессов в пластинчатом теплообменнике / Н. Ю. Саввин, Л. А. Куцев, В. А. Уваров, Г. Л. Окунева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 19-28. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-19-28>.

Поступила в редакцию 26.01.2023

Подписана в печать 20.03.2023

Опубликована 14.04.2023

© Саввин Н. Ю., Куцев Л. А., Уваров В. А., Окунева Г. Л., 2023

Введение

Потребление тепловой энергии в секторе централизованного теплоснабжения в России в 2020 г. составило 3,7 миллиарда Гигакалорий. По сравнению с 2019 годом это снижение на 5,6%. Наибольший объем потребления тепловой энергии в 2020 году пришелся на жилой сектор – 2,2 миллиарда Гигакалорий. Доля потребления в промышленности составила 0,9 миллиарда Гигакалорий, в коммунальном и социальном секторах – 0,6 миллиарда Гигакалорий.

В целом, в 2020 году потребление тепловой энергии в секторе ЦТС снизилось из-за мягкой зимы и сокращения объемов производства в промышленности вследствие пандемии COVID-19. Однако специалисты отмечают, что долгосрочный тренд увеличения энергоэффективности и расширения использования альтернативных источников энергии сохраняется. За последние 16 лет конечное потребление тепловой энергии в системах централизованного теплоснабжения снизилось с 1382 до 1126 млн Гкал в год (рис.1) [1, 2].

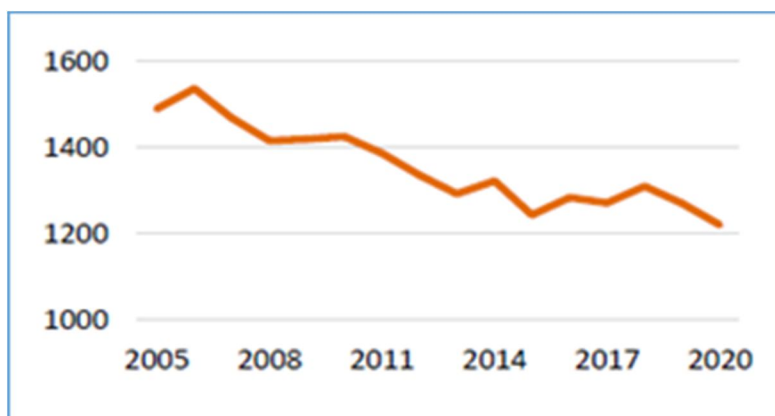


Рис. 1. Динамика отпуска тепловой энергии от источников тепла

Снижение объемов потребления тепловой энергии объясняется внедрением энергоэффективного технологичного оборудования и повышением осведомленности населения о сбережении энергоресурсов. Различные государственные программы по стимулированию энергоэффективности также оказывают положительное влияние на потребление тепла. Например, субсидии на установку энергосберегающих оборудования в жилых

помещениях и льготные кредиты на энергоэффективный ремонт зданий. В результате, снижение потребления тепла приводит к экономии средств и улучшению экологической ситуации в регионе [3, 4].

Оценивая динамику развития теплоэнергетического комплекса Российской Федерации можно сделать вывод, что наблюдаются:

- увеличение доли газовых электростанций в производстве электроэнергии;

- сокращение доли угля в производстве тепловой энергии;
- рост общей мощности генерирующих объектов;
- введение новых технологий, таких как использование возобновляемых источников энергии (ветроэнергетика, солнечная энергия, гидроэнергетика) и когенерации;
- модернизация и реконструкция существующих объектов для увеличения их эффективности и надежности;
- внедрение систем автоматизации и дистанционного управления объектами теплоэнергетики;
- улучшение экологических показателей производства.

Целью энергетической политики России является обеспечение надежной и безопасной энергетической базы страны, увеличение эффективности использования энергоресурсов, сокращение экологических рисков и повышение экономической конкурентоспособности России на мировом рынке энергоресурсов. Основными задачами являются совершенствование технологий добычи, транспортировки и переработки энергетических ресурсов, развитие инфраструктуры и повышение энергетической безопасности России. Обеспечение устойчивого экономического роста и улучшения качества жизни населения страны зависит от эффективного использования природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора. Для этого необходимо принимать меры по снижению энергопотребления, разработке технологий, использующих возобнов-

ляемые источники энергии, а также развитию рынка энергетических услуг. Это не только сократит негативное влияние на окружающую среду, но и позволит укрепить внешне-экономические позиции страны через рост экспорта инновационной продукции, связанной с энергетикой. Кроме того, развитие энергетического сектора может способствовать созданию новых рабочих мест, увеличению налоговых поступлений и повышению конкурентоспособности экономики в целом [5, 6].

Материалы статьи являются продолжением исследований, рассмотренных в работе [7].

Материалы и методы

Моделирование процессов, устройств и аппаратов в настоящее время является универсальным методом научного исследования. Моделирование с помощью компьютерных технологий – эффективный метод исследования, который позволяет значительно сэкономить время и ресурсы. Оно позволяет изучать объекты и процессы, которые невозможно изучить природными методами и является важным инструментом для понимания результатов экспериментов. Особенно это важно при проектировании систем теплогазоснабжения в жилищно-коммунальном хозяйстве Российской Федерации [7-9].

ЖКХ является одной из ключевых отраслей народного хозяйства России, охватывающей многообразное производственно-техническое развитие. Необходи-

димось в продукции, производимой этим комплексом, является практически неиссякаемой. Он включает в себя жилые, общественные здания, эксплуатационные, ремонтно-строительные, транспортные, энергетические и другие предприятия, формирующие сложную социально-экономическую систему. Развитие городских объектов и качество жизни жителей находятся в прямой зависимости от эффективности функционирования ЖКХ [10-16].

Процессы, происходящие в системах теплогазоснабжения ЖКХ РФ, отличаются большой динамичностью, нестационарностью. Также для них характерна большая инерционность, сложные структурные связи, зависимость от окружающей среды.

Поэтому для их изучения широко применяются методы математического, имитационного моделирования, служа-

щие базой для создания цифрового двойника [17-19].

Первым этапом стала разработка оригинальной геометрии основного элемента пластинчатого теплообменного аппарата - теплообменной пластины. Ее оригинальность заключается в том, что ее поверхность имеет сферические углубления, располагающиеся на площадках между рифлений в шахматном порядке и имеющие различный диаметр по линейному закону, между соседними рифлениями основной теплообменной части (рис. 2) [20].

Использование пластин со сферическими технологическими углублениями повышает эффективность теплообмена между двумя жидкостями, так как они способствуют турбулентному потоку теплоносителя в теплообменнике, что увеличивает коэффициент теплопередачи.

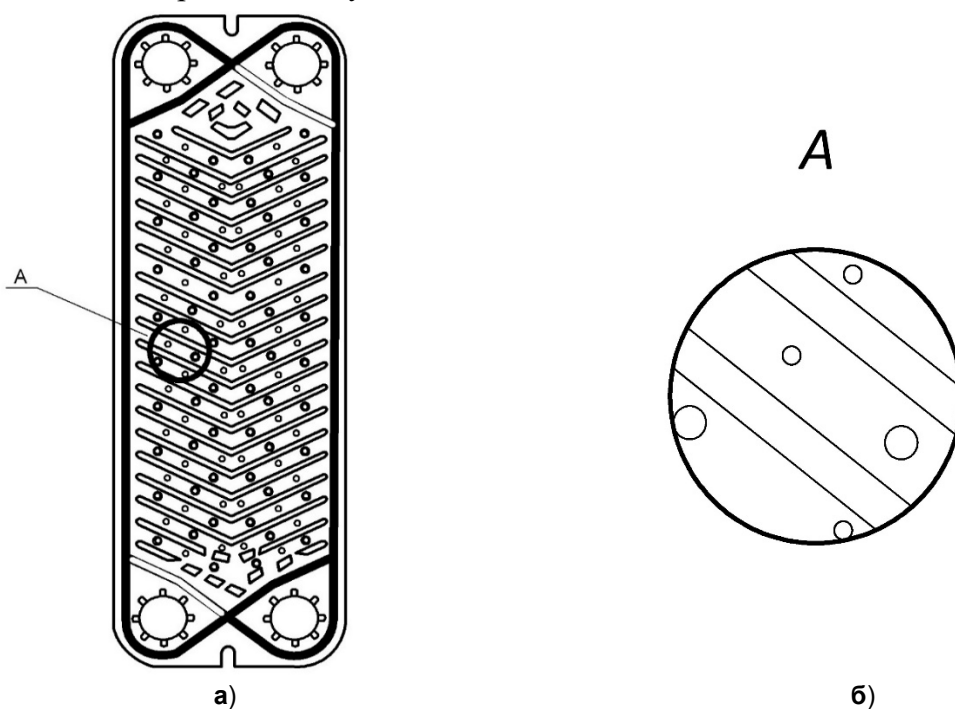


Рис. 2. Пластина: а – общий вид; б – вид А

Результаты и их обсуждение

Применение систем автоматического проектирования (САПР) существенно упрощает и ускоряет процесс разработки, позволяя работать с большим объемом информации и автоматически обрабатывать данные. В частности, разработка интенсифицированного пластинчатого теплообменного аппарата требует точной моделировки процессов теплооб-

мена, гидродинамики и других факторов, что невозможно без компьютерной поддержки. САПР также помогает увеличить точность и надежность проектирования, сокращает затраты на испытания и эксперименты, а также повышает конкурентоспособность продукции на рынке.

Основу процесса проектирования составляет алгоритм математической или экспериментальной модели, представленный на рис. 3 [16].

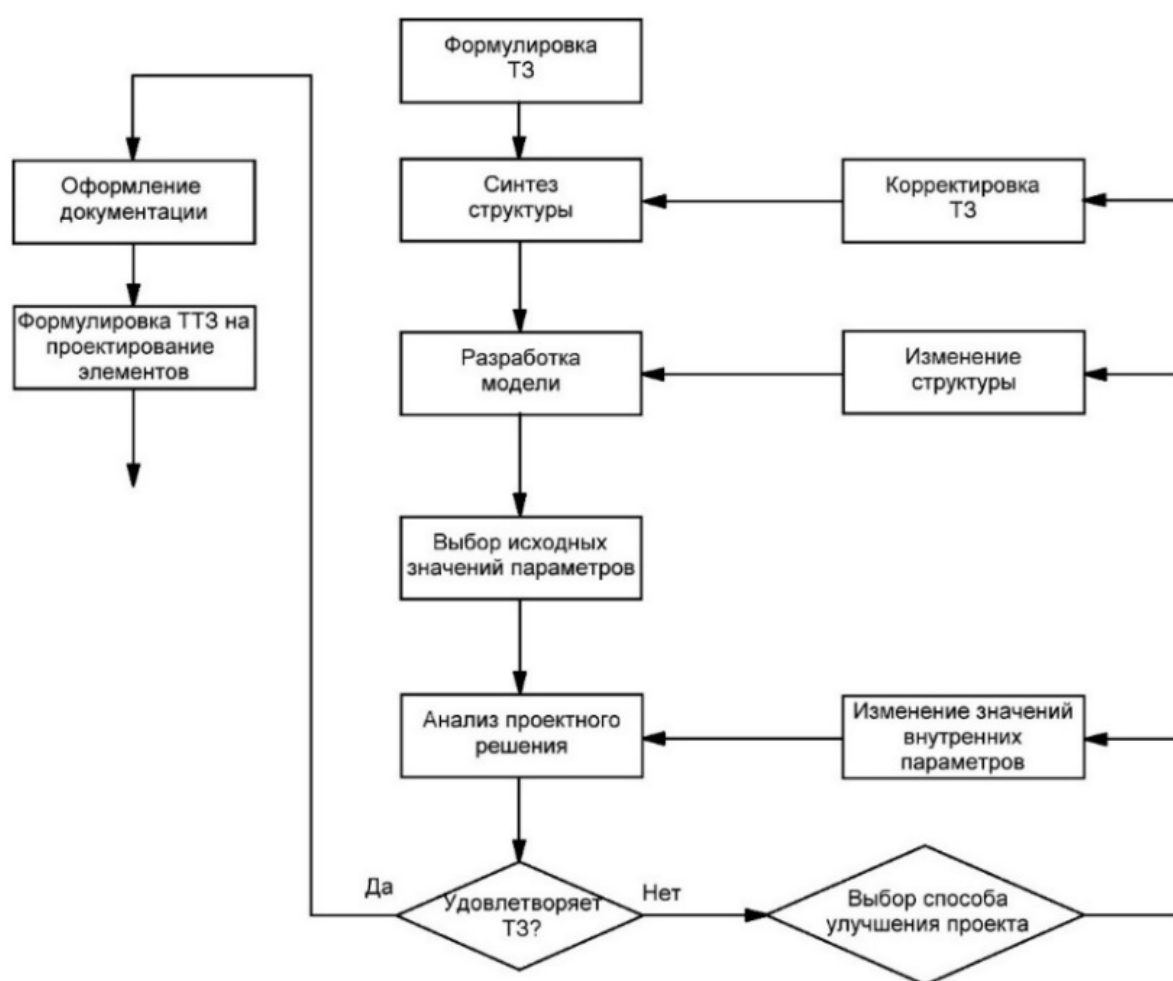


Рис. 3. Схема процесса проектирования

Математическое моделирование позволяет предсказывать поведение систем в различных условиях, оптимизировать

процессы и минимизировать риски. Это является неотъемлемой частью ряда научных и технических областей, от

физики и химии до экономики и биологии. Более того, математические модели часто вызывают новые идеи и гипотезы, которые можно проверить эксперимен-

тально [17-19]. Пример алгоритма математической модели представлен на рис. 4.

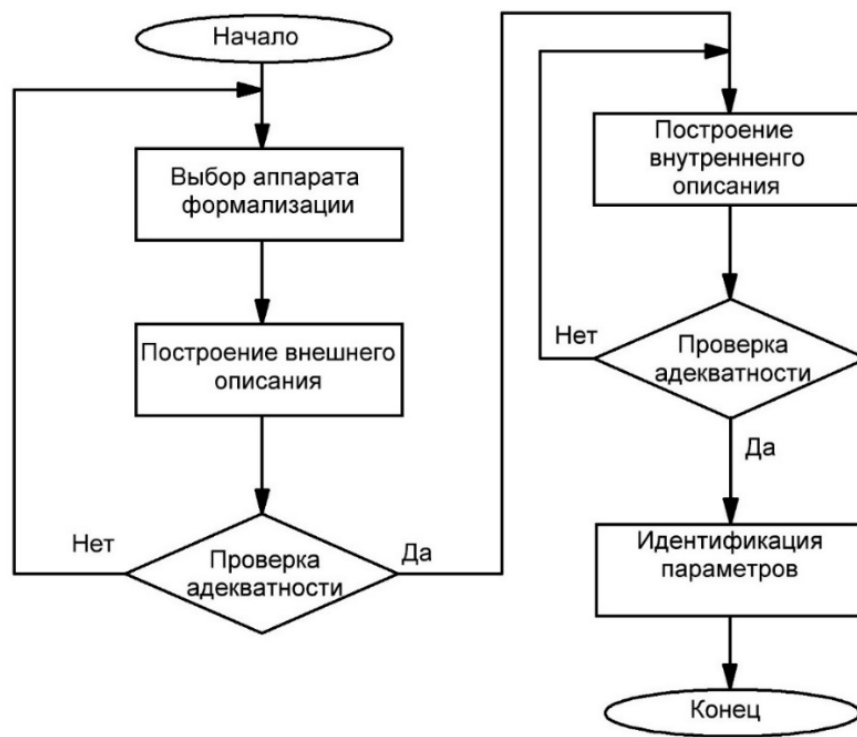


Рис. 4. Алгоритм процесса построения математической модели

Современные технологии в области компьютерного моделирования позволяют предсказывать поведение объектов и процессов в различных условиях, оптимизировать параметры систем и создавать более эффективные решения. Моделирование является важным инструментом для научных исследований, анализа экспериментов и проектирования новых технологических процессов и устройств. Оно позволяет сократить временные и финансовые затраты на проведение физических экспериментов и повысить точность получаемых результатов. Кроме того, моделирование позволяет предсказывать возможные

негативные последствия и разрабатывать меры по их устранению до реальной реализации проектов [21].

Главным шагом в процессе моделирования теплообменных процессов в программном комплексе «Ansys» является разработка двухмерной модели и ее дальнейшая интеграция в трехмерную модель. После этого, проводится анализ результата моделирования с помощью соответствующих техник и инструментов для оптимизации процесса теплообмена. В результате, процесс моделирования помогает определить наилучшие параметры для эффективного теплообмена. Для моделирования теп-

лообменных процессов необходимо руководствоваться следующими критериями устойчивости системы:

- плотность теплоносителей постоянна;
- $W_1 = 0,1 - 1,5$ м/с, где W_1 – скорость жидкости на входе;
- теплообмен с окружающей средой присутствует;

– движение жидкости происходит в поле силы тяжести ($g = 9,81$ м/с²);

– $W_2 = 0,1 - 1,5$ м/с, где W_2 – скорость жидкости на выходе;

– $p = 0,9$ МПа, где p – давление в трубопроводе.

Именно такой алгоритм позволяет полноценно оценить степень турбулизации потока теплоносителя на границе раздела фаз пластина-жидкость (рис. 5, 6).

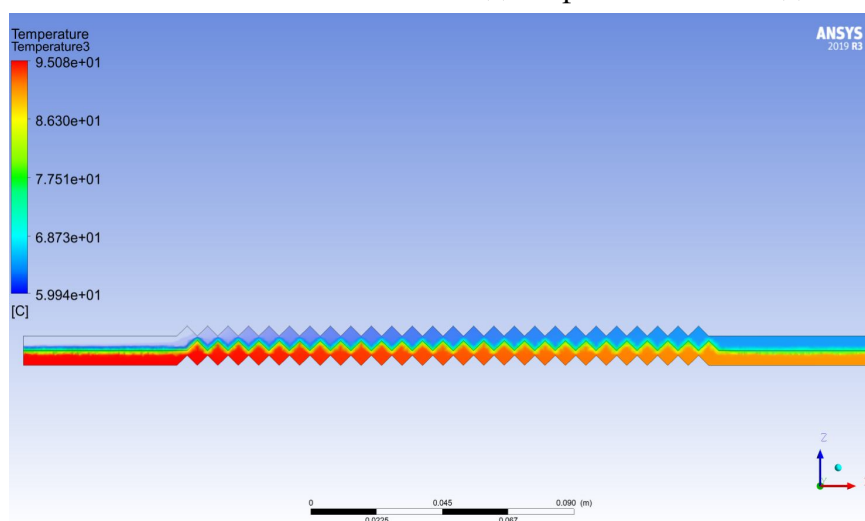


Рис. 5. Моделирование температурного распределения теплоносителя в модифицированном гофрированном канале (двухмерная модель)

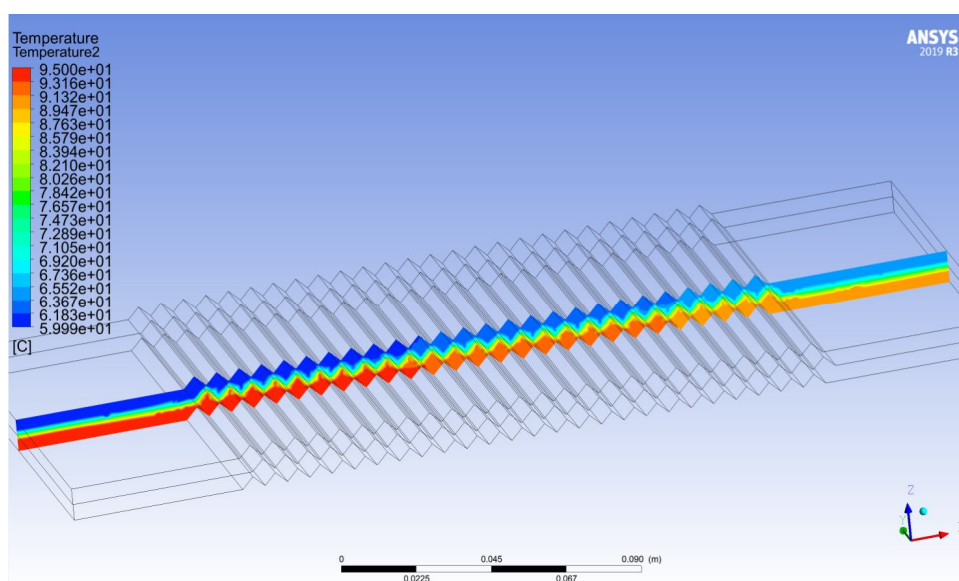


Рис. 6. Моделирование температурного распределения теплоносителя в модифицированном гофрированном канале (трехмерная модель)

Изучая результаты, полученные в ходе компьютерного моделирования распределения температуры в теплоносителе в гофрированном канале, были выявлены области вихревого движения, которые существенно влияют на повышение эффективности теплообмена и увеличение коэффициента теплопередачи. Эта информация может быть полезной для дальнейшего оптимизирования процесса теплообмена и повышения его эффективности.

Выводы

Использование предложенной оригинальной конструкции теплообменной пластины приводит к увеличению турбулизации теплоносителя, что подтверждается моделированием противоточного движения теплоносителей в греющем и нагреваемом контурах на основе созданной 3D-модели.

Список литературы

1. Доклад о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2020 г. // Министерство энергетики Российской Федерации [сайт], 2022. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22832> (дата обращения: 18.01.2023).
2. Башмаков И. А. Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения России // Новости теплоснабжения. 2008. Т. 2. С. 6-9.
3. Теплоснабжение населенных пунктов // Федеральная служба государственной статистики [сайт], 2022. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/jkh3.docx> (дата обращения 06.11.2022).
4. Кущев Л.А., Саввин Н.Ю., Якшин С.С. Современные способы повышения эффективности работы отопительных приборов в ЖКХ // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. Курск, 2020. С. 304-307.
5. Heat transfer and friction characteristics of turbulent flow through a circular tube with ball turbulators / W. Yuan, G. Fang, X. Zhang, Y. Tang, Z. Wan, S. Zhang // Applied sciences. 2018. Т. 8. №. 5. P. 776.
6. Семикашев В. В. Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // Всероссийский экономический журнал ЭКО. 2019. №. 9. С. 23-47.
7. Alfarawi S., Abdel-Moneim S.A., Bodalal A. Experimental investigations of heat transfer enhancement from rectangular duct roughened by hybrid ribs // International Journal of Thermal Sciences. 2017. Vol. 118. P. 123-138.
8. Интенсификация теплообмена / В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк, А.И. Довгялло, С.О. Некрасова, Д.А. Угланов, Д.В. Сармин. Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 208 с.

9. Круглов Г.А., Бакунин В.В., Андреева М.В. Теоретические исследования степени взаимосвязи турбулизации потока с коэффициентом теплоотдачи // Вестник КрасГАСУ. 2015. № 6. С. 67–73.
10. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
11. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. 497 с.
12. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
13. Kang C., Yang K. S. Characterization of turbulent heat transfer in ribbed pipe flow // Journal of Heat Transfer. 2016. Т. 138. №. 4. С. 41-50.
14. Maradiya C., Vadher J., Agarwal R. The heat transfer enhancement techniques and their thermal performance factor // Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2018. Vol. 7. №. 1. P. 1-21.
15. Song K., Tagawa T., Chen Z. Flow Symmetry and Heat Transfer Characteristics of Winglet Vortex Generators Arranged in Common Flow up Configuration // Symmetry. 2020. № 12. С. 38-44.
16. Куцев Л.А., Саввин Н.Ю. Тепловизионные исследования оригинальной пластины теплообменника // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. №. 1. С. 38-45.
17. Кулаков В.В., Каськов С.И. Экспериментальное исследование теплообменной поверхности с полусферическими выступами и впадинами // Будущее машиностроения России. 2018. С. 381-384.
18. Земсков А.А., Бакрунова Т.С. Способы интенсификации теплообмена // Актуальные проблемы энергетики АПК. Саратов, 2019. С. 110-111.
19. Alfarawi S., Abdel-Moneim S.A., Bodalal A. Experimental investigations of heat transfer enhancement from rectangular duct roughened by hybrid ribs // International Journal of Thermal Sciences. 2017. Т. 118. С. 123-138.
20. Патент на полезную модель № 200477 U1 Российская Федерация, МПК F28F 3/00. Пластина теплообменника: № 2020125892 : заявл. 04.08.2020 : опубл. 27.10.2020 / Н. Ю. Саввин, Л. А. Куцев, М. В. Серебrenикова, И. В. Волабуев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».
21. Экспериментальные исследования перспективных способов интенсификации теплопередачи в трубчатом теплообменнике / Б.О. Кустов, А.В. Бальчугов, А. В. Бадеников, М.В. Герасимчук, К.Д. Захаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. №. 3. С. 174-183.

Информация об авторах

Саввин Никита Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: n-savvin@mail.ru

Кущев Леонид Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: leokushev19@mail.ru

Уваров Валерий Антальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: tgv@bstu.ru

Окунева Галина Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: orynevagalina@mail.ru

Цифровые технологии для оценки и прогнозирования влияния пространственно-временного распределения парниковых газов на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных культур

О. А. Иващук¹, О. Р. Кузичкин¹, Д. В. Гончаров¹ , В. А. Дунаева¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

 e-mail: goncharov_dv@bsu.edu.ru

Резюме

Цель исследования: формирование банка моделей для осуществления имитационных экспериментов по оценке и прогнозированию значений концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы территории на основе аппарата искусственных нейронных сетей и ГИС-технологий. Рассматривается влияние повышенной концентрации диоксида углерода в приземном слое атмосферы на рост и развитие сельскохозяйственных растений, а именно на изменение фотосинтетической активности, уровня минерализации гумусового слоя почвы, что влияет на урожайность культур. Особенности сельскохозяйственного производства определяют актуальность создания и внедрения новой интеллектуальной технологии, которая обеспечивает возможность выявления оптимальных параметров растениеводства.

Методы. Формирование обучающей выборки для нейронной сети осуществлялось за счет численных экспериментов и методов математического моделирования. Для выбора лучшей топологии нейронной сети по прогнозированию концентрации парниковых газов на рассматриваемой территории были проведены эксперименты, которые позволили выявить среднеквадратическое отклонение и относительную погрешность. Для оценки прогностических способностей моделей были проведены натурные эксперименты по замерам концентраций CO₂ в приземном слое атмосферы на сельскохозяйственных территориях Белгородской области.

Результаты. Был разработан программный инструментарий, который позволяет визуализировать рассеивание и накопление парниковых газов в приземном слое атмосферы. Это позволяет проводить имитационные эксперименты, необходимые для определения территорий, которые находятся под воздействием техногенных источников. Была проведена оценка фотосинтетической активности растений на выбранной территории, что позволяет сформировать дальнейшие рекомендации по эффективному использованию сельскохозяйственной территории, направленные на повышение урожайности культур.

Заключение. Были рассмотрены парадигмы нейронных сетей, проведены эксперименты по выявлению лучшей топологии. Разработан программный инструментарий, позволяющий визуализировать рассеивание и накопление парниковых газов в приземном слое атмосферы для лиц, принимающих решения. Проанализированы воздействия техногенных факторов на фотосинтетический аппарат сельскохозяйственных растений, на основании которых сформулированы выводы и практические рекомендации по выращиванию сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: адаптация сельскохозяйственных территорий; повышение урожайности; парниковый эффект; цифровые технологии; моделирование; искусственные нейронные сети.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-20016) «Разработка и исследование интеллектуальной системы поддержки принятия решений по адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта».

Для цитирования: Цифровые технологии для оценки и прогнозирования влияния пространственно-временного распределения парниковых газов на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных культур / О. А. Иващук, О. Р. Кузичкин, Д. В. Гончаров, В. А. Дунаева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 29-44. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-29-44>.

Поступила в редакцию 03.02.2023

Подписана в печать 27.02.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Современный уровень развития информационных технологий, методов математического, ситуационного и компьютерного моделирования, средств автоматизации позволяет решать широкий спектр проблемных междисциплинарных вопросов, в частности, в сфере управления экологической ситуацией на различных территориях. Эффективность реализуемых управляющих воздействий при этом определяется достоверностью данных экомониторинга и прогнозирования, адекватностью выявленных причинно-следственных связей.

В научной литературе отечественными и зарубежными учёными, в том числе на основе исследований авторского коллектива, показана высокая эффективность применения аппарата интеллектуального моделирования, в частности искусственных нейронных сетей и нечёткой логики, при решении

разных задач по обработке экологических данных и прогнозированию динамики природных сред (например, в работах [1-3]). Особенно результативно использование технологий искусственного интеллекта при решении задач комплексной оценки ситуации, определяющейся совокупным влиянием текущего и/или прогнозного состояния нескольких компонентов биотехносферы, а также необходимостью нахождения путей сбалансированного управления с учётом как сохранения природной среды и ресурсов, так и обеспечения высокого уровня развития техники и технологии [4].

В настоящее время у научной общественности значительно вырос интерес к решению комплекса вопросов, связанных с влиянием парникового эффекта (ПЭ) как на изменения в природной среде, так и на хозяйственную деятельность человека [5]. Для проведения необходимых оценок необходимы дан-

ные о концентрации в приземном слое атмосферы рассматриваемой территории парниковых газов, прежде всего CO_2 . Данная информация может быть получена в результате инструментального мониторинга, однако это является трудозатратным, т.к. требует постоянное взятие проб воздуха (одновременно в нескольких точках), либо предполагает формирование центра по сбору данных, состоящего из множества специализированных газоанализаторов. Кроме того, для выработки научно обоснованного решения, необходима одновременная оценка параметров источников выбросов, а также прогноз динамики эмиссии. Таким образом, становится актуальной задача моделирования текущего и прогнозного распределения концентрации парниковых газов (ПГ) на рассматриваемых сельскохозяйственных территориях от источников техногенного воздействия в зависимости от различных параметров влияния внешней среды.

Различными учеными проводятся исследования по разработке методов и моделей для проведения оценок, и прогнозов изменения концентраций ПГ (углекислый газ, оксид азота, метан и т.д.) как от техногенных, так и от природных источников [6], а также для оценки и прогнозов изменений климата и соответствующих последствий [7]. При этом чаще всего рассматривается аспект ПЭ, негативно влияющий на экосистемы и здоровье людей.

Однако некоторые исследования указывают на положительное влияние,

оказываемое повышенной концентрацией CO_2 в приземном слое атмосферы на фотосинтетическую активность растений и последующее формирование урожайности [7, 8]. В среднем для всех видов сельскохозяйственных культур рост урожайности составляет около 26%, прирост сухого вещества молодых растений – около 40%.

Часть существующих методов может стать составляющей общего методологического инструментария для мониторинга, прогнозирования и управления в сфере выращивания сельскохозяйственных культур с достижением требуемых показателей урожайности с учётом динамики ПЭ. Однако необходим расширенный и одновременно детализированный спектр моделей и алгоритмов, позволяющих не только прогнозировать и оценивать уровень эмиссии, рассеивания и накопления ПГ, но и формировать адаптационные сценарии, определяющие наиболее результативные с точки зрения урожайности параметры посева сельскохозяйственных культур. Такие сценарии крайне важны для научного обоснования расположения территории и площади посевов, выбора специфики самой культуры, оценки ожидаемого эффекта.

Как указано выше, одним из перспективных методов прогнозирования и определения параметров территории является метод интеллектуального анализа данных. Вопросами развития современных методов и моделей в сфере экологического мониторинга и прогно-

зирования экологической ситуации посвящены исследования отечественных и зарубежных ученых [9, 10]. Результатами исследований является – оценка содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и почве рассматриваемой территории, качество акустической среды и др., что является основой формирования информационной обеспеченности процесса управления территориальным зонированием на принципах экологической безопасности.

В данном исследовании авторами поставлена научная задача формирования банка адаптационных моделей для осуществления имитационных экспериментов по оценке и прогнозированию значений концентрации ПГ в приземном слое атмосферы территории с выявлением особенностей рассеивания и зон накопления на основе аппарата искусственных нейронных сетей и ГИС-технологий.

Материалы и методы

Для построения и апробации моделей исследовалась территория Белгородской области РФ, которая охватывает чуть более 27 тыс. км² площади, на

которой проживает более 1,5 млн. человек. Регион входит в пятёрку лидеров страны в аграрной отрасли.

По данным управления Росприроднадзора по Белгородской области по состоянию на конец 2022 года зарегистрировано около 430 предприятий, осуществляющих эмиссию выбросов в атмосферу, которая определяет динамику ПЭ. Ежегодно в регионе регистрируется около 200 тыс. тонн выбросов вредных веществ в атмосферу, из которых 70% приходится на промышленность, а остальные 30% на транспорт. Для определения направления распространения и накопления ПГ на территории Белгородской области была проанализирована «роза ветров» (рис. 1). Согласно данным за 2022 год, полученным от метеостанций Валуйки, Готня и метеостанции Научно-образовательного центра «Ботанический сад НИУ «БелГУ».

Анализ диаграмм указывает на равновероятное распределение направлений ветра по сторонам света: северное – 15%; северо-восточное – 15%; восточное – 14%; юго-восточное – 9%; южное – 10%, юго-западное – 12%; западное – 12%; северо-западное – 13%.

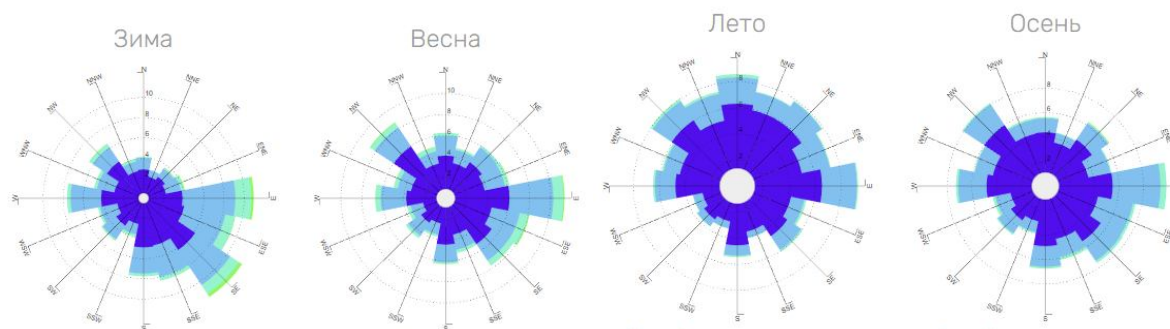


Рис. 1. Среднегодовая «Роза ветров» Белгородской области

В рамках исследования был проведен анализ источников и структуры выбросов ПГ в Белгородской области. Приземной слой атмосферы области загрязнен неравномерно, а максимальная концентрация ПГ находится в зоне источника выброса. По интенсивности выбросов можно выделить следующие 3 группы территориальных единиц:

- максимальный, преобладание выбросов промышленности (г. Губкин, г. Старый Оскол, г. Валуйки);
- умеренный, преобладание выбросов транспорта (г. Белгород);

– низкий, минимальные показатели выбросов (Вейделевский район, Красненский район, Ровеньской район).

Так, распределение источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на территории Белгородской области представлено на рис. 2.

Научные исследования указывают, что углекислый газ является основным антропогенным загрязнением, выбрасываемым в атмосферу в результате выполнения различных промышленных процессов [11, 12].

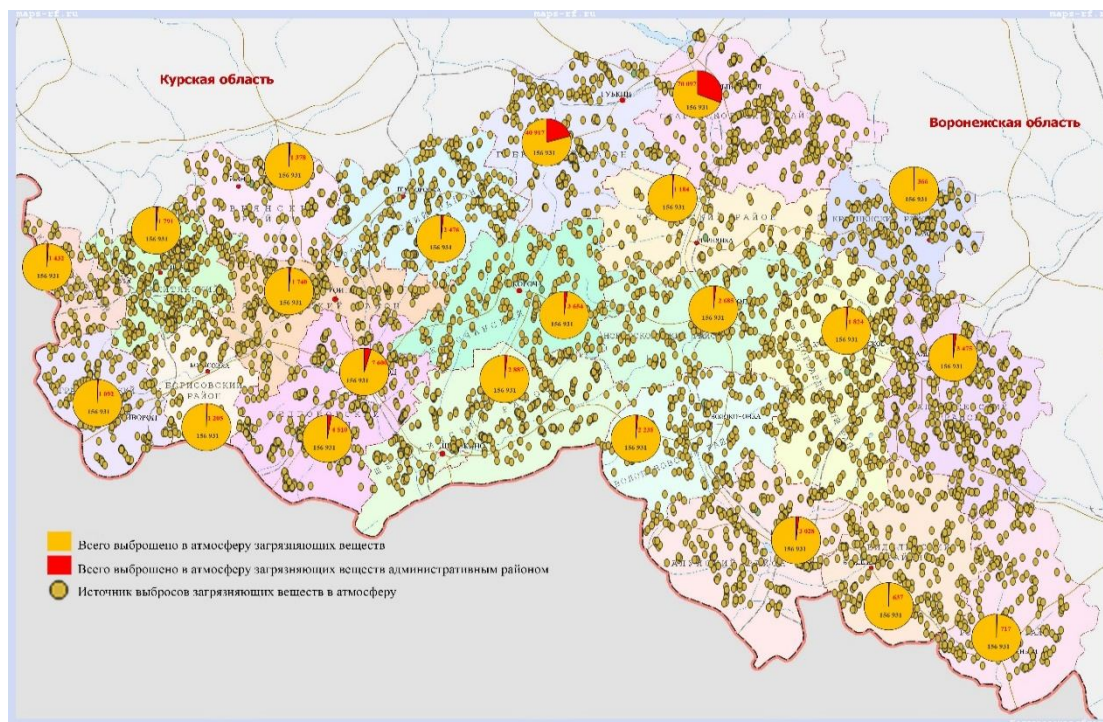


Рис. 2. Распределение источников выбросов на территории Белгородской области

Общая концентрация углекислого газа в атмосфере по сравнению с другими ПГ (CH_4 , O_3 , N_2O) является наибольшей. Ее ежегодное увеличение также обусловлено долгим временем жизни. На данный момент концентра-

ция углекислого газа в атмосфере в среднем составляет около 395 ppm. Однако у большинства растений наибольший прирост фитомассы достигается при концентрации CO_2 свыше 400 ppm.

Определение концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, в настоящее время, описывается «Методикой расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, ОНД-86» [13]. Однако при расчете концентрации загрязняющих веществ от двух и более источников, в случае неоднородности выбросов, данная расчетная методика обладает значительной степенью погрешности – около 30%. Так, использование искусственных нейронных сетей, которые способны к обобщению и позволяют учесть скрытые зависимости между выбросами от разных источников, а также адаптировать методику к топологическим, геологическим и атмосферным особенностям является целесообразным решением для преодоления данного недостатка [14, 15].

В качестве входных параметров модели были выбраны показатели, характеризующие источник выбросов загрязняющих веществ, $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$:

x_1 – объемный расход выбросов ($\text{м}^3/\text{ч}$);

x_2 – скорость газа ($\text{м}/\text{с}$);

x_3 – скорость ветра ($\text{м}/\text{с}$);

x_4 – расстояние от точек выброса загрязняющих веществ до исследуемой сельскохозяйственной территории (м).

Выходными параметрами модели Y были определены концентрации основных ПГ в приземном слое атмосферы $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$, $\text{мг}/\text{м}^3$: y_1 – углекислый газ (CO_2), y_2 – метан (CH_4), y_3 –

озон (O_3), y_4 – оксид азота (N_2O). Выбор данных загрязняющих веществ обусловлен тем, что именно они являются основными газами, оказывающими влияние на динамику ПЭ.

Для формирования обучающей выборки интеллектуальной системы определения концентрации CO_2 в приземном слое атмосферы рассматриваемой сельскохозяйственной территории, авторским коллективом проведены имитационные эксперименты с использованием методов расчета и рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосфере на основе подхода для расчета суммарного поля концентрации загрязняющих веществ от одиночных и множественных однообразных источников [16]. Проведено моделирование и визуализация с использованием геоинформационных систем качества атмосферного воздуха с привязкой к пространственным данным.

В соответствии с выбранной методикой, распределение рассеивания и накопления ПГ в приземном слое атмосферы от одиночного источника выбросов загрязняющих веществ определяется для множества точек в пространстве по направлению оси выброса от источника, где распространение выбросов соответствует направлению ветра [13].

Для определения концентрации ПГ на рассматриваемой сельскохозяйственной территории (1) при условиях, отличных от u_{max} , используется расчет выброса от точечного источника, расположенного на расстоянии x_{max} (2).

$$c_{\max} = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt{\frac{\pi D^2}{4}} \omega_0 \Delta T}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, определяющий условие горизонтального и вертикального рассеивания и накопления ПГ в атмосфере, также зависящий от температурной стратификации атмосферы; M – масса выбрасываемых ПГ в атмосферу в единицу времени; F – безразмерный коэффициент, описывающий скорость оседания ПГ в атмосферном воздухе; m и n – безразмерный коэффициент, учитывающий условия выбросов; η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности; H – высота источника выброса; D – размер, характеризующий диаметр факела выбросов; ω_0 – средняя скорость выхода выбросов из источника; ΔT – разность температур выброса и атмосферного воздуха.

$$x_{\max} = \frac{(5-F)dH}{4}, \quad (2)$$

где d – безразмерный коэффициент, который зависит от характеристик источника выбросов. Концентрация ПГ c_y на оси факела точечного источника определяется как геометрическое место то-

чек в пространстве на различных расстояниях x от источника выброса вычисляется по формуле

$$c_y = \frac{s_1 c_{\max}}{(1+5t_y+12.8t_y^2+17t_y^3+45.1t_y^4)^2}, \quad (3)$$

где s_1 – безразмерный коэффициент, определяемый отношением $x/x_{\max}$ и коэффициента F .

$$t_y = \frac{uy^2}{x^2} \quad (4)$$

при $u \leq 5 \text{ м/с}$,

$$t_y = \frac{5y^2}{x^2} \text{ при } u > 5 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Расчет суммарной концентрации ПГ на рассматриваемой территории, если выбросы однородны, определяется как сумма концентраций выбрасываемого CO_2 от отдельных источников при заданных параметрах направления и скорости ветра.

$$c = c_1 + c_2 + \dots + c_N. \quad (6)$$

Таким образом для определения концентрации ПГ на рассматриваемой территории вычислялись поля концентраций ПГ от каждого источника с одинаковыми начальными условиями. Моделирование и визуализация выбросов показана на рис. 3.

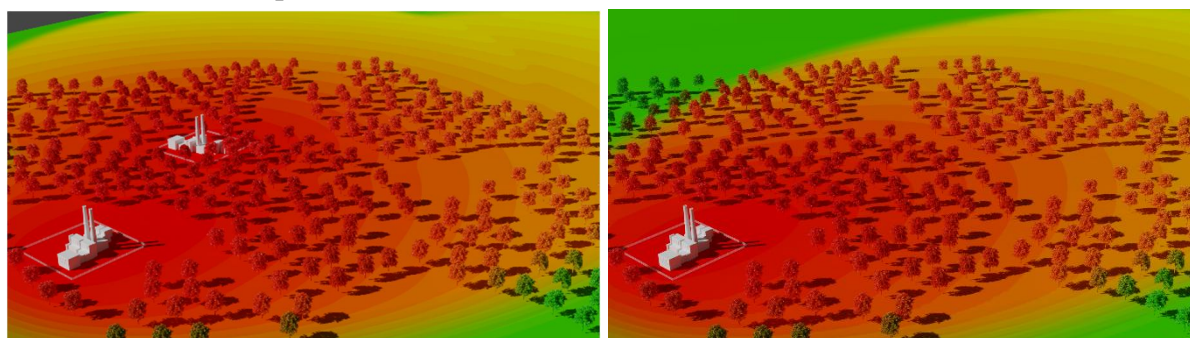


Рис. 3. Распространение ПГ при заданном ветре от одного и нескольких источников

Задача построения модели рассеивания и накопления ПГ в приземном слое атмосферы сводится к решению задачи аппроксимации. Для решения задач такого класса эффективно исполь-

зуются нейронные сети с топологиями многослойного персептрона (рис. 4) и с радиально-базисной функцией активации (рис. 5).

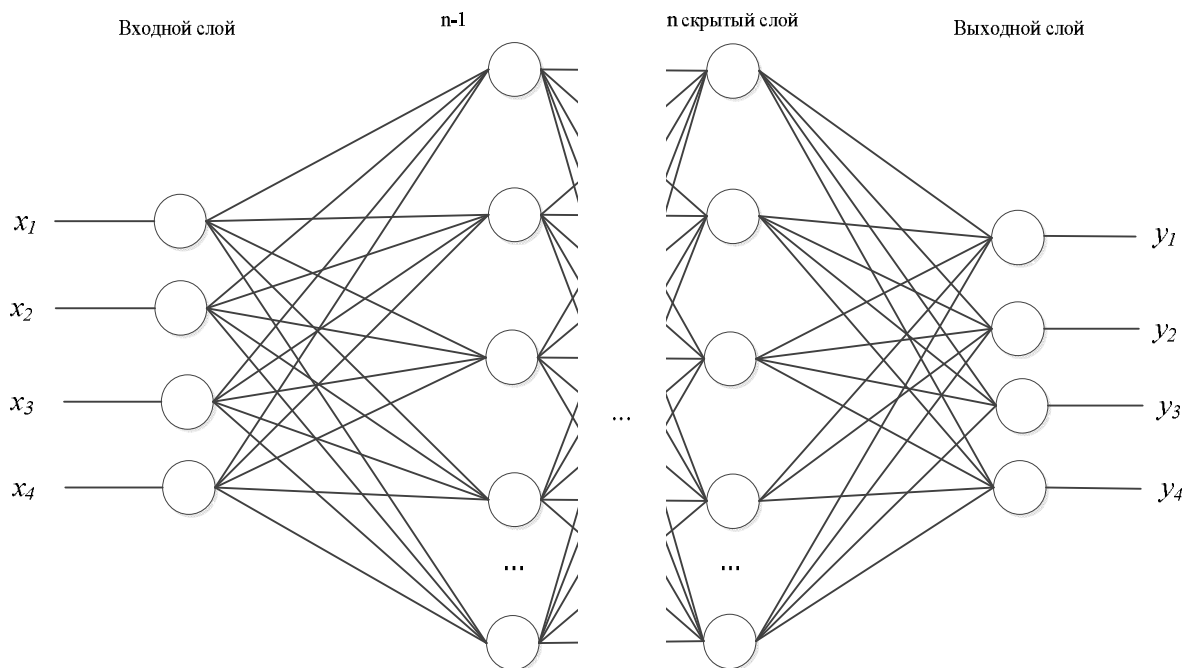


Рис. 4. Структура многослойного персептрона

Структура нейронной сети с топологией многослойного персептрона состоит из:

1. Входного слоя, на который поступает вектор входных значений $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ – слой, который принимает информацию о характеристиках выбросов стационарными источниками, находящимися на близлежащих территориях;
2. Скрытые слои взаимодействуют с внешней средой и характеризуют процессы рассеивания и накопления ПГ в приземном слое атмосферы;

3. Выходной слой выдает вектор $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$, содержащий концентрации ПГ в приземном слое атмосферы.

Структура нейронной сети с радиально-базисной функцией активации состоит из:

- Первый слой нейронов обрабатывает вектор входных значений $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ и определяет степень близости каждого значения к центрам радиально-базисных функций;
- Выходной слой – это линейные комбинации выходов первого слоя $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$.

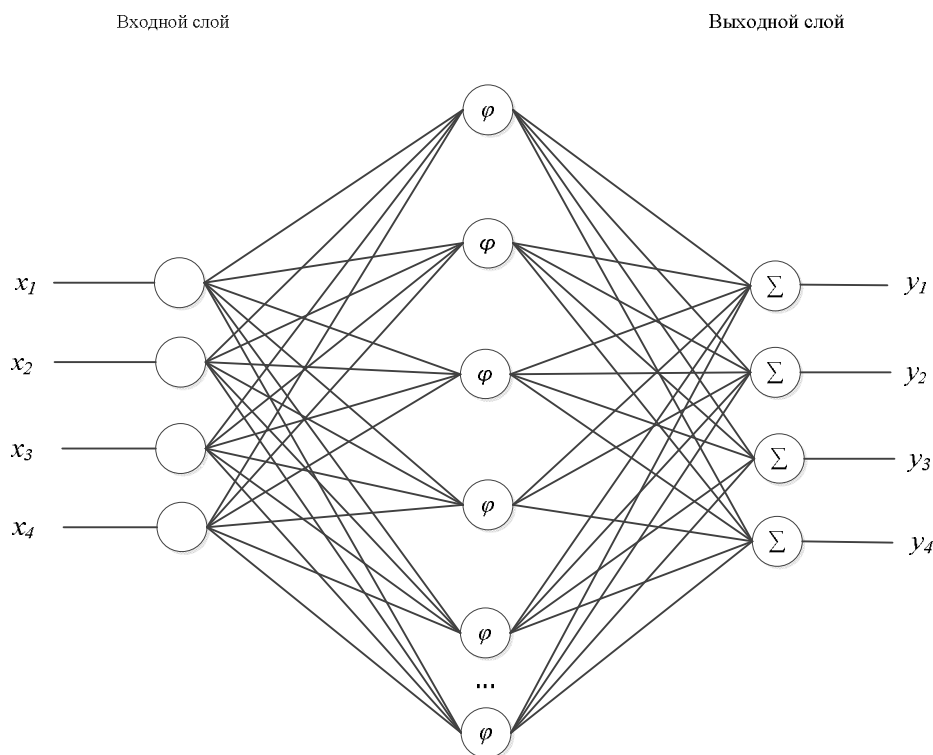


Рис. 5. Структура сети с радиально-базисной функцией активации

Для определения лучшей топологии нейронной сети были проведены эксперименты, в которых адекватность модели определялась по следующим показателям: среднеквадратичная ошибка S (7); коэффициент детерминации R^2 (8); средняя ошибка аппроксимации (9). В табл. 1 приведены результаты моделирования экспериментов для определения лучшей топологии нейронной сети по прогнозированию концентрации ПГ на рассматриваемой сельскохозяйственной территории ($S, R^2, \bar{A}$) [1, 2].

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{z}_i - z_i. \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{z}_i - z_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - \bar{z}_i)^2}. \quad (8)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{z}_i - z_i}{\hat{z}_i} \right|. \quad (9)$$

Кроме того, для оценки прогностических способностей представленных моделей были проведены натурные эксперименты. С использованием газоанализатора ПКУ-4(-В-01, /1-МК-С-Н) проведены замеры концентраций CO_2 в приземном слое атмосферы на сельскохозяйственных территориях Белгородской области. Далее проводились имитационные эксперименты с использованием всех построенных и обученных ИНС с теми же входными данными и вычислением средней ошибки $\bar{A}_t$ (9), показаны в табл. 1.

Лучший результат показала нейронная сеть с топологией многослойного персептрона (2 скрытых слоя, 4 и 20

нейронов соответственно) и сигмоидными функциями активации. Структура модели показана на рис. 6.

Таблица 1. Результаты экспериментов для определения лучшей топологии нейронной сети по прогнозированию концентрации ПГ на рассматриваемой сельскохозяйственной территории

Топология сети	Количество нейронов в скрытом слое	Функция активация нейронов скрытого слоя	$S, 10^{-5}$	$R^2, \%$	$\bar{A}_l, \%$	$\bar{A}_t, \%$
RBF	143	Радиально - базисная	0,1	99,89	0,90	3,12
Персептрон	9	Линейная	0,18	99,72	0,92	2,36
Персептрон	11	Линейная	0,14	99,87	0,77	4,64
Персептрон	15	Линейная	0,15	99,82	0,82	4,12
Персептрон	17	Линейная	0,19	99,75	0,88	4,18
Персептрон	19	Линейная	0,2	99,58	0,92	3,48
Персептрон	8	Сигмоидная	0,16	99,88	0,93	2,35
Персептрон	12	Сигмоидная	0,12	99,86	0,94	2,44
Персептрон	13	Сигмоидная	0,14	99,88	0,97	2,39
Персептрон	20	Сигмоидная	0,17	99,85	0,98	2,32

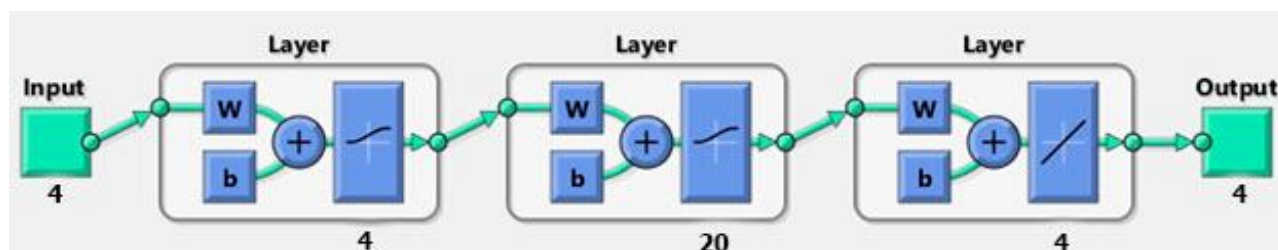


Рис. 6. Структура полученного многослойного персептрона, реализованная в системе MATLAB

Результаты и их обсуждение

Была разработана программная реализация с удобным пользовательским интерфейсом, которая позволяет проводить эксперименты специалистам предметной области, не обладающим специальными знаниями в сфере ИТ и моделирования, визуализировать техниче-

ские и природные ситуации для лиц, принимающих решения.

В связи с возросшей популярностью веб-приложений и необходимостью работы с растровыми и векторными геоданными для программной реализации, описанного выше алгоритма, был выбран язык программирования JavaScript. Библиотека Leaflet позволяет

пользователю осуществлять выбор сельскохозяйственной территории для проведения исследований и визуализировать результаты моделирования. Для более удобной и простой разработки веб-приложения в качестве фреймворка был выбран ReactJs, который также имеет модули для работы с картами. На рис. 7 приведен результат разработки веб-приложения.

Для проверки расчетов концентраций ПГ в приземном слое атмосферы веб-приложением было осуществлено 200 проб воздуха на сельскохозяй-

ственной территории. Проверочные эксперименты указывают на достоверность получаемых данных.

При определении источников выбросов также учитывались санитарно-защитные зоны, которые определяют возможность ведения сельскохозяйственной деятельности. Это позволяет исключить сельскохозяйственные территории, почва которых загрязнена такими веществами, как: медь, свинец, никель, хром, мышьяк, бензол, бензопирен и др.

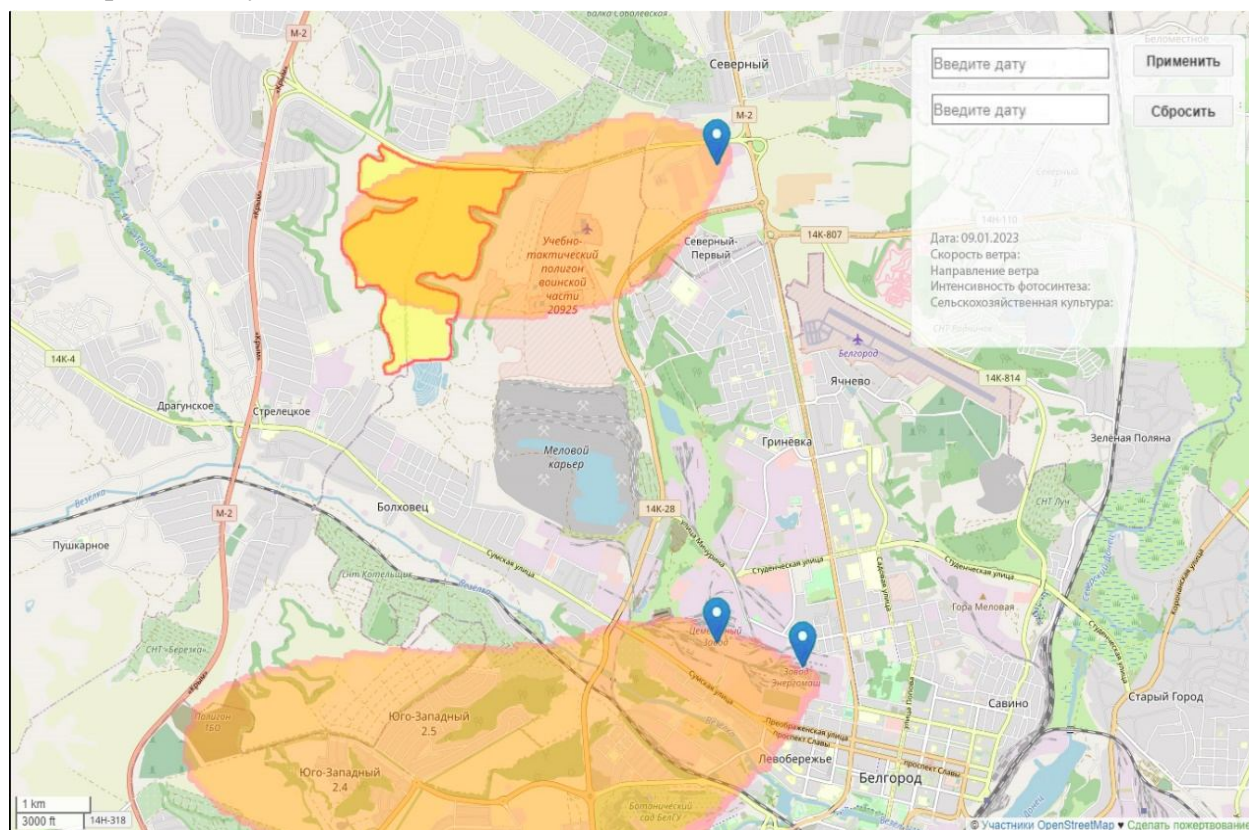


Рис. 7. Интерфейс веб-приложения

Проведённый имитационный эксперимент позволил определить территории, которые находятся под воздействием техногенных источников. Для

исследования была выбрана сельскохозяйственная территория, показанная на рис. 5. Пробы воздуха фиксируют увеличенную концентрацию CO_2 в призем-

ном слое атмосферы в дневной период, так, в период с 11:00 до 15:00 происходит увеличение концентрации углекислоты в атмосфере от 400 – 750 ppm.

Увеличенная концентрация CO_2 в приземном слое атмосферы может положительно сказаться на увеличении урожайности и приросте сухого вещества сельскохозяйственных растений [17, 18]. В связи с периодическим воз-

растанием концентрации ПГ для более детальной характеристики работы фотосинтетического аппарата растений в условиях динамики ПЭ, полученные данные были проанализированы с помощью модели Фаркьюхара [19], которая позволяет детально проанализировать воздействие техногенных факторов на фотосинтетический аппарат сельскохозяйственных растений (табл. 2).

Таблица 2. Результаты воздействия техногенных факторов на фотосинтетический аппарат сельскохозяйственных растений

Параметры	Время измерения			
	11:00	13:00	15:00	17:00
Скорость темнового выделения CO_2	2,4 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	4,9 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	3,2 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	1,7 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
Эффективность введения карбоксильной группы в органические соединения	0,9 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ Па^{-1}	1,9 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ Па^{-1}	2 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ Па^{-1}	0,5 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ Па^{-1}
Максимальная скорость введения карбоксильной группы в органические соединения	29 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	48 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	22 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	20 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
Скорость электронного транспорта при световом насыщении	55 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	75 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	63 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	60 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
Скорость утилизации триозы	3,3 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	4,6 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	4 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	9 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
Максимальная скорость поглощения CO_2	18 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	20 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	23 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	25 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$

Увеличение активности рибулозобисфосфаткарбоксилаза было зафиксировано в течение световой части дня, максимальное значение составляло около 37 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (в 13:00), что на 30%

выше, чем при естественной концентрации углекислоты к концу измерений в 17:00. Приспособленность растений к изменяющимся условиям позволяет обес-

печить эффективное использование повышенной концентрации ПГ.

Практика передовых хозяйств показывает, что наивысшая продуктивность может быть достигнута при создании совокупности оптимальных условий роста и развития растений [20]. Таким образом, повышение урожайности сельскохозяйственных культур может быть связано с улучшением характеристик фотосинтетического аппарата листа и посева в тесной взаимосвязи с оптимизацией роста и распределения биомассы между органами растения с учетом онтогенетической динамики продукционного процесса.

Выводы

В результате проведенных исследований была построена нейросетевая мо-

дель, которая позволяет прогнозировать концентрацию ПГ в приземном слое атмосферы, рассматриваемой сельскохозяйственной территории. Были рассмотрены парадигмы искусственных нейронных сетей, проведены проверочные эксперименты, а которых лучший результат показала сеть с топологией многослойного персептрона.

Разработана программная реализация предложенной нейросетевой модели, которая позволяет проводить имитационные эксперименты по оценке фотосинтетической активности растений в условиях динамики ПЭ. Для конкретной сельскохозяйственной территории Белгородского региона сформированы практические рекомендации по выращиванию культур.

Список литературы

1. Федоров В. И., Иващук О. А., Ужаринский А. Ю. Разработка модели оценки и прогнозирования состояния почв сельско-городских территорий на основе искусственной нейронной сети // Научный результат. Информационные технологии. 2017. Т. 2. №. 4. С. 3-9.
2. Федоров В. И., Иващук О. Д., Долинский А. А. Разработка методов поддержки принятия решений при градостроительном зонировании сельско-городских территорий с использованием оценки качества почв // Успехи современного естествознания. 2019. №. 7. С. 127-132.
3. Штана А. И. Модель прогнозирования состояния почв сельско-городских территорий на основе нейронных сетей // Студенчество России: век XXI. Орел, 2019. С. 664-673.
4. Ivashchuk O.A., Fedorov V.I., Goncharov D.V. Approaches to the Development of an Automated Control System for the Adaptation of Agricultural Areas under the Changing

Greenhouse Effect // Mathematical Statistician and Engineering Applications. 2022. Vol. 71, №. 3s2. P. 948-956.

5. Албегов Р.Б., Гагиева С.С. Изменение климата Северного Кавказа. Возможные угрозы и ответные меры // Вестник МАНЭБ. 2010. Т. 15, № 4. С. 162-167.

6. Метешкин К. А., Кутицкая Е. С. Задача геомоделирования загрязнений урбанизированных территорий // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2010. Т. 23. №. 2. С. 183-189.

7. Бисchoков Р. М., Суханова С. Ф. Основные факторы, оказывающие влияние на биологические объекты // Научно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса в реализации Государственной программы развития сельского хозяйства до 2020 года. Курган, 2019. С. 413-418.

8. Прядкина Г.А. Пигменты, эффективность фотосинтеза и продуктивность пшеницы // Plant Varieties Studying and protection. 2018. Vol. 14, no 1.

9. Исследование загрязнения окружающей среды от выбросов вредных веществ промышленных предприятий с учетом климатических особенностей региона / К. В. Гармонов, Т. В. Щукина, М. Н. Жерлыкина, О. Б. Кукина // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2017. №. 3. С. 84-92.

10. Developing a framework to assess the long-term adoption of renewable energy technologies in the electric power sector / S. Radpour, E. Gemechu, M. Ahiduzzaman, A. Kumar // The effects of carbon price and economic incentives Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. № 111663. P. 152.

11. Коданева С. И. Потенциал цифровых технологий для смягчения последствий и адаптации к изменению климата // Россия и современный мир. 2022. №. 1 (114). С. 63-85.

12. Kenneth H., Brian V. M., Iva R. S. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 102. P. 1-13.

13. Куракина Н. И., Мышко Р. А. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами в технологии геоинформационных систем // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ. 2021. №. 5. С. 21-27.

14. Томакова Р.А., Филист С.А., Яа З.До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 44-50.

15. Дрейзин В.Э., Гримов А.А. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 2-3. С. 223-228.

16. Вологжина С. Ж. Оценка загрязнения воздушного бассейна г. Улан-Удэ // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2011. Т. 1. С. 48-59.

17. Орлова И.В. Функциональное зонирование земель сельскохозяйственного назначения для целей сбалансированного природопользования // Фундаментальные исследования. 2014. №5.

18. Бисчоков Р. М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур для Кабардино-Балкарской Республики с использованием аппарата нечеткой логики // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2020. Т. 15. №. 2. С. 123-133.

19. Салимов Д. С., Эргашев А., Абдулоев А. Влияние повышенных концентраций CO₂ и других стрессовых экологических факторов на продуктивность и содержание крахмала белка в зерне различных сортов пшеницы // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2015. №. 1-5-2. С. 23-28.

20. Ивашук О. А., Федоров В. И., Гончаров Д. В. Разработка метода и алгоритма оценки сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта // Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция "ИТНО 2022"): Сборник научных трудов X Юбилейной международной научно-практической конференции, с. Дивноморское, 26 сентября – 02 2022 года / редкол.: Ю.Ф. Лачуга [и др.]. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2022. С. 232-236. DOI 10.23947/itse.2022.232-236. EDN RPYVRU.

Информация об авторах

Ивашук Ольга Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: ivaschuk@bsu.edu.ru, SPIN-код: 143923, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9383-9141>

Кузичкин Олег Рудольфович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: kuzichkin@bsu.edu.ru, SPIN-код: 168062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0871-8896>

Гончаров Дмитрий Викторович, старший преподаватель кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: goncharov_dv@bsu.edu.ru, SPIN-код: 1064632, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0499-0913>

Дунаева Виктория Александровна, студент кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: dunaeva@bsu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6065-9996>

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-45-58>

Разработка системы управления технологической линией для производства изделий из вспененного полистирола

И. А. Рыбин¹, А. В. Рыбина¹ ✉

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Резюме

Цель исследования. При проектировании новых и модернизации существующих систем управления процессом вытягивания полимеров важную роль играет решение задач создания математических или имитационных моделей и синтеза алгоритмов управления, обеспечивающих снижение доли ручного труда. В статье приведен обзор подходов к разработке и моделированию систем автоматизированного управления экструзионными технологическими линиями производства изделий из полимеров. Рассмотрена возможность разработки и моделирования многомерной системы управления процессом вытягивания вспененного полистирола на основе пакета математического анализа Matlab. Актуальность темы исследования связана с тенденцией роста рынка потребления и реализации управления в условиях создания более сложных форм упаковки из полимеров.

Методы. Для разработки системы управления и ее анализа применены основы теории многомерных систем в задачах управления, теории переработки пластических масс, методы компьютерного моделирования систем управления.

Результаты. В статье представлен алгоритм управления процессом формования и его реализация в среде Simulink. Приведены и проанализированы графики изменения скорости вытягивания и скорости намотки, изменения толщины и натяжения полотна во времени. Представлена схема автоматизации технологической линии на основе разработанного алгоритма.

Заключение. Результаты тестирования модели показывают, что применение математического моделирования системы управления вытягиванием полотна пенополистирола возможно для решения вопроса повышения эффективности производства на действующем оборудовании, что и позволит приблизить их характеристики к новым технологическим линиям, оставив механическую часть без изменений. Значимость работы обусловлена тем, что применение современных систем управления позволяет улучшить качество изготавливаемой продукции, снизить расход сырья. Материалы и методики исследования могут быть применены при разработке проектов для других установок, например при производстве оптического полотна.

Ключевые слова: экструзия; полимеры; виртуальная модель; процесс формования; система управления; Matlab.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Рыбин И. А., Рыбина А. В. Разработка системы управления технологической линией для производства изделий из вспененного полистирола // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 45-58. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-45-58>.

Поступила в редакцию 16.01.2023

Подписана в печать 12.03.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Процесс получения изделий из полимеров известен с первой половины двадцатого века, промышленность требует все более развитых технологий и глубоких познаний в области применения пластмасс, пищевой и фармацевтической промышленности. Однако до сих пор имеется только ограниченная информация об аналитических вычислениях в области экструзии. Решения по управлению, принимаемые операторами на основе субъективной визуальной оценки качества экструдата, приводят к увеличению времени перенастройки линий, снижению производительности, повышению доли брака и энергозатрат. Как правило, производство выполняется на основе эмпирического опыта и методов проб и ошибок. Тем не менее современные технологии позволяют развивать промышленные операции на порядок лучше и быстрее благодаря моделированию соответствующих процессов, где экструзионный поток расплавов полимеров и волокон уже был подвергнут предварительным исследованиям. В связи с возрастанием функциональных возможностей вычислительной техники и совершенствованием программных средств становится возможным развитие новых подходов к управлению комплексами экструдеров. При этом важно учитывать, что большая часть дефектов готовых из-

делий вызвана отклонениями от оптимального режима формования. Решение данной задачи возможно с помощью разработки математических моделей систем управления объектами, обеспечивающих заданное качество изделий при выполнении требований к производительности. Математическое моделирование необходимо для предварительной настройки и оценки эффективности разработанного алгоритма управления. Кроме того, процесс производства изделий из пенополистирола может быть организован как полностью замкнутый безотходный контур, что очень важно с точки зрения экологической безопасности. Таким образом, целью данного исследования является повышение качества вырабатываемой продукции за счет автоматизации процесса формования вспененной полистирольной ленты с использованием методов математического моделирования.

Для повышения точности вытягивания и уменьшения издержек на производстве необходимо исследование параметров вытягивания. Известно большое количество научных работ по исследованию параметров и получению математических моделей экструдера¹ [1-5]. Так в работе [2] определена пере-

¹ Сагиров С.Н. Мехатронный комплекс экструзионной обработки полимеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2012. 17 с.

даточная функция экструдера между выходным давлением и угловой скоростью вращения червяка относительно рабочей точки устройства и представлена структурная схема согласно полученным уравнениям. Исходя из анализа работ, определены физико-химические свойства экструзионного процесса, но задача обобщенного представления экструдера как объекта управления остается нерешенной. Из литературных данных получены графики зависимостей температур в зонах экструдера. Физические процессы, протекающие при вытягивании пенополистирола, подобны процессам, происходящим при вытягивании оптического волокна. Проблемам разработки математических моделей процесса экструзии посвящены работы ряда авторов: Беляевой Н. А., Прянишниковой Н. А., Орлова С. П., Соколовой Т. В.¹ и др.² [6-8]. Вопросы совершенствования систем автоматизированного управления экструзионными процессами остаются актуальными, так в работе¹ определены коэффициенты передачи от скоростей вытяжки и подачи и представлена система управления на базе сервоприводов с двумя контурами «скорость вытягивания-диаметр полот-

на» и «скорость подачи-диаметр полотна» для низкоскоростного и высокоскоростного режима. По итогам обзора литературных источников были подобраны параметры экструдера, определены графики зависимостей коэффициентов передачи от скоростей вытяжки и подачи. В настоящей работе будет представлена двумерная компьютерная модель зоны формирования полотна из вспененного полистирола, реализованная в системе Matlab/Simulink, и схема автоматизации процесса управления для исследуемого предприятия.

Материалы и методы

Технологический процесс производства упаковок из пенополистирола на предприятии включает циклическое повторение следующей последовательности этапов: получение смеси из нового и вторичного полистирола, добавление в смесь изобутана и вытягивание, намотка в рулоны, отстаивание рулонов, размотка рулонов, формование, прокол форм, вырубка форм, дробилка остатков, регланулирование остатков (рис. 1). Основным технологическим оборудованием для переработки полимеров в упаковки с помощью метода экструзии являются двухшнековые экструдеры [9]. Экструдер 1 предназначен для смешивания гранул нового и вторичного полистирола, в экструдер 2 подаётся смесь из предыдущего экструдера и газ для смешивания и последующего вытягивания. Экструдер комплектуется электроприводными системами на

¹ Соколова Т.В. Исследование и разработка двумерной системы управления процессом формования оптических волокон на базе интеллектуальных сервоприводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 16 с.

² Терлыч А.Е. Модели и алгоритмы управления процессом экструзии полимеров при производстве кабелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2013. 16 с.

базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Основные регулируемые технологические параметры экструдера – это частота вращения червяка и продольное распределение температур, заданное на цилиндре. Для газации исходного материала используется изобутан высшей марки, который подается для смешивания с прилегающей территории предприятия. Получившийся лист полистирола нама-

тывается намотчиком в рулоны. Полученные рулоны складываются в зоне промежуточного хранения для испарения газов из рулонов. После отстаивания рулоны поставляются на размотчик для дальнейшего формирования. Процесс получения готовых упаковок происходит на трёх этапах: узел формования, узел прокалывания, узел вырубки (см. рис. 1). Остатки после вырубки форм подаются в дробилку.



Рис. 1. Схема цикла производства упаковок из вспененного полистирола на предприятии

В рамках данного исследования получим многомерную математическую модель зоны формирования рулонов [10]. Из анализа технологического процесса можно сделать вывод, что основными параметрами управления являются обеспечение стабильности диаметра и натяжения полотна, которые влияют на основные показатели качества. Изменение толщины полотна полистирола определяется формулой

$$h(t) = \frac{Q(t)}{v(t) \cdot B},$$

где $Q(t)$ – объёмный расход полимера на выходе из экструдера, $\text{м}^3/\text{с}$; $v(t)$ – скорость намотки полотна пенополистирола, $\text{м}/\text{с}$; B – ширина данного полотна, м .

Функция изменения натяжения полотна может быть представлена:

$$F(t) = \int_0^t k \cdot \left(\frac{Q(t)}{h(t) \cdot B} - v_H(t) \right) dt,$$

где $v_H(t)$ – скорость намотки полотна, $\text{м}/\text{с}$.

Получим передаточные функции при входе $v = \text{const}$. Передаточная функция толщины полотна:

$$h(t) = \frac{Q(t)}{v \cdot B}, \quad W_1(s) = \frac{1}{v \cdot B} \frac{Q(s)}{h(s)}.$$

Передаточная функция натяжения полотна:

$$F(t) = \left(\frac{Q(t)}{h(t) \cdot B} - v \right) \cdot \frac{1}{s},$$

$$W_2(s) = \frac{\frac{1}{B} \frac{Q(s)}{h(s)} - v}{s \cdot F(s)} = \frac{1}{B} \cdot \frac{Q(s)}{s \cdot F(s) \cdot h(s)} - v \cdot \frac{1}{s \cdot F(s)}.$$

Получим передаточные функции при входе $Q = \text{const}$.

Передаточная функция толщины полотна:

$$h(t) = \frac{1}{v(t)} \cdot \frac{Q}{B},$$

$$W_1(s) = \frac{\frac{Q}{B} \cdot \frac{1}{v(s) \cdot h(s)}}{h(s)} = \frac{Q}{B} \cdot \frac{1}{v(s) \cdot h(s)}.$$

Передаточная функция натяжения полотна:

$$F(t) = \left(\frac{Q(t)}{h(t) \cdot B} - v(t) \right) \cdot \frac{1}{s},$$

$$W_2(s) = \frac{\frac{Q}{B} \frac{1}{h(s)} - v(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{Q}{B} \cdot \frac{1}{s \cdot F(s) \cdot h(s)} - \frac{v(s)}{s \cdot F(s)}.$$

На основе полученной математической модели была разработана компьютерная модель системы управления вытягиванием полотна полистирола в среде Matlab/Simulink (рис. 2). Применение Matlab позволит отладить алгоритм управления до внедрения на предприятии [11-13]. Общая имитационная модель включает в себя семь блоков Scope и семь блоков Subsystem.

На рис. 3 представлена модель подсистемы двигателя оборудования технологической линии [14, 15]. Подсистема расчета отклонения текущей толщины полотна полистирола от заданной представлена на рис. 4.

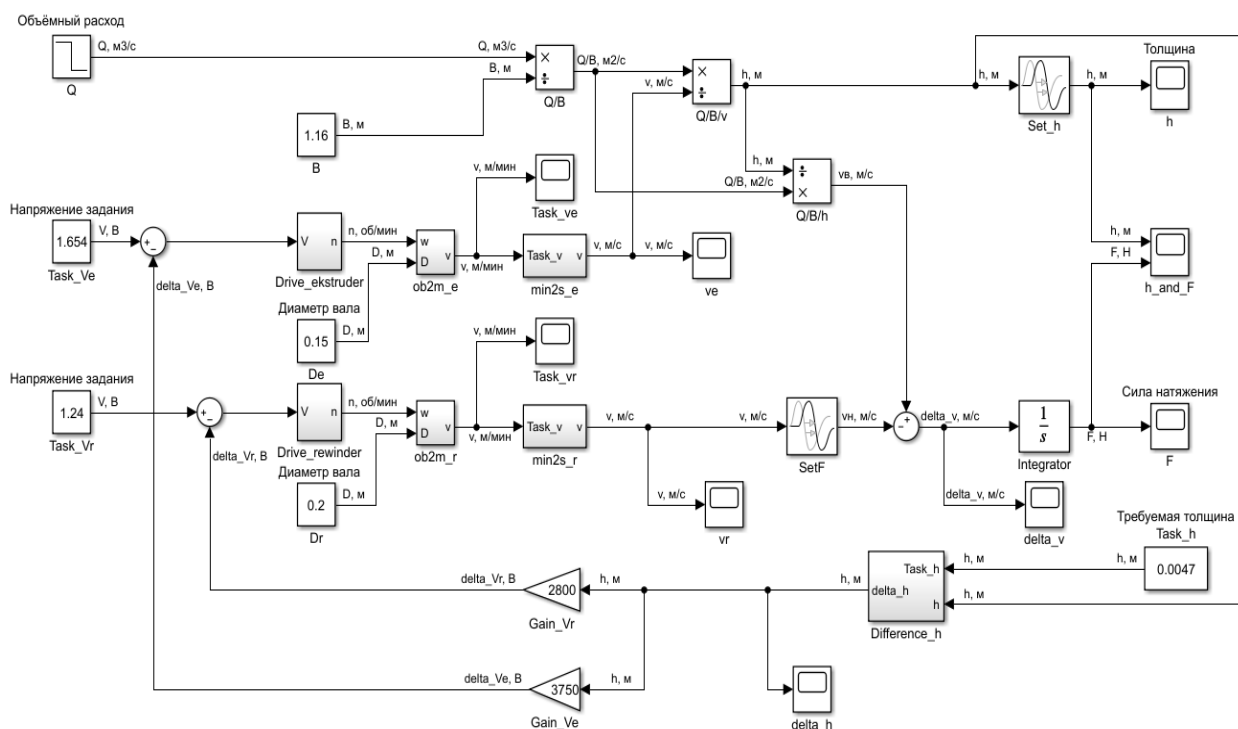


Рис. 2. Математическая модель системы управления вытягиванием вспененного полистирола в Matlab/Simulink

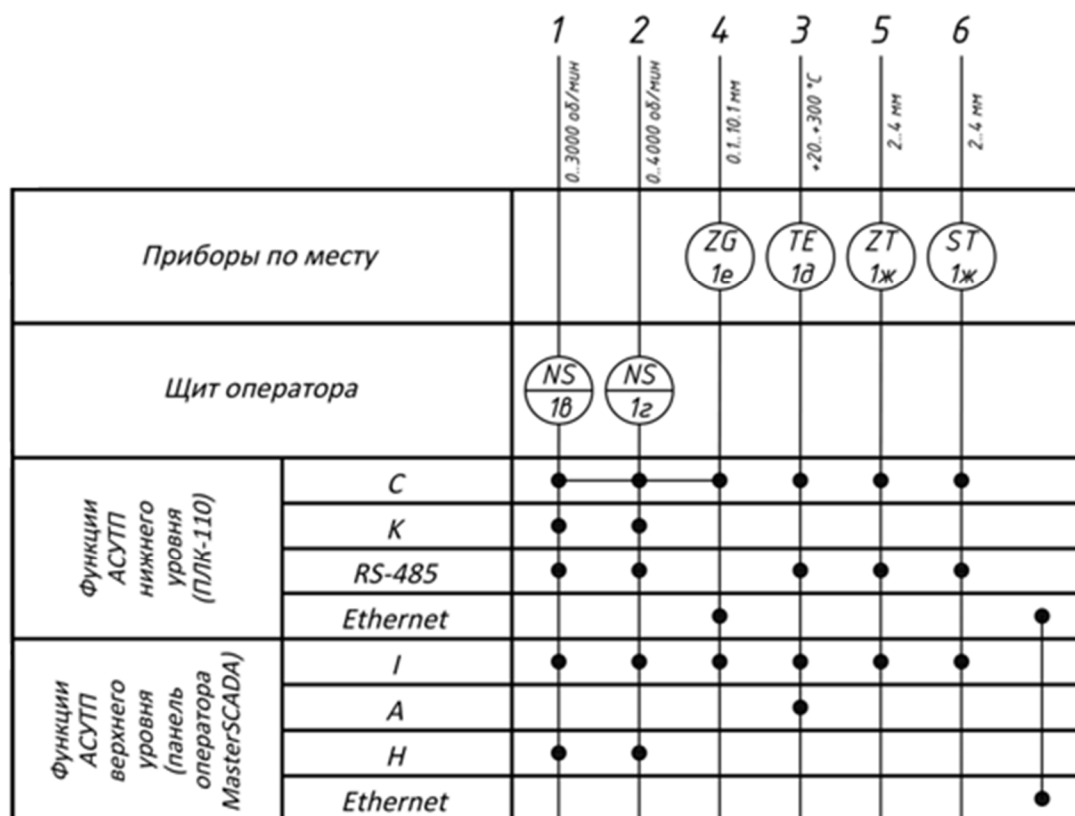


Рис. 6. Таблица автоматизации технологического процесса

Для автоматизации управления производственным процессом на единой панели оператора необходимо выбрать контроллер, а также измерители технологических величин [16, 17]. В схеме автоматизации (см. рис. 5, 6) приняты следующие обозначения: 1а – асинхронный двигатель, 1б – ДПТ, 1в – преобразователь частоты, 1г – блок управления двигателем для управления скоростью и моментом, 1д – термопара, 1е – лазерный датчик расстояния, 1ж – датчик бесконтактный индуктивный. Система управления базируется на использовании двух основных электроприводов подачи заготовки и вытягивания полотна полистирола. Алгоритм

управления и интерфейс оператора реализованы в программе MasterScada.

Результаты и их обсуждение

Для демонстрации работы модели рассмотрен процесс вытягивания полотна полистирола при заданном расходе вещества, ширине и толщине полотна полистирола, диаметре вала намотчика и экструдера, необходимой скорости натяжения. На рис. 7 приведен график изменения скорости вытягивания полистирольной ленты. По графику видно, что через 15 секунд происходит скачок скорости с 9,35 м/мин до 8,35 м/мин. Заданная скорость натяжения 9,3 м/мин.

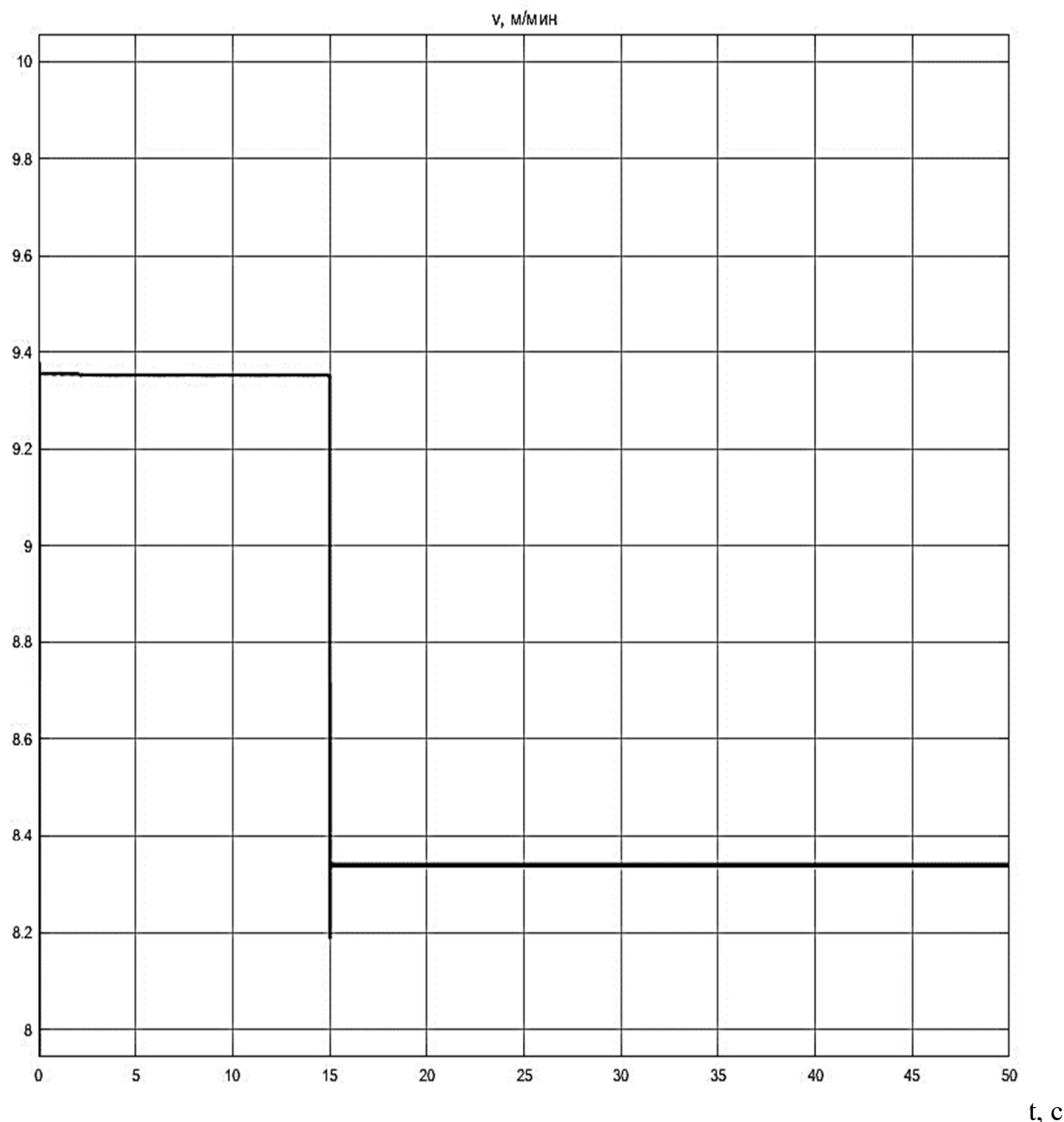


Рис. 7. График изменения скорости вытягивания полотна полистирола

Изменение скорости намотки полотна полистирола в рулон представлено на рис. 8. По графику видно, что через 15 секунд происходит скачок скорости.

Как можно заметить графики изменения скорости вытягивания полотна полистирола (см. рис. 7) и намотки полотна полистирола в рулон (см. рис. 8)

соответствуют друг другу, что говорит о согласовании скорости вытягивания и скорости намотки.

График разности скорости вытягивания полотна полистирола и скорости намотки полотна полистирола в рулон представлен на рис. 9.

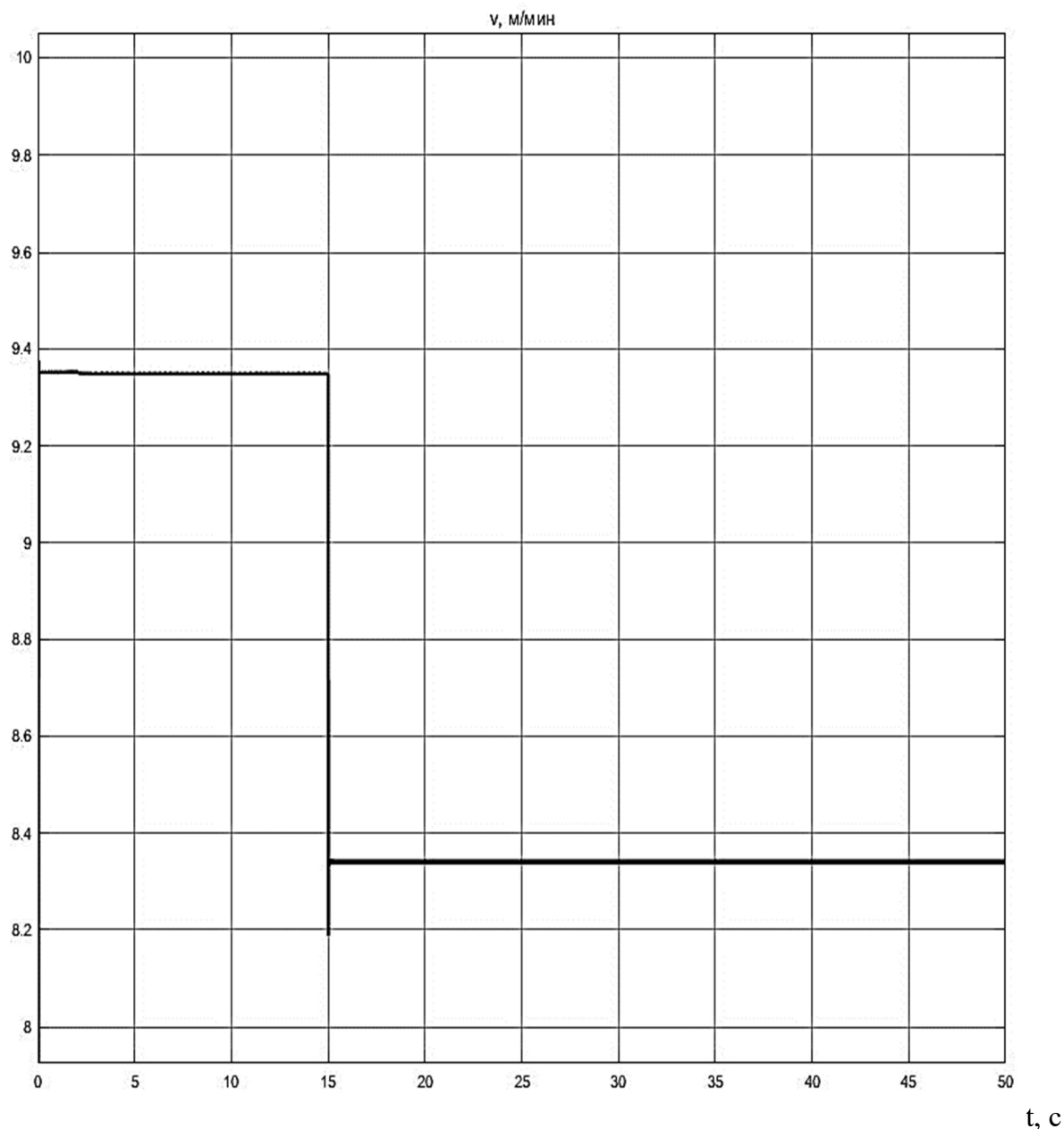


Рис. 8. График изменения скорости намотки полотна полистирола

Пики на графике разности скорости вытягивания полотна полистирола и скорости намотки полотна полистирола в рулон (рис. 9) показывают моменты, когда нарушается равенство скорости вытягивания и скорости намотки полотна полистирольной ленты в рулон.

На рис. 10-11 приведены графики изменения толщины полотна из вспе-

ненного полистирола. Исходя из графиков можно сказать, что первые две секунды происходит установление толщины полотна полистирола до 4,7 мм. При уменьшении расхода вещества толщина полотна из вспененного полистирола снижается.

Изменение натяжения полотна полистирола представлено на рис. 12.

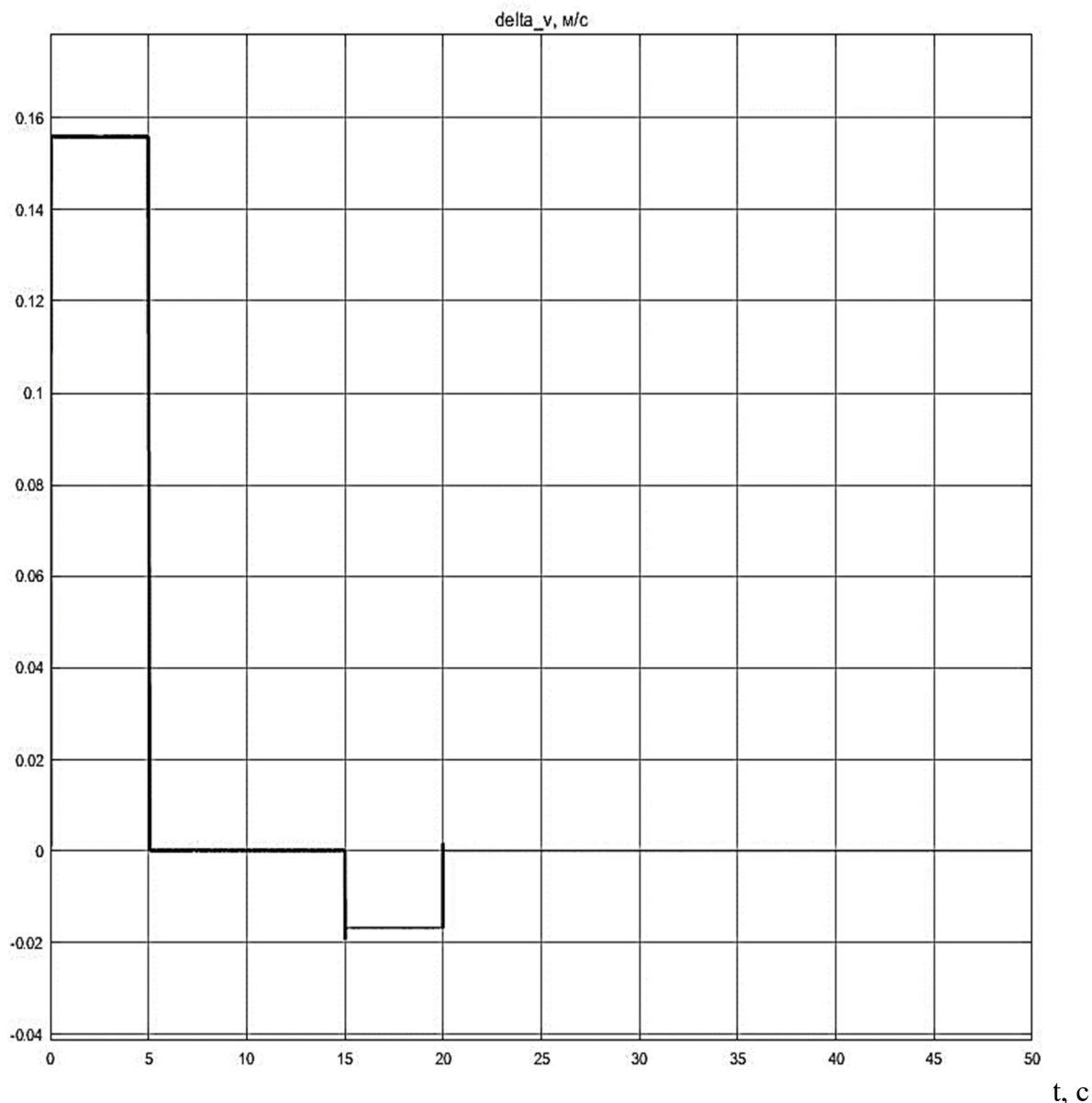


Рис. 9. График разности скорости вытягивания полотна полистирола и скорости намотки полотна полистирола в рулон

По графику на рис. 12 можно сказать, что первые пять секунд происходит натяжение полотна до 0,78 Н. При уменьшении расхода вещества также снижается и натяжение полотна.

Таким образом, толщина полотна и скорость натяжения будут заданы штатной системой программного управления

технологической линии, а необходимые значения управляющих сигналов будут определяться динамически на основе алгоритмов анализа информации, получаемой от измерительной аппаратуры и характеризующей текущее состояние процесса формирования рулона.

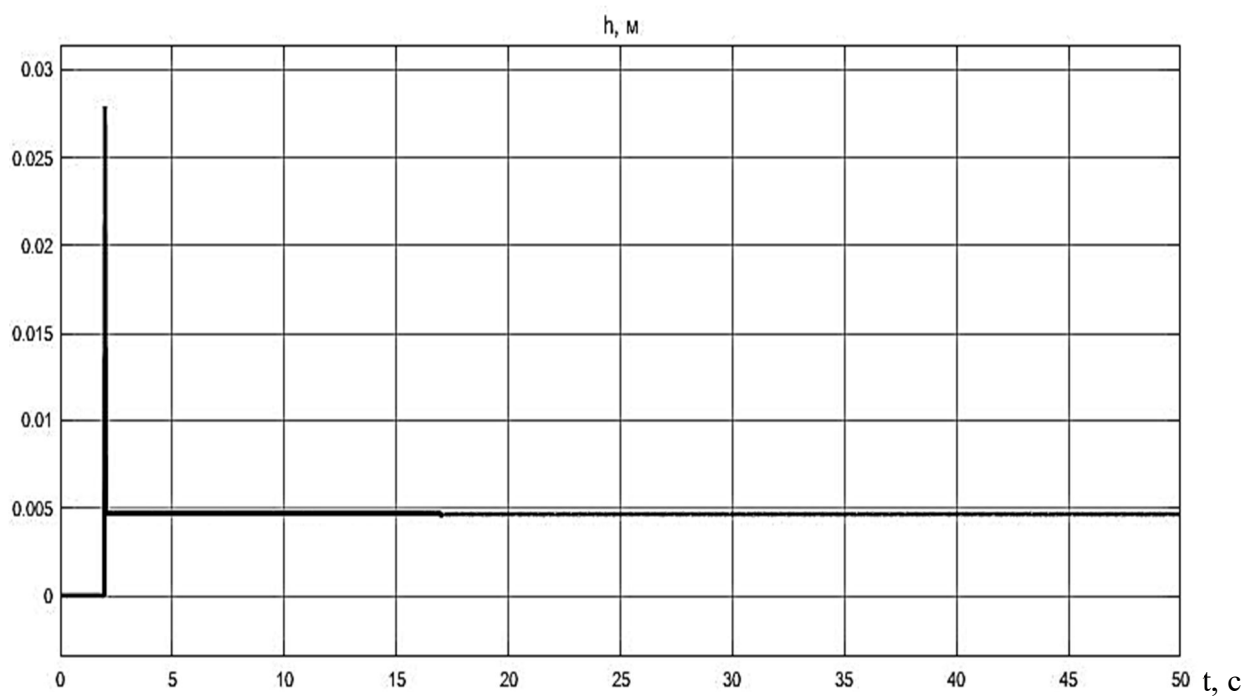


Рис. 10. График изменения толщины полотна полистирола

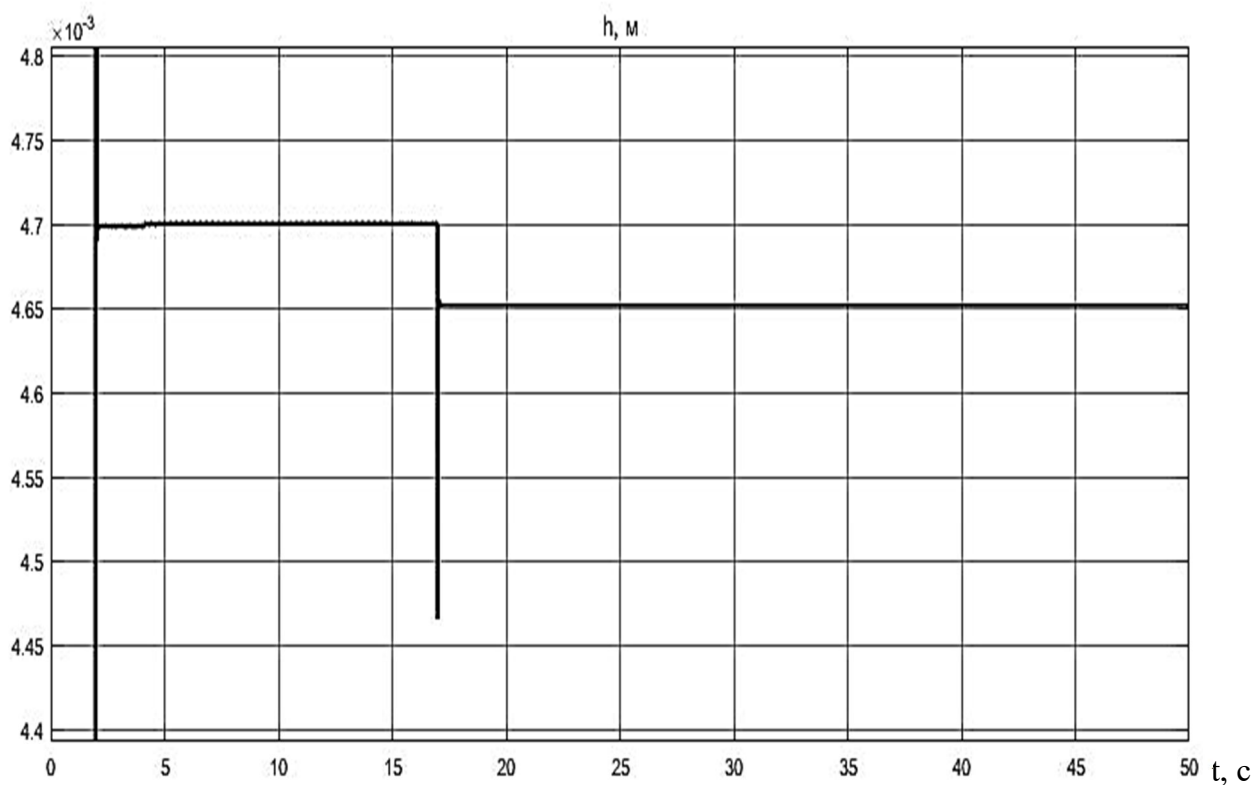


Рис. 11. Приближенная зона изменения толщины полотна полистирола во времени

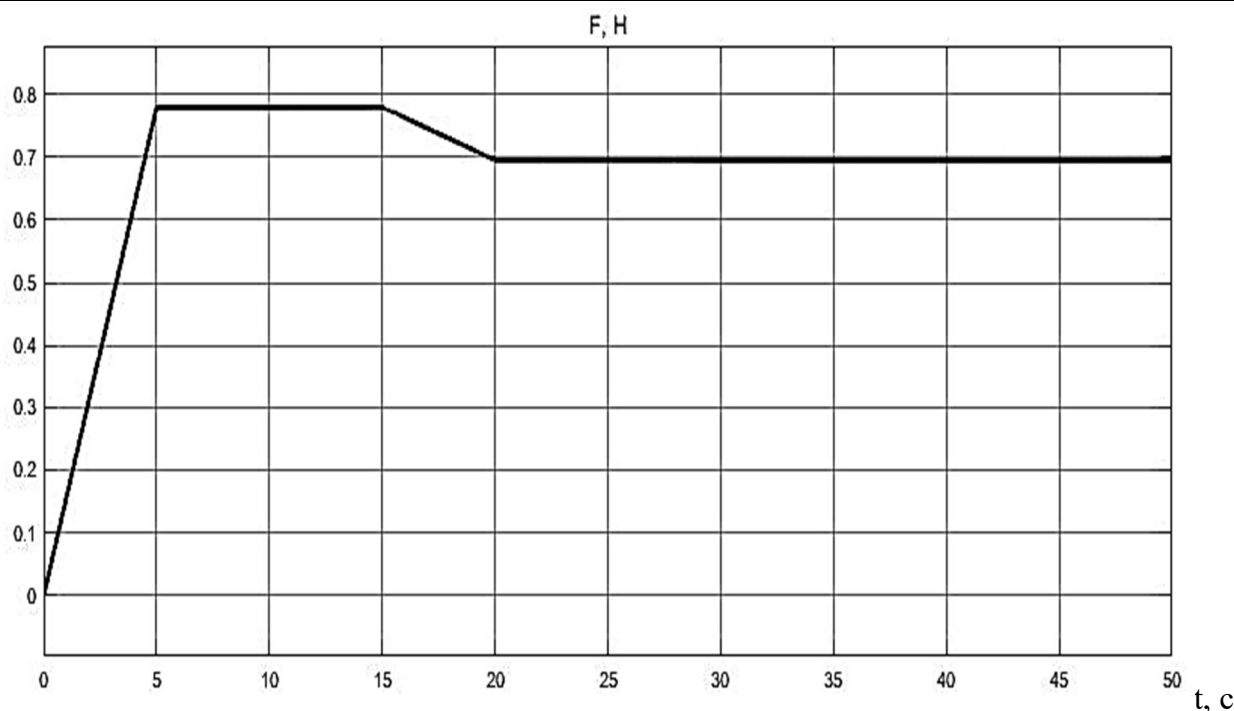


Рис. 12. График изменения натяжения полотна полистирола в функции времени

Выводы

В исследовании представлена компьютерная модель системы управления технологической линией, включающая контуры регулирования натяжения и диаметра полотна вспененного полистирола. Разработанная многомерная компьютерная модель системы управления может применяться для повышения качества, а также снижения затрат при производстве упаковок для продуктов питания. Представлены результаты исследования модели для заданных производственных параметров, приведены

и проанализированы графики изменения скорости вытягивания и скорости намотки, изменения толщины и натяжения полотна во времени. Рассмотрена техническая реализация автоматизированной системы и выполнен подбор оборудования для технологической линии, разработана схема автоматизации процесса производства. Полученные результаты исследования могут применяться для разработки систем управления объектами с взаимосвязанными регулируемыми величинами, например, для процесса вытягивания оптического волокна или листового стекла.

Список литературы

1. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). М.: Химия, 1977. 464 с.

2. Ганиев Р.Н. Математическая модель экструдера как объекта автоматического управления // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 5. С. 264-267.
3. Nikonova T. et al. Developing a measuring system for monitoring the thickness of the 6 m wide hdpe/ldpe polymer geomembrane with its continuous flow using automation equipment // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 21.
4. Pankaj M.P., Sadaphale D.B. A Study of Plastic Extrusion Process and its Defects. Manag. Appl. Sci. 2018. VII. P. 13–20.
5. Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. Математические модели и программный комплекс для управления экструзионными процессами в гибких многоассортиментных производствах полимерных материалов // Вестник ЮУрГУ. 2019. Т. 12. № 4. С. 5-28.
6. Беляева Н.А., Прянишникова Н.А. Математическое моделирование в задачах экструзии // Вестник Сыктывкарского университета. 2012. № 15. С. 31-44.
7. Орлов С.П. Адаптивная система управления экструзионной линией // Научный потенциал вуза производству и образованию: сб. материалов науч.-практ. конференции. Армавир, 2003. С. 81-82.
8. Чостковский Б.К., Митрошин В.Н. Автоматизация процесса экструзии пористой кабельной продукции на основе цифрового регулятора // Автометрия. 2017. Т. 53. № 4. С. 74-83.
9. Ухарцева И.Ю. Цветков В.А. Гольдаде Е.А. Методы изготовления полимерной упаковки для пищевых продуктов (обзор) // Пластические массы. 2020. № 7-8. С. 40-48.
10. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем. М.: Машиностроение, 1986. 272с.
11. Assi A.H. Engineering Education and Research Using Matlab. InTech, 2011. 490 p.
12. Chapra S.C. Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineering and Science. McGraw-Hill Science, 2012. 651 p.
13. Taan S. ElAli. Continuous Signals and Systems with MATLAB, 3rd Edition, 2021. 362 p.
14. Моделирование системы управления режимами токарной обработки с учетом изменения температуры в зоне резания / В.Г. Рубанов, И.А. Рыбин, С.А. Сильченко [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10. № 3/4. С. 50-63.
15. Зеленые технологии: промышленное приложение при управлении технологическими процессами / В.Г. Рубанов, Д.А. Юдин, А.Г. Бажанов [и др.]. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 116 с.
16. Автоматизация процесса производства пенополистирола. URL: <https://owen.ru/project/avtomatizacziya-proczessa-proizvodstva-penopolistirola>.
17. Инновационные аспекты производства вспененной полистирольной упаковки. URL: <http://bel-pack.ru/page14>.

Информация об авторах

Рыбин Илья Александрович, кандидат
технических наук, доцент кафедры технической
кибернетики, Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Рыбина Анна Васильевна, старший
преподаватель кафедры энергетики
теплотехнологии, Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-59-73>

Модель размещения данных во внутренней памяти вычислителя, реализующего схему кодирования данных в режиме сцепления блоков

М.О. Таныгин ¹✉, А.А. Ахмад ¹, О.В. Казакова ¹, Д.А. Голубов ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Резюме

Цель исследования. В статье исследуются особенности синтеза специализированных устройств, выполняющих контроль целостности и аутентичности отдельных информационных блоков на основе СВС-кодов. Рассматриваются подходы, имеющие своей целью снижение вычислительных и ресурсных затрат при выполнении таких процедур. Формулируются зависимости между показателями функционирования и требованиями по объёму внутренней памяти специализированных вычислителей, обрабатывающих данные в режиме СВС.

Методы. Реализация процедур аутентификации источника данных с использованием кодирования в режиме сцепления отдельных блоков данных является действенным методом повышения достоверности в условиях ограниченного размера проверяемых аутентификационных последовательностей. В то же время её реализация в приёмниках требует создания специализированных вычислителей, обрабатывающих возникающие при декодировании данных древовидные структуры, состоящие из отдельных блоков данных. Для снижения ресурсных и вычислительных затрат при обработке таких структур используется косвенная адресация, при которой данные блоков хранятся в оперативной памяти, а их адреса – в высокоскоростной регистровой памяти самого вычислителя.

Результаты. Создана модель косвенной адресации блоков данных в оперативной памяти. Указатели на блоки хранятся в отдельной регистровой памяти, и каждый указатель размещён в соответствии с декодированным порядковым номером блока в последовательности. Каждый адрес блока в оперативной памяти дополняется множеством указателей на последующие блоки в ветвях древовидной структуры. Созданная математическая модель позволила оценить размер в битах всех задействованных указателей и их число, что позволило определить потребность вычислителя, выполняющего обработку древовидной структуры, в регистровой памяти.

Заключение. В работе показано, что использование комбинации матричной и списочной организации хранения адресов блоков позволяет снизить потребность в регистровой памяти вычислителя на 50 – 60%. При этом вычислитель может обрабатывать древовидную структуру информационных блоков с использованием высокопроизводительных итерационных алгоритмов, что было бы невозможно при использовании исключительно списочной организации хранения адресов.

Ключевые слова: обработка данных; аутентификация; аппаратная сложность; косвенная адресация; древовидные структуры данных; математическое моделирование.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Модель размещения данных во внутренней памяти вычислителя, реализующего схему кодирования данных в режиме сцепления блоков / М.О. Таныгин, А.А. Ахмад, О.В. Казакова, Д.А. Голубов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 59-73. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-59-73>.

Поступила в редакцию 18.12.2022

Подписана в печать 21.02.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Режим кодирования с сцеплением блоков (англ. Cipher Block Chaining, CBC) применяется для формирования самовосстанавливающихся кодов, в которых ошибка при передаче или обработке одного блока не ведёт к распространению ошибок на остальные. В то же время его вариации в сочетании с алгоритмами формирования имитовставок (англ. message authentication code, MAC) являются наиболее удачным решением для проверки целостности и аутентичности информации, фрагментированной на блоки данных небольшой длины [1], то есть в таких системах, при которых использование стандартных и хорошо зарекомендовавших себя алгоритмов оказывается неэффективным [2, 3]. Существует большое

множество вариаций данного подхода, основанных на использовании как типовых алгоритмов шифрования, так и на оригинальных [4 – 10]. Подготовленный к отправке блок информации кодируется для создания цепочки блоков, для которой действует правило: «содержимое каждого последующего блока зависит от результата преобразования предыдущего», как показано на рис. 1, где: m_i – содержимое соответствующего блока данных; E – алгоритм преобразования на основе некоторой ключевой последовательности; c_i – содержимое блока данных, полученное в результате применения алгоритма E к данным m_i ; Tag – последний блок данных, являющийся имитовставкой всего фрагментированного сообщения.

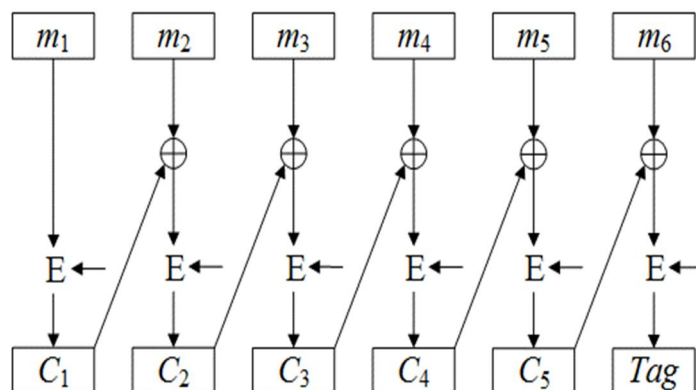


Рис.1. Процесс формирования цепочки связанных блоков

Взаимозависимость данных блоков позволяет не беспокоиться о достоверности контроля целостности или аутентичности отдельных блоков: в приёмнике блоки собираются в цепочку и проверяются, при этом обнаруживаются изменения в произвольном бите исходного сообщения.

Материалы и методы

При использовании СВС–МАС как метода аутентификации источника блоков данных в состав каждого блока вводится поле проверочной информации, которое формируется на основе уникального идентификатора источника, данных самого блока и данных, полученных из предыдущего блока цепочки [11]. Для протоколов, в которых кадр передаваемых данных ограничен несколькими байтами [12], размер поля проверочной информации не может превышать нескольких битов, использование СВС становится эффективным методом обеспечения требуемой достоверности [13, 14].

Особенности реализации процедур аутентификации в реальных вычислителях, заключающиеся в необходимости обработки последовательного потока блоков данных, не позволяют формировать все варианты цепочек блоков после получения некоторого множества таких блоков. В таком случае алгоритм обработки блоков имеет факториальную сложность, что делает метод СВС–МАС неприемлемым при больших длинах цепочек, которые и обеспечивают высокую достоверность. Поэтому аппа-

ратноориентированные процедуры контроля источника поступающих блоков данных несколько модифицируются [15]. Вычислитель формирует структурированную последовательность информационных блоков, буферизируя их содержимое во внутренней памяти. Условием добавления блока в цепочку является выполнение равенства:

$$F_1(J_{i-1}, \Omega) = F_2(J_i, \Omega, A_i), \quad (1)$$

где J_{i-1} , J_i – информационные части блоков $i-1$ и i соответственно;

A_i – содержимое имитовставки блока i ;

Ω – идентификатор отправителя блока;

F_1 – необратимое преобразование,

F_2 – обратимое преобразование (обратное ему преобразование используется при формировании имитовставки A_i).

Так как мощность алфавита выходных слов преобразования F_2 определяется разрядностью поля имитовставки A_i , которая принята нами равной нескольким битам, то существует значимая вероятность того, что к блоку $i-1$ будет добавлен не один, а несколько последующих блоков. В результате формируется древовидная структура блоков данных (ДСБД) [16].

Задачи формирования описанной выше структуры, размещения её в памяти вычислителя, выполняющего аутентификацию источников данных, и обработка являются сложными и ресурсоёмкими. Необходимость их решения входит в противоречие с жёсткими ограничениями по производительности и аппаратной сложности рассматриваемого класса устройств, взаимодействующих

по протоколам с ограниченным размером передаваемого кадра, которые связаны, в том числе, с требованиями по энергопотреблению и автономности [17-19]. Подходом, который обеспечит повышение скорости выполнения операций обработки ДСБД и снижение затрат оперативной памяти, является косвенная адресация буферизируемых информационных блоков: все они хранятся в произвольном порядке в буфере (ОЗУ), а их описатели блоков данных (ОБД) – в простейшем случае адреса блоков в ОЗУ – в отдельной регистровой памяти. Отдельные элементы данной памяти через систему перекрёстных ссылок образуют указанную древовидную структуру, которая обеспечивает эффективное использование регистровой памяти, так как [20]. Алгоритмы работы со списками обладают высокой вычислительной сложностью и требуют реализации рекурсивного вызова подпрограмм, так как в общем случае для поиска нужного элемента требуется прохождение по ветвям графовой структуры. С учётом того, что в обозначенной задаче нет критериев выбора правильного направления при разветвлении графа требуется перебор всего содержимого всех ветвей. В решениях [21, 22] повышение производительности достигается за счёт парализации процесса перебора маршрутов, формируемых в графах. Но общее количество операций обработки вершины графа (данных, содержащихся в элементе списочной структуры) для поиска требуемой, будет равномерно распределённой слу-

чайной величиной от нуля до общего количества вершин в графе. Описанные в [23] подходы к хранению и обработке списочных структур так же отмечают этот недостаток, который присущ невзвешенным графам, для которых, в отличие от взвешенных, нет формальных алгоритмов выбора направления движения по графу. Соответственно, среднее же число операций выбора блоков из памяти будет равно половине числа элементов в списочной структуре.

Решение для хранения и обработки больших объёмов связанных данных описано в [24]. Авторами предлагается аналогичная древовидным структурам схема работы с информацией, при которой части информации извлекаются из памяти последовательно, исходя из анализа предыдущих выбранных данных. Ими так же выбрана концепция временного хранения части данных в кеше с высокой скоростью доступа. В то же время используемый подход основан на зависимости извлекаемых и анализируемых данных, что позволяет, как и в случае с обработкой ориентированных графов, реализовывать алгоритмы поиска и извлечения данных со сложностью, отличной от сложности задач прохождения по всем ветвям древовидной структуры.

Более простые в аппаратной реализации итерационные алгоритмы, работающие с ДСБД как с совокупностью векторов блоков данных [25-28], требуют независимых блоков памяти максимального размера для каждой ветви древовидной структуры вне зависимости от её фактической длины. При этом

сама регистровая память описателей превращается в набор векторов ОБД или матрицу. Число операций для поиска сообщений в такой организации распределено от нуля до максимальной длины последовательности, что является более выигрышным решением с точки зрения производительности. Применительно к задаче анализа цепочек сообщений, кодированных в режиме сцепления – среднее число операций, требуемых для поиска нужного элемента равно половине от длины обрабатываемой цепочки. Это меньше, чем при описанных в [20-24] подходах к обработке и хранению списков, но требует резервирования регистровой памяти для возможности записи вектора максимальной длины в любой столбец матрицы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что стоящая перед нами задача обработки цепочек сообщений должна ориентироваться на оптимизацию такого параметра, как требуемые затраты памяти для хранения дополнительной структуры, обеспечивающей адресацию и извлечение из памяти данных блоков. При этом вычислительная сложность поиска и обработки сообщений, ввиду того, что обрабатываемые списочные структуры представляют собой невзвешенные графы, определяется лишь размером такой списочной структуры и не может быть решена схематехническими решениями, рассмотренными выше.

В настоящей работе мы рассматриваем модель хранения ОБД, представляющую собой комбинацию списочной структуры и матричной памяти. Она

применима для методов аутентификации, в которых в атрибуте блока данных в явном виде присутствует позиция блока в цепочке. Это позволяет в ОБД хранить не ссылки не на произвольные регистры памяти, а лишь на те, которые находятся в следующем столбце относительно текущего ОБД (рис.2). На рисунке число столбцов матричной памяти равно максимальной длине проверяемой цепочки блоков M , а число строк N определяется, исходя из условий функционирования устройства, необходимого числа регистров для хранения адресов всех буферизированных блоков данных [29].

Таким образом, описатель блока данных в регистровой памяти будет представлять из себя конкатенацию следующих слов:

- адреса блока в буферной памяти;
- результат преобразования $F_1(J_i, \Omega)$ для данного i -го сообщения для сравнения с результатом $F_2(J_{i+1}, \Omega, A_{i+1})$, следующего блока в ветви (это обеспечивает сокращения временных затрат при многократном выполнении операции сравнения);
- результат преобразования $F_2(J_i, \Omega, A_i)$ для сравнения с содержимым поля предыдущего блока в ветви;
- множество указателей $G = \{g_1, g_2, \dots, g_t\}$ на последующие элементы ветвей.

При поступлении блока в приёмник его обработка и размещение описателя в регистровой памяти, описываемой матрицей B размером $N \times M$, происходит по приведённому ниже алгоритму, в котором приняты следующие обозначения:

B_{ij} – элемент регистровой памяти, размещённый в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти;

F^{ind} – операция определения позиции блока [30];

$|G^{i,k}|$ – число сформированных указателей у элемента, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти;

J_{ij} – данные блока, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти;

A_{ij} – имитовставка блока, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти;

$B^{(j)}$ – содержимое j -го столбца регистровой памяти;

$|B^{(j)}|$ – число занятых регистров в j -м столбце регистровой памяти;

g_k^{ij} – содержимое указателя с номером k у элемента, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти.

Основные этапы алгоритма:

1. Получение блока данных $u = \{J, A\}$. Выделение из его атрибутов номера блока $\tau(u)$ в цепочке: $\tau(u) = F^{\text{ind}}(u)$.
2. Установка переменной цикла $k := 0$, сброс флага $f := 0$.
3. Если $F_2(J, \Omega, A) = F_1(J_{\tau(u)-1, k}, \Omega)$, то перейти к пункту 4, иначе – к пункту 6.
4. Если $f = 0$, то добавляем блок в матрицу $B_{\tau(u), |B^{(\tau(u))}|+1} := u$, устанавливаем флаг $f := 1$, переходим к пункту 5.
5. Добавляем в множество указателей ссылку на новый блок (порядковый номер блока): $g_{|G^{\tau(u),k}|}^{\tau(u),k} := |B^{(\tau(u))}|$.
6. Инкрементируем переменную цикла $k := k + 1$.

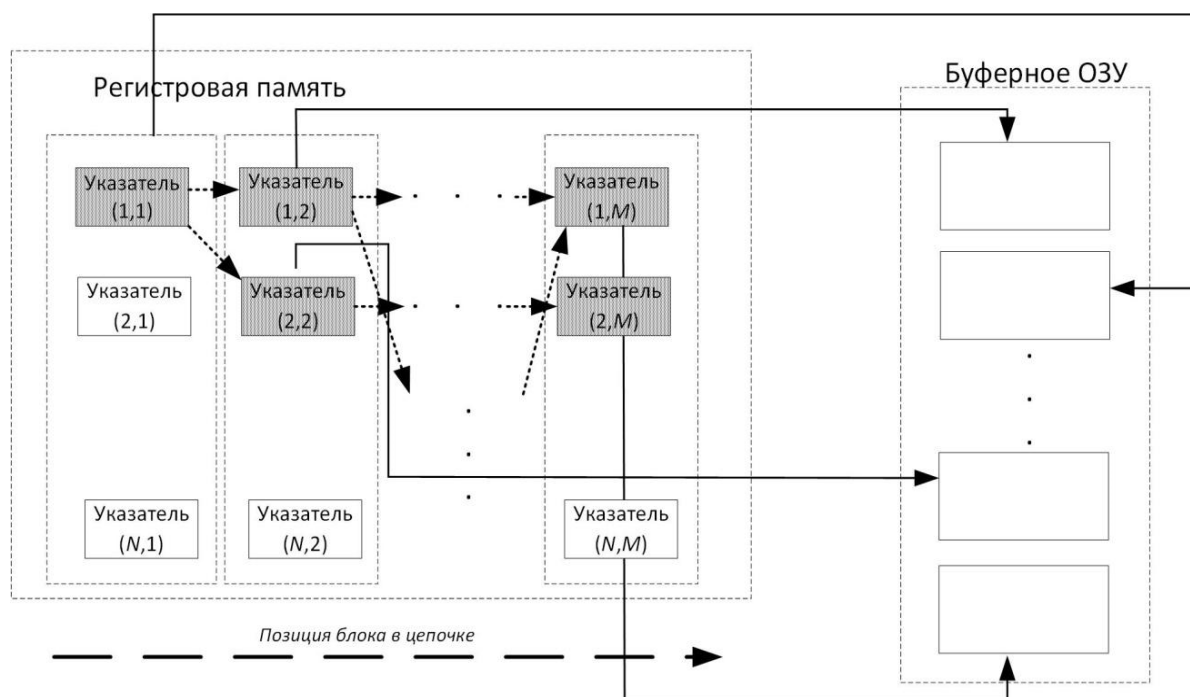


Рис. 2. Косвенная адресация сообщений в буферной памяти

7. Если $k > |B^{\langle \tau(u) \rangle - 1}|$, то переход к пункту 8, иначе – переход к пункту 3.

8. Установка переменной цикла $k := 0$.

9. Если $F_2(J_{\tau(u)+1, k}, \Omega, A_{\tau(u)+1, k}) = F_1(J, \Omega)$, то перейти к пункту 10, иначе – к пункту 12.

10. Если $f = 0$, то добавляем блок в матрицу $B_{\tau(u), |B^{\langle \tau(u) \rangle}| + 1} := u$, устанавливаем флаг $f := 1$, переходим к пункту 11.

11. Добавляем в множество указателей ссылку на новый блок (порядковый номер блока): $g_{|G^{\tau(u), k}|}^{\tau(u), k} := |B^{\langle \tau(u) \rangle}|$.

12. Инкрементируем переменную цикла $k := k + 1$.

14. Если $k > |B^{\langle \tau(u) \rangle + 1}|$, то переход к пункту 14, иначе – переход к пункту 9

Конец процедуры добавления блока в регистровую память.

Для оценки потребности вычислителя, выполняющего обработку поступающих блоков данных и аутентификацию их источника, в регистровой памяти необходимо определить разрядность h размеров слов $F_1(J_i, \Omega)$ и $F_2(J_{i+1}, \Omega, A_{i+1})$ и число U блоков данных, хранящихся в буфере (влияет на разрядность адреса блока данных в буфере). Эти параметры определяются числом K источников, которые формируют блоки данных, и длиной цепочки блоков M [30]:

$$\begin{aligned} U &= K \cdot M, \\ h &= \lceil \log_2 K \rceil + 2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\lceil \log_2 K \rceil$ – минимальное целое, большее $\log_2 K$.

Кроме этого, необходимо определить требуемое для безошибочной работы вычислителя число регистров в

столбце матрицы регистров (рис. 2), и число указателей в каждом ОБД. Для этого создана математическая модель размещения информационных блоков в регистровой памяти вычислителя, в качестве параметров которой, помимо перечисленных, было использовано число строк матрицы регистров N . Представив процесс получения блоков данных вычислителем как пуассоновский процесс [29], получим функцию вероятности $p(n, j)$ дискретной случайной величины n числа блоков данных, полученных от всех источников, для которых на основании содержимого атрибутов вычислена одинаковая позиция блока в цепочке:

$$p(n, j) = \frac{\left(\frac{K \cdot j}{M}\right)^n \times e^{-\frac{K \cdot j}{M}}}{n!},$$

где K/M – интенсивность поступления в приёмник сообщений с некоторым порядковым номером;

j – число информационных блоков цепочки источника, полученное к какому либо моменту времени;

n – число блоков данных с одинаковой позицией в цепочке, размещаемых в одном столбце регистровой памяти.

К каждому элементу древовидной структуры, хранящейся в регистровой памяти, может быть добавлено r блоков данных, $r = 0 \dots U$, образуя при этом r новых ветвей. Это число является дискретной случайной величиной с функцией вероятности, которая получена из (2) при $j = M$ и биномиального распределения вероятностей из k экспериментов при числе успехов r :

$$p^{\text{point}}(r) = \sum_{i=r}^U \left(\frac{K^i \times e^{-K}}{i!} \left(\sum_{k=r}^i \frac{K^k \times e^{-K}}{k!} C_k^r (2^{-h})^r (1-2^{-h})^{U-r} \right) \right), \quad (4)$$

где 2^{-h} – вероятность добавления очередного блока в цепочку;

U – число блоков данных, хранящихся в буфере;

$p^{\text{point}}(r)$ – вероятность добавления к произвольному элементу древовидной структуры ровно r ветвей.

Модель размещения данных в каждом элементе матричной регистровой к моменту получения приёмником M сообщений целевого источника описывается множеством вероятностей $p_{i,j}^{\text{pos}}$ $j = 1 \dots M-1$, $i = 0 \dots N$, каждую из которых получают из рекуррентной зависимости, полученной на основе формул (3) и (4):

$$\begin{cases} p_{j,0}^{\text{pos}} = 1, j = 1 \dots M-1, \\ p_{0,j}^{\text{pos}} = p^{\text{point}}(j), j = 1 \dots U-M, \\ p_{i,j}^{\text{pos}} = \sum_{v=0}^j (p^{\text{point}}(v) \cdot p_{i-1,j-v}^{\text{pos}} \cdot 2^{-h}), \end{cases} \quad (5)$$

где $p_{i,j}^{\text{pos}}$ – вероятность занятия элемента регистровой памяти в i -м столбце и j -й строке.

Как было сказано, при синтезе устройств необходимо ограничить мощность множества указателей G описателя блока данных некоторым пороговым значением t . Подобное ограничение даст ошибку нехватки указателей, вероятность которой $p^{\text{err}}(t)$ определится по формуле

$$p^{\text{err}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^M \sum_{j=1}^{U-M} \left(p_{i,j}^{\text{pos}} \left(1 - \sum_{v=t}^{U-M} p^{\text{point}}(v) \right)^{j+1} \right), \quad (6)$$

где $\sum_{v=t}^{U-M} p^{\text{point}}(v)$ – вероятность нехватки указателей для одного ОБД.

Результаты и их обсуждение

Полученные формулы позволили визуализировать интересующие нас зависимости, которые должны быть учтены при синтезе вычислителей. Ниже, на рис. 3 приведен график зависимости вероятности ошибки нехватки указателей в ОБП от числа указателей t и длины цепочки сообщений M .

Анализ данных зависимостей, а также зависимостей, полученных при других значениях K и h , показал, что на форму кривой p^{err} влияет соотношение между числом источников и разрядностью сравниваемых слов (1): при полученном в [30] соотношении $K < 2^{h+2}$ вероятность ошибки падает практически до нулевых значений уже при небольших t (рис. 3, а), тогда как если данное соотношение не выполняется, вероятность ошибки близка к 1 и снижается лишь незначительно с ростом числа указателей t (рис. 3, б). При этом, в случае, если требование по минимальной длине проверяемых слов выполняется, зависимость ошибки от длины последовательности блоков данных может быть аппроксимирована прямой при $t = 3 \dots 6$.

Практический интерес представляет собой определение минимального значения t^{min} числа указателей в ОБП, при котором значение вероятности ошибки p^{err} не превышает некоторого порогового значения Por (рис. 4):

$$\begin{aligned} \exists! t^{\text{min}}: & (p^{\text{err}}(t^{\text{min}}) < Por) \vee \\ & \vee (p^{\text{err}}(t^{\text{min}} + 1) \geq Por). \end{aligned} \quad (7)$$

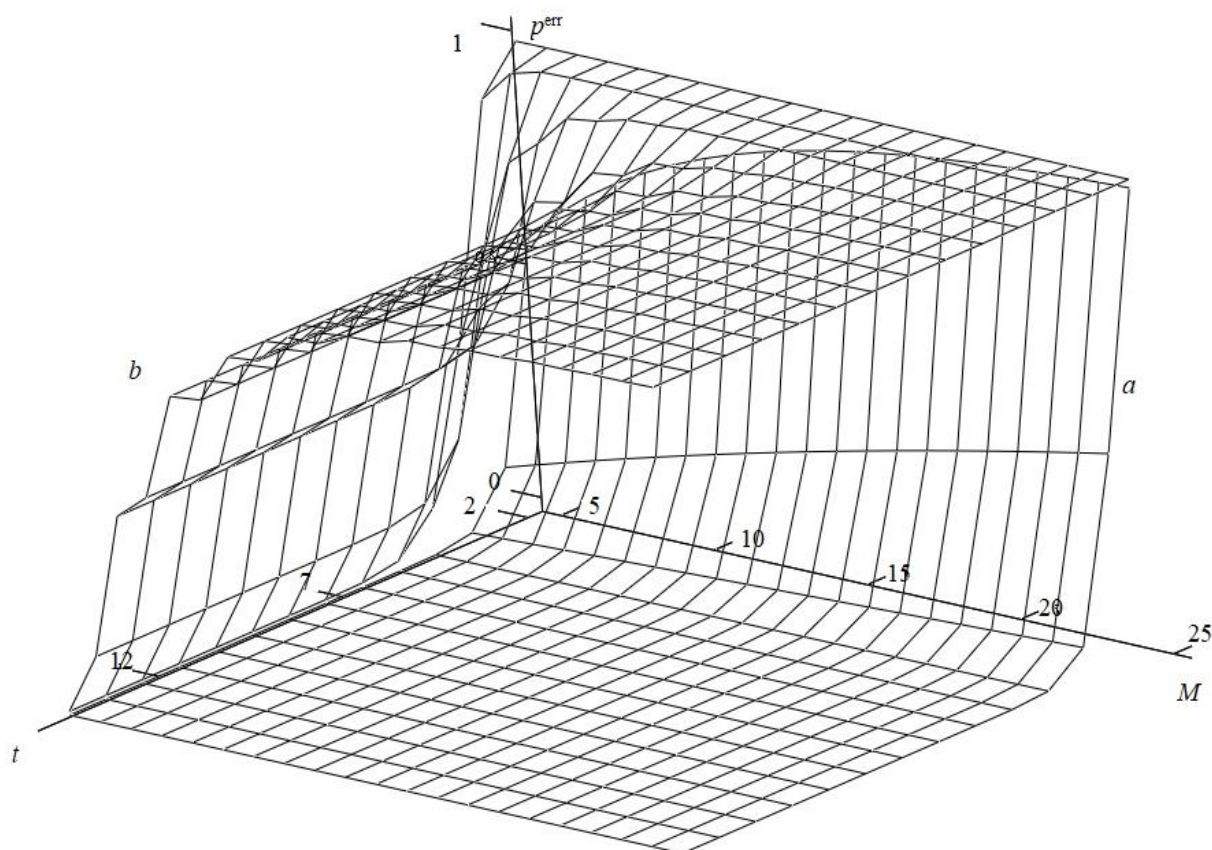


Рис. 3. График зависимости вероятности p_{err} ошибки нехватки указателей в ОБД от числа указателей t и длины цепочки сообщений M , числа источников данных K и разрядности проверочного слова h : **a** – $K=30$, $h = 6$; **b** – $K=30$, $h = 5$

Серии математических экспериментов при различных значениях исходных параметров позволили сформулировать следующие правила для расчета числа указателей:

$$t^{\min} = \lceil M/10 \rceil + 2, \quad (8)$$

где $\lceil M/10 \rceil$ – минимальное целое, большее $M/10$.

Кроме того, установлено, что увеличение разрядности h проверяемых слов на 1 бит в среднем снижает минимальное число указателей также на 1 бит, что может быть использовано для манипулиро-

вания требуемыми размерами регистровой памяти, содержащей ОБД.

Общая потребность в регистровой памяти для хранения одного ОБД будет равна в битах сумме следующих слагаемых:

- адреса блока в буферной памяти – $\lceil \log_2(K \cdot M) \rceil + 1$;
- два слова по $h = \lceil \log_2(K) \rceil + 2$ для организации сравнения кодов аутентификации;
- $(\lceil M/10 \rceil + 2) \times 2 \times \lceil \log_2(M/10 \rceil + 2)$ битов для хранения указателей на последующие блоки.

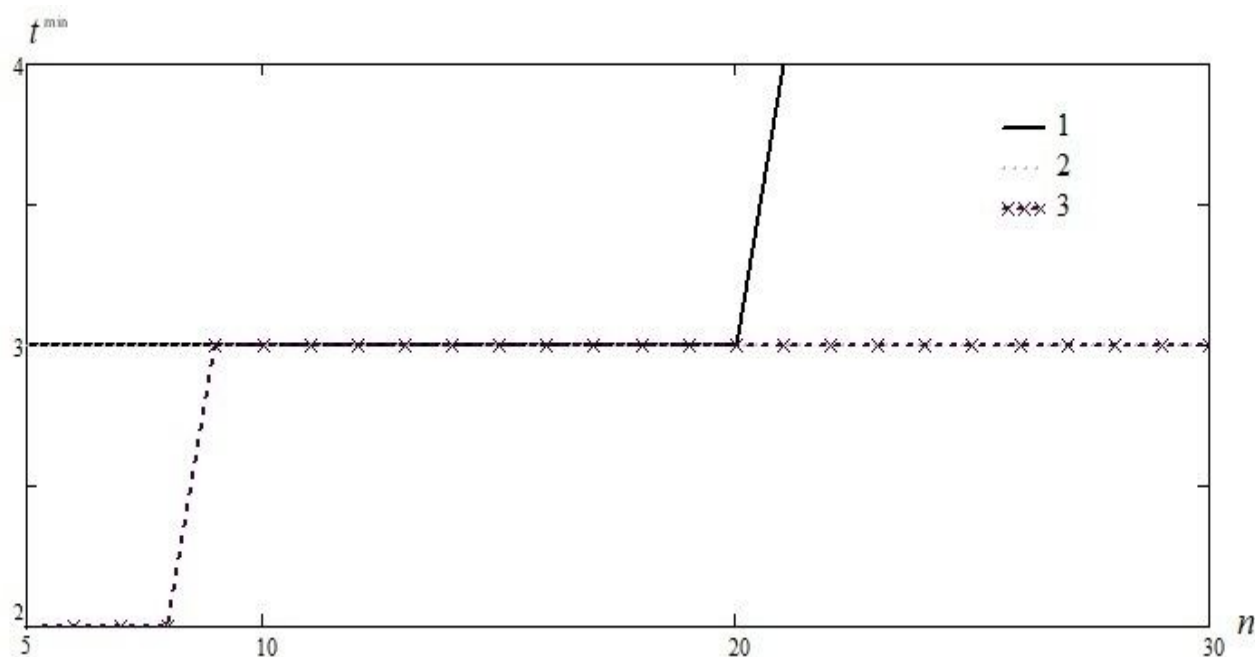


Рис. 4. График зависимости минимального числа указателей t^{min} от длины цепочки сообщений M и максимальной ошибки Por , при числе источников $K = 30$ и $h = 6$: 1 – $Por = 0,05$; 2 – $Por = 0,1$; 3 – $Por = 0,25$

В последнем слагаемом логарифм появляется из-за введения максимального ограничения на количества строк в матрице регистров – мы предполагаем, что каждый из $\lceil M/10 \rceil + 2$ указателей ОБД ссылается на такое же количество ОБД в следующем столбце. В реальности, как показано в [30], число строк может быть ограничено 3 – 5.

Если сравнивать затраты в регистровой памяти в предлагаемой модели с аналогичными затратами в исключительно матричной системе хранения [20-28], в которой последовательности блоков представляют собой совокупность векторов, каждый элемент кото-

рых есть указатель на элемент в каждом столбце регистровой памяти. В таких системах первые два слагаемых в раз-мере ОБД остаются такими же, третье отсутствует, а вместо этого появляется компонента, равная произведению $2 \times \log_2(\lceil M/10 \rceil + 2) \cdot M \cdot N^{chain}$, где N^{chain} – константа, имеющая порядок 10^2 [16].

Графики зависимости потребности в регистровой памяти от длины цепочки блоков показывают (рис. 5), что в предлагаемой модели размещения ОБД она на 50 – 60% меньше, чем в системах, где для хранения сформированных ветвей используются дополнительные вектора указателей.

Таблица 1. Сравнение характеристик методов размещения данных

Метод размещения данных	Затраты внутренней регистровой памяти/	Среднее число обращений к регистровой памяти для поиска элемента в цепочке
Матричное хранение адресов блоков данных	V	$M/2$
Хранения адресов блоков данных в виде списочной структуры	$0.4...0.5 V$	$K \cdot M/2$
Комбинированная организация	$0.4...0.5 V$	$M/2$

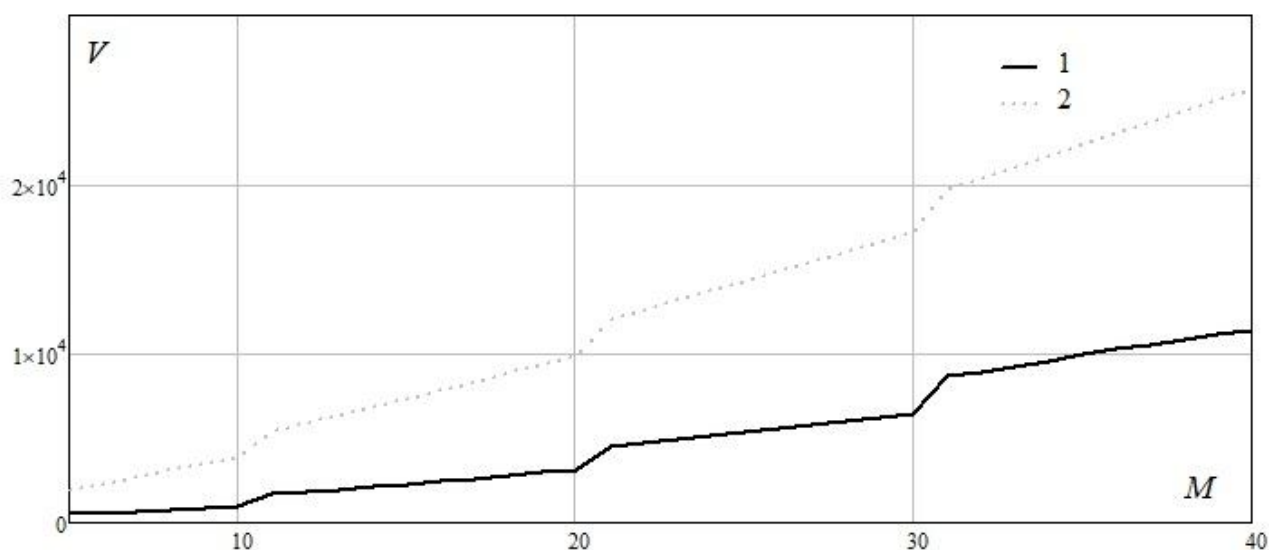


Рис. 5. Зависимость требуемой ёмкости V регистровой памяти (в битах) от длины цепочки блоков данных M при числе источников $K=60$: **1** – предлагаемая модель регистровой памяти; **2** – матричная организация регистровой памяти с дополнительными векторами ветвей древовидной структуры

Выводы

В результате математического моделирования была определена потребность в регистровой памяти вычислите-

ля для организации косвенной адресации блоков данных в основном ОЗУ. Установленные соотношения применимы при синтезе вычислителей, обрабатывающих древовидные структуры

блоков данных, формируемые при выполнении процедур аутентификации источников сообщений на основе метода сцепления блоков. Если сравнивать характеристики описываемого подхода к адресации блоков в буфере при формировании цепочек блоков (табл. 1), то комбинированный метод, как было сказано ранее, требует меньших затрат внутренней регистровой памяти по сравнению с матричной организацией (на уровне затрат при хранении указателей в виде списков) [25, 26], и обеспечивает равное с ней и в K раз меньшее (K – число источников данных, для которых выполняется аутентификация) число операций обращения к памяти по сравнению с использованием списочной структуры [21, 22].

Использование комбинации указателей на элементы древовидной структуры с матричным размещением её элементов позволило более чем в два раза уменьшить требуемый размер регистровой памяти вычислителя, что позволяет, при реализации таких вычислителей на ПЛИС, использовать более дешёвые и простые микросхемы, реали-

зовывать косвенную адресацию без использования дополнительных блоков ОЗУ, реализовывать на одной микросхеме несколько вычислительных ядер, повышая итоговую производительность устройства.

Полученные результаты определяют потребность в регистровой памяти для хранения всех возможных разветвлений в древовидной структуре, их зависимость от числа источников и длины последовательности блоков. Как показали ранее проведённые исследования, от этих же параметров зависит и достоверность описываемого метода аутентификации источников данных по последовательностям небольшой (до нескольких битов) длины. Что создает предпосылки для реализации методов обнаружения ошибок на основе подсчёта числа разветвлений в древовидной структуре. Кроме этого, на основании анализа структуры ветвей и последовательности их построения можно формировать численные оценки для повышения достоверности выделения ветви из цепочек целевого источника.

Список литературы

1. Царегородцев К. Д. Анализ режимов шифрования для реализации в устройствах RFID // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2020. № 13. С. 67-69. DOI: 10.17223/2226308X/13/20.
2. Мальчуков А.Н., Осокин А.Н. Система автоматизированного проектирования кодеров помехоустойчивых кодов короткой длины // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 5. С. 70-75.

3. Мыцко Е.А., Мальчуков А.Н., Иванов С.Д. Исследование алгоритмов вычисления контрольной суммы CRC8 в микропроцессорных системах при дефиците ресурсов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 6. С. 22-29.
4. Hang S.J., Oh H.S., Park J. The improved Data Encryption Standard (DES) Algorithm // IEEE 4th International Conference on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings. 1996. P. 1310–1314.
5. Kruti S., Gambhava B. New Approach of Data Encryption Standard Algorithm // Int. J. Soft Comput. Eng. 2012. Vol. 2. № 1. P. 322–325.
6. Sumathi R. A Secure Data Transfer Mechanism Using Single-Handed Re-Encryption Technique // International Conference on Emerging Trends in Science, Engineering and Technology. Tiruchirapalli, India. 2012. P. 1-9.
7. C Liu., Ji J., Liu Z. Implementation of DES Encryption Arithmetic based on FPGA / // AASRI Procedia. 2013. Vol. 5. P. 209–213.
8. Kruti S., Gambhava B. New Approach of Data Encryption Standard Algorithm // Int. J. Soft Comput. Eng. 2012. Vol. 2. № 1. P. 322–325.
9. Mandal P.C. Evaluation of performance of the Symmetric Key Algorithms: DES, 3DES, AES and Blowfish // J. Glob. Res. Comput. Sci. 2012. Vol. 3. № 8. P. 67–70.
10. Xie J., Pan X. An improved rc4 stream cipher // International Conference on Computer Application and System Modeling. 2010. doi: 10.1109/IC-CASM.2010.5620800
11. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions // J. Cryptol, 2015. Vol. 18. №2. P. 111–131.
12. Предварительный национальный стандарт РФ. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол обмена для высокоскоростных сетей с большим радиусом действия и низким энергопотреблением. URL: <http://docs.cntd.ru/document/554596382> (дата обращения 15.02.2021).
13. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Confidentiality // Cryptologia. 2010. № 34(2). P. 163 – 175.
14. Ben Othman, S., Alzaid, H., Trad A., Youssef, H. An efficient secure data aggregation scheme for wireless sensor networks // IISA 2013, doi:10.1109/iisa.2013.6623701
15. Таныгин М.О. Алгоритм определения источника фрагментированных сообщений // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2020. Т. 63, №8. С.702 – 710.
16. Рекурсивный алгоритм формирования структурированных множеств информационных блоков для повышения скорости выполнения процедур определения их источника / М.О. Таныгин, Х.Я.А. Алшаиа, В.П. Добрица, О.Г. Добросердов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 51-64. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-51-64>.

17. Yağdereli E. Gemci, C. A study on cyber-security of autonomous and unmanned vehicles // *Journal of Defense Modeling and Simulation*. 2015. doi: <https://doi.org/10.1177/1548512915575803>
18. Беспилотные авиационные системы. Часть 3. Эксплуатационные процедуры [Электронный ресурс] // Стандарт ISO 21384-3:2019(E). URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/70853/7ec34c8a22bf46958423b7e3a2e43693/ISO-21384-3-2019.pdf> (дата обращения 15.09.2020)
19. Leccadito M. A Hierarchical Architectural Framework for Securing Unmanned Aerial Systems // *Virginia Commonwealth University*. 2016. <https://doi.org/10.25772/ODK3-E418>
20. Пасечников К. А., Иванова Г. С.. Синтез оптимальных структур данных для решения задач на графах // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*. 2008. № 4(73). С. 29-37.
21. Колганов А. С. Параллельная реализация алгоритма поиска минимальных остовных деревьев с использованием центрального и графического процессоров // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*. 2016. Т. 5. № 3. С. 5-19. DOI 10.14529/cmse160301
22. Tasci S., Demirbas M. Employing in-memory data grids for distributed graph processing // *IEEE 2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. 2015. P. 1856–1864. doi:10.1109/bigdata.2015.7363959
23. Paradies M, Lehner W, Bornhövd C GRAPHITE: an extensible graph traversal framework for relational database management systems. In: *DBM. ACM*. 2015. P. 29:1–29:12. DOI : 10.1145/2791347.2791383
24. Babionitakis, K., Doumenis, G.A., Georgakarakos, G. et al. A real-time motion estimation FPGA architecture // *J Real-Time Image Proc*. 2008. No. 3. P. 3–20. <https://doi.org/10.1007/s11554-007-0070-9>
25. Panagiotis Papadimitratos, Zygmunt J. Haas Secure message transmission in mobile ad hoc networks // *Ad Hoc Networks*. 2003. №1. P. 193–209.
26. Shi X., Xiao D. A reversible watermarking authentication scheme for wireless sensor networks // *Information Sciences*. 2013. Vol. 240. P. 173-183. DOI:10.1016/j.ins.2013.03.031
27. Shant D., Premkumar P. Block Level Data Integrity Assurance Using Matrix Dialing Method towards High Performance Data Security on Cloud Storage // *Scientific Research Publishing*. 2016. Vol. 7. № 11. P. 3626-3644.
28. Таныгин М.О., Алшаиа Х.А., Добрица В.П. Оценка влияния организации буферной памяти на скорость выполнения процедур определения источника сообщений // *Труды МАИ*. 2020. № 5(114). С.15.
29. Таныгин М.О. Расчёт вероятности возникновения коллизий при использовании алгоритма контроля подлинности сообщений // *Известия Юго-Западного гос-*

ударственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-2. С. 179-182.

30. Таныгин М.О. Теоретические основы идентификации источников информации, передаваемой блоками ограниченного размера. Курск, 2020. 198 с.

Информация об авторах

Таныгин Максим Олегович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru

Ахмад Али Айед Ахмад, аспирант кафедры «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aliaid2013@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6031-9414>

Казакова Ольга Викторовна, студент кафедры «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: olya.kazakova.2000@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7755-3151>

Голубов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: golubov.swsu@gmail.com

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-74-89>

Построение LDPC-кодов с использованием модифицированного метода выборки по значимости Коула

В.С. Усатюк ¹ ✉, С.И. Егоров ²

¹ ООО «Т8»

ул. Краснобогатырская, д. 44, стр. 1, г. Москва 107076, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: usatiuk@t8.ru

Резюме

Целью исследования является модификация метода выборки по значимости Коула для поиска треппин-сетов (Trapping Sets) в LDPC-коде, позволяющая ускорить их поиск.

Методы. Коул предложил метод поиска треппин-сетов в LDPC-коде путем использования метода выборки по значимости - метода Монте-Карло со смещенной оценкой, провоцирующего отказ алгоритма декодирования в узлах, потенциально содержащихся в треппин-сетах. Его метод позволяет ускорить исследование эффективности LDPC-кодов средней длины в области больших SNR. Модифицированный метод использует свойства автоморфизмов графов Таннера, позволяющие исключить из перебора значительное число символьных узлов. Также модифицированный метод предусматривает упорядоченный перебор по подграфам, содержащим циклы.

Результаты. Предложенный метод позволил ускорить поиск треппин-сетов в PEG(1008, 504) LDPC-коде Маккея в 5027 раз по сравнению с методом Веласкеса-Субрамани, в 43 раза быстрее по сравнению с оригинальным методом Коула. В случае (2640, 1320) LDPC-кода Маргулиса предложенный метод в 28 раз быстрее квазициклического метода Веласкеса-Субрамани и в 134 раза быстрее, чем оригинальный метод Коула.

Заключение. Результат экспериментальных исследований показал возможность при помощи разработанного метода улучшить спектр связности, увеличить кодовое расстояние QC-LDPC кодов. Это позволило уменьшить вероятность ошибки на бит на выходе декодера на порядки при высоких отношениях сигнал/шум в АБГШ-канале.

Ключевые слова: LDPC-код; метод выборки по значимости; спектр связности; кодовое расстояние; метод Коула.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Усатюк В.С., Егоров С.И. Построение LDPC-кодов с использованием модифицированного метода выборки по значимости Коула // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 74-89. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-74-89>.

Поступила в редакцию 10.02.2023

Подписана в печать 20.03.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

LDPC-коды (Low Density Parity Check Codes), благодаря эффективности декодирования с мягкими метриками методом распространения доверия, нашли широкое применение в системах хранения и передачи информации: флеш-памяти, магнитных дисках, голографической памяти, оптической, беспроводной и спутниковой связи.

В процессе построения LDPC-кодов необходимо оценивать их спектр связности. Нахождение спектра связности для LDPC-кодов является NP-полной задачей, а поиск эффективных алгоритмов ее решения – открытая проблема в теории кодирования.

Для решения этой задачи в работах [1-4] Коул предложил метод, использующий выборку по значимости. Метод предполагает построение дерева поиска и перебор различных вариантов импульсов в символьных узлах дерева. В оригинальном методе не учитывались свойства автоморфизмов графов Таннера (отображение на себя), позволяющие исключить из перебора значительное число символьных узлов. Также не учитывалась возможность упорядоченного перебора по подграфам, содержащим циклы.

В данной работе предлагается модификация метода Коула, осуществляется сравнение ее эффективности с эффективностью методов Веласкеса-Субрамани [5] и эффективностью оригинального метода Коула [4].

На примере построения LDPC-кода с использованием предложенной модификации метода выборки по значимости Коула продемонстрировано повышение надежности исправления ошибок за счет увеличения кодового расстояния и улучшения спектра связности.

Материалы и методы

LDPC-код – это блочный линейный код размерностью k и длиной кодового слова n , задаваемый проверочной матрицей H размерностью $(n-k) \cdot n$, имеющей небольшую плотность отличных от нуля символов [6]. По определению проверочной матрицы для любого кодового слова v LDPC-кода справедливо следующее: $v \cdot H^T = 0$. Каждая строка проверочной матрицы H задает уравнение проверки на четность:

$$\sum_{l=0}^{n-1} v_l \cdot h_{j,l} = 0, \quad (1)$$

где $h_{j,l}$ – элемент проверочной матрицы, j – номер строки проверочной матрицы (номер проверочного уравнения); l – номер символа кодового слова.

Достоинством низкоплотностных кодов является возможность применения субоптимального алгоритма декодирования с мягкими решениями методом распространения доверия (BP, belief-propagation), обладающего значительно большей помехоустойчивостью по сравнению с алгоритмами декодирования с жесткими решениями, сложность кото-

рого растет линейно относительно длины кода. Алгоритм декодирования ВР предусматривает представление LDPC-кода в виде двудольного графа Таннера (пример графа Таннера приведен на рис. 1).

Граф Таннера G имеет два множества вершин. Одно состоит из $m=n-k$

проверочных вершин $\{c_0, c_1, \dots, c_{m-1}\}$, соответствующих m строкам матрицы H , второе – из n кодовых вершин $\{v_0, v_1, \dots, v_{n-1}\}$, соответствующих n столбцам матрицы H . Кодовая вершина v_l соединяется ребром с проверочной вершиной c_i в том случае, если $h_{j,l} \neq 0$.

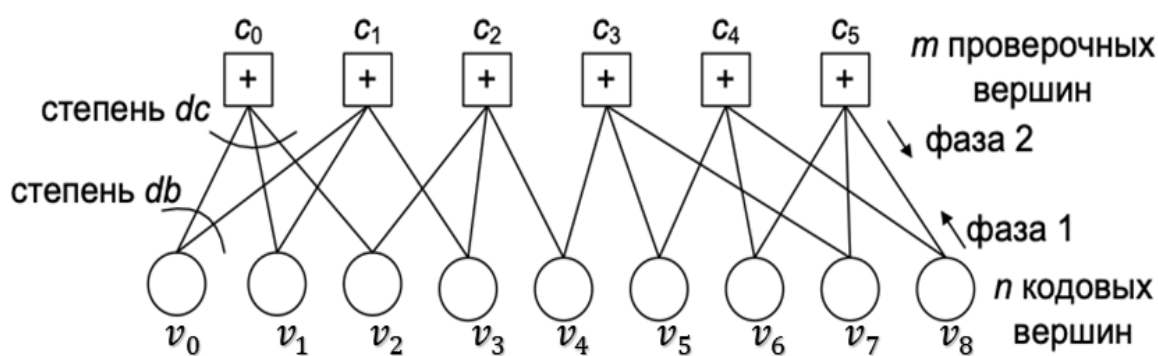


Рис. 1. Двудольный граф двоичного регулярного LDPC кода длины 9

В соответствии с итеративным алгоритмом декодирования ВР получение верных значений символов кодового слова осуществляется в результате многократного обмена сообщениями вершинами графа Таннера. Каждая итерация алгоритма содержит две фазы. В фазе 1 обновляются сообщения проверочных вершин на основе анализа сообщений кодовых вершин; в фазе 2 – сообщения кодовых вершин на основе анализа сообщений проверочных вершин.

На эффективность декодирования методом распространения доверия отрицательно влияет наличие циклов в графе Таннера, образующих треппин-сету (Trapping set, TS). Треппин-сету образуют в графе Таннера $TS(a, b)$ -подграфы, со-

стоящие из a символьных (кодовых) узлов, b из которых инцидентны проверочным узлам с нечетными степенями [4,7]. Эти подграфы обуславливают ошибку декодирования в методе распространения доверия. В случае, если вектор ошибки изменит значения в символьных узлах, инцидентных нечетному числу проверок, то при мягком декодировании методом распространения доверия ошибка не будет скорректирована, даже если она корректируема в соответствии с дистантными свойствами кода. На рис. 2 изображены два таких подграфа. Левый подграф треппин-сета $TS(5,5)$ образован пересечением трех циклов длины 8, правый подграф треппин-сета $TS(5,3)$ образован одним циклом длины 8.

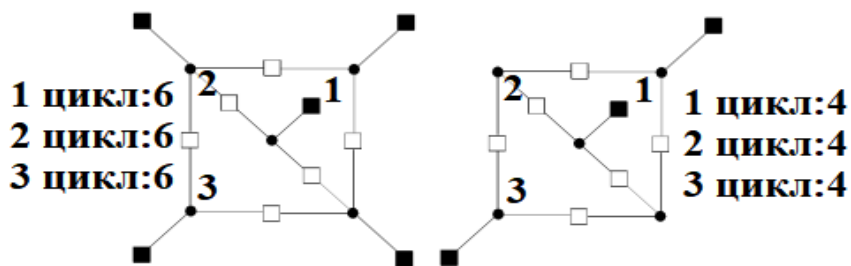


Рис. 2. Топологическое представление подграфов треппин-сетов $TS(5,5)$ (слева) и $TS(5,3)$ (справа), $\bullet$ – символичный узел, $\square$ – проверочный узел с четной степенью, $\blacksquare$ – проверочный узел с нечетной степенью

Треппин-сеты можно упорядочить при помощи простой модели их вклада в вероятность ошибки, исходя из следующих соображений: $TS(a,b)$ в процессе декодирования при некотором отношении сигнал-шум через b -символьных узлов, инцидентных нечетным проверкам, вызовет отказ метода декодирования в a -символьных узлах. В результате $\forall TS_1(a_1, b_1)$, $TS_2(a_2, b_2)$ вероятность отказа декодирования для треппин-сета TS_1 будет больше вероятности отказа декодирования для треппин-сета TS_2 , $P_{error}(TS_1) > P_{error}(TS_2)$, если выполняется отношение $b_1/a_1 < b_2/a_2$. В аппаратных реализациях мягкого итеративного де-кодирования модель отказа треппин-сетов более сложная, так как на нее влияет планировщик декодера, использование для представления данных фиксированной точки (fix-point) и другие параметры декодера [8-10].

Важной характеристикой LDPC-кода является приближенный спектр связности (ACE Spectrum) графа Таннера. Спектр связности представляется в виде вектора:

$$ACE(H) = (ACE_{4,0}(VN), ACE_{4,1}(VN), \dots, ACE_{i,j}(VN), \dots, ACE_{k,m}(VN)),$$

где $ACE_{i,j}(VN)$ – количество символических узлов, содержащихся в цикле длины i со значением связности j , VN – подмножество символических узлов графа Таннера, образующих циклы длины $i \in \{4, 6, \dots\}$. Значение связности (ACE, Approximated Cycle Extrinsic Message Degree) вычисляется для символических узлов, содержащихся в подграфе, образованном циклом $v_i \in C$,

$$ACE(C) = \sum_{v \in C} (d(v) - 2),$$

где $d(v)$ – степень инцидентности символического узла [11]. Код с лучшим спектром связности при одинаковом спектре кода при использовании декодирования методом распространения доверия обеспечивает лучшую помехоустойчивость. Декодированию этого кода не будут мешать псевдокодовые слова, обусловленные TS . Например, треппин-сет $TS(5,3)$ дает большую вероятность отказа декодирования, чем треппин-сет $TS(5,5)$, так как спектр связности треппин-сета $TS(5,3)$ содержит 3 цикла

длины восемь со значением 4, тогда как спектр связности треппин-сета $TS(5,5)$ содержит 3 цикла длины восемь со значением 6, (см. рис. 2). Увеличение значения первого ненулевого элемента спектра связности будет приводить к уменьшению вероятности отказа декодирования треппин-сета.

Кодовому слову минимального веса, определяющему кодовое расстояние LDPC-кода, соответствует треппин-сет $\min_a TS(a,0)$, $d_{\min} = a$. Таким образом, треппин-сеты вида $TS(a,0)$ соответствуют кодовым словам LDPC-кода [12]. Треппин-сеты это обобщение весового спектра кода в случае мягкого итеративного декодирования методом распространения доверия. Улучшая спектр связности для циклов, соответствующих $\min_a TS(a,0)$, мы улучшаем кодовое расстояние LDPC-кода.

В работе [13] была продемонстрирована NP сложность перечисления треппин-сетов в LDPC-кодах. Поэтому для поиска треппин-сетов и других структур, обуславливающих ошибку в методе декодирования распространением доверия, целесообразно использовать статистические методы выборки по значимости, не требующие нахождения всех треппин-сетов.

Выборка по значимости (Importance Sampling - IS) — один из методов уменьшения дисперсии случайной величины, который используется для улучшения сходимости процесса моделирования случайной величины мето-

дом Монте-Карло. Он применяется для повышения эффективности имитационного моделирования процессов исправления ошибок в системах хранения информации и телекоммуникаций, ускорения оценки вероятности статистически редких событий, возникающих в процессе декодирования помехоустойчивых кодов [7,14,15].

В работах [1-4] Коул предложил метод поиска треппин-сетов в LDPC-коде, путем использования метода выборки по значимости - метода Монте-Карло со смещенной оценкой, провоцирующего отказ алгоритма декодирования в узлах, потенциально содержащихся в треппин-сетах. Его метод позволяет ускорить исследование эффективности LDPC-кодов средней длины в области больших SNR.

Метод Коула предусматривает выполнение трех шагов.

На первом шаге с помощью декодера ищутся доминантные ошибочные события. На втором шаге вносится детерминированный шум в направлении этих событий и находится точка, соответствующая отказу алгоритма декодирования. На этом шаге проверяется действительно ли событие доминантно (т.е. вызывает отказ декодера). На третьем шаге используется процедура выборки по значимости [4] для определения малого значения BLER LDPC-кода.

Рассмотрим метод Коула подробнее.

Во множестве кодовых узлов в графе Таннера можно выделить два под-

ятности импульсной ошибки на $t-1$ уровне.

Логарифмы правдоподобия в методе распространения доверия вычисляются по формуле $LLR_{v_i} = f \times v_i$, где f – значение логарифма правдоподобия соответствующего канала и типа модуляции в имитационном моделировании. В методе поиска треппин-сетов применяется нулевое кодовое слово. При малых значениях ε декодер успешно исправит все ошибки в дереве поиска и получит нулевое кодовое слово. Когда ε будет достаточно большим, декодер не сможет исправить ошибку, и на основании жесткого решения, $LLR_{v_i} < 0$, в кодовых узлах, содержащих ненулевое значение символа, будет осуществляться проверка подграфа согласно определению треппин-сета. Выбор параметров ошибки γ и ε_{t-1} обычно осуществляется случайными бросками из соображений максимизации отказа декодирования для $S_{calibrate} \ll |S_2|$. Отметим, что правильный выбор γ , ε_{t-1} влияет на параметры a , b найденного треппин-сета $TS(a, b)$.

Выборка по значимости используется Коулом следующим образом.

В качестве несмещенной оценки вероятности блочной ошибки декодирования с мягкими метриками можно использовать выборочное среднее [16, с. 42]:

$$\overline{\text{Exp}}(x_i) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i,$$

где N – объем выборки случайной величины x_i , $x_i \in \{0, 1\}$, $x_i = 1$ – в случае

ошибки декодирования, $x_i = 0$ – в случае успешного декодирования.

В случае получения генеральной совокупности, например путем увеличения числа N экспериментов, оценка математического ожидания стремится к истинному значению со скоростью $\frac{1}{\sqrt{N}}$.

Для оценки вероятности блочной ошибки декодирования $BLER$ с доверительным интервалом $\beta = 95\%$ и относительной ошибкой $er_{rel} = 25\%$ потребуется осуществить по меньшей мере $N = \left\lceil \frac{(t_{\beta} \times er_{rel}^{-1})^2}{BLER} \right\rceil = \left\lceil \frac{(1.96 \times 4)^2}{BLER} \right\rceil$ экспериментов, где t_{β} – значение квантиля стандартного нормального распределения при значении доверительного интервала β , [16, с. 56] Например, при $BLER = 10^{-10}$ потребуется декодировать 61.47×10^{10} кодовых слов.

С целью ускорения моделирования Коул предложил осуществлять выборку случайных величин из другого смещенного распределения y_i , провоцирующего отказ декодирования:

$$\overline{\text{Exp}}(x_i) \approx \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \omega(y_i),$$

где ω – пространство метода выборки по значимости; L – объем выборки случайной величины y_i , $L \ll N$, $y_i \in \{0, 1\}$; $y_i = 1$ – в случае ошибки декодирования; $y_i = 0$ – в случае успешного декодирования. Для расчета функции плотности вероятности исходного распределения через новое распределение, для АБГШ-канала предложено применять взвешенную сум-

му плотностей вероятностей со смещенным средним:

$$f^*(y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^2} e^{-\frac{|y-\mu_i|^2}{2\sigma^2}},$$

где M – объем выборки случайной величины y ; σ – дисперсия шума; μ_i – математические ожидания, равные нулю для всех значений мягких метрик, кроме треппин-сетов и слов малого веса.

В соответствии с методом Коула моделируется передача нулевого кодового слова с зашумленными мягкими метриками. Путем зашумления мягких метрик (логарифмов правдоподобия) символьных узлов v_i осуществляется сдвиг математического ожидания распределения Гаусса к нулю. После получения списка треппин-сетов в результате отказа декодирования и проверки условия на циклы в соответствии с определением треппин-сетов выделяются узлы треппин-сета и осуществляется оценка его вклада в вероятность ошибки декодера путем вычисления обобщенного Хэммингова веса треппин-сета ω .

Весом треппин-сета ω называется вероятность перехода из нулевого кодового слова x_1 в треппин-сет x_2

$$P(x_1 \rightarrow x_2) = Q(\sqrt{2\omega SNR}),$$

где Q – q -функция, SNR – отношение сигнал-шум. Вес треппин-сета ω , в отличие от веса Хэмминга, не является не целым числом.

Для расчета вероятности блочной ошибки применяется неравенство Буля (Union Bound). Для всех найденных

слов малого веса (TS(a,0) и треппин-сетов (TS(a,b)), [4,17]:

$$BLER \approx \sum Num_{\omega} Q(\sqrt{2\omega SNR}),$$

где Num_{ω} – число кодовых, псевдокодовых слов веса ω .

Метод выборки по значимости Коула является декодеро-зависимым методом, учитывающим влияние декодера на треппин-сеты, что позволяет значительно ускорить время поиска за счет исключения треппин-сетов, чей вклад в вероятность ошибки незначителен. Однако в силу декодеро-зависимости, он проигрывает по полноте результатов (получению всех треппин-сетов в коде) методу линейного программирования Веласкеса-Субрамани.

Вычислительная сложность метода Коула определяется его первым шагом. Для ускорения работы метода предлагаются следующие модификации этого шага.

Первая предложенная модификация основана на свойствах квазициклических LDPC-кодов, а именно эквивалентности свойств символьных вершин графа, соответствующих блочным матрицам циркулянтов размера $z \times z$, [18,19]. Это позволяет уменьшить количество элементов в множестве $|S_2|$ в z раз и ускорить работу метода примерно в z раз.

Вторая модификация заключается в учете при формировании массива $|S_2|$ требования принадлежности кодовых узлов циклам либо их пересечениям и свойств треппин-сетов TS(a,b).

Пусть для множества кодовых узлов VN_i множество TS_{cycle} будет объединением кодовых узлов VN_i и кодовых узлов, добавляющих новый цикл длины $cycle$ в это множество. Тогда пользуясь определением треппин-сета $TS(a,b)$ как подграфа, состоящего из a кодовых узлов, содержащих цикл его пересечения, b из которых инцидентны проверочным узлам с нечетными степенями, мы можем ввести отношение порядка для треппин-сетов:

$$TS(a,b) < TS'(a',b') : b = b', a \leq a'.$$

Поскольку отказ декодера в результате наличия циклов в графе возникает через $\lceil iter/2 \rceil$ итераций, можно сформировать упорядоченные множества S_2 , начиная от минимальной длины цикла в графе $girth$ (обхвата графа), до максимальной длины цикла max ,

определенной необходимым числом итераций в методе распространения доверия.

В результате получим:

$$S_2 \setminus \lfloor girth/2 \rfloor, S_2 \setminus \lfloor (girth+2)/2 \rfloor, \dots, S_2 \setminus \lfloor max/2 \rfloor. \quad (3)$$

Если количество кодовых символов с ненулевым значением подмножества с соответствующим числом итераций метода распространения доверия равно нулю, но нет необходимости осуществлять дальнейшие итерации, переходим к следующему множеству. Принадлежность кодового узла циклу может быть эффективно вычислена, используя метод быстрого подсчета числа циклов в графе Таннера LDPC-кода по свойствам степени матрицы инцидентности [20]. Пример применения модифицированного метода для вычисления принадлежности узлов графа Таннера циклам длины 4 и 6 для квазициклического LDPC-кода (2560, 2048) приведен в табл.1.

Таблица 1. Среднее число циклов длины 4, 6, проходящих через кодовые и проверочные символы квазициклического LDPC-кода (2560, 2048) с проверочной матрицей размера 4 на 20

циклы 6		3,7	5	5	7	8,7	7,7	11	11	7	9	7,7	6,7	9,3	9,3	7,3	9,3	9	9	9	10,7
	циклы 4	0,5	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39,7	0,5	34	1	81	20	0	0	0	8	54	0	44	111	28	99	75	81	81	42	30	119
38,3	0	-1	85	36	18	113	59	29	58	123	38	3	91	113	1	0	89	72	44	78	90
42,3	0,5	122	-1	41	71	10	85	110	66	99	77	109	100	0	43	33	124	26	98	74	28
42,7	0	109	103	-1	75	36	12	58	127	53	114	1	18	48	116	120	15	51	63	95	68

Формируя множество вершин $|S_2|$ начиная от кодовых символов, содержащихся в максимальном числе циклов длины 4, 6, 8, ..., мы можем осуществить дальнейшее уменьшение множества вершин $|S_2|$. Например, кодовые

узлы участвуют в циклах длины 4 лишь в двух (1 и 3) из 20 кодовых вершин, в циклах длины 6, две (7 и 8) кодовые вершины из 20 содержатся в максимальном числе циклов (11).

Используя среднее число итераций, сравнительно малое по сравнению с

максимальным числом итераций, достаточное для сходимости декодера на требуемом уровне отношения сигнал-шум SNR, мы можем отбросить большую часть подмножеств массива $|S_2|$, уменьшая его на несколько порядков. Если подмножество не было успешно декодировано, оставшиеся итерации осуществляются на значительно меньшем числе кодовых узлов. Такой подход позволяет уменьшить число обрабатываемых узлов, а также упрощает многопоточную реализацию, управление потреблением оперативной памяти в соответствии с аппаратными ограничениями.

В алгоритме Коула предложено хранить историю процесса декодирования по каждой из итераций первого шага ("It is important to have a definition of a TS which takes into account the entire history of the decoding process and not just the final state", страница 8). Необходимость хранения полного списка результатов итераций декодирования аргументируется необходимостью быстрой оценки веса псевдокодированного слова треппин-сети. Однако на практике процедура оценки псевдокодированного слова – гораздо менее вычислительно затратная часть алгоритма по сравнению с необходимостью выполнения всех итераций на всех возможных подграфах, потенциально содержащих треппин-сет, на первом шаге. Более того декодеры, применяемые на практике, чаще всего применяют алгоритм ранней остановки декодирования для снижения энергопо-

требления и соответственно раньше завершают процесс декодирования.

Таким образом, предложенная модификация метода Коула содержит следующие изменения:

1. Для квазициклического кода число кодовых узлов графа Таннера уменьшается в Z раз (Z – размер циркулянта). Все узлы в циркулянте ведут себя одинаково в силу автоморфизмов двудольного Таннер-графа.

2. С учетом определения треппин-сети новый узел добавляется в множество LLR_{TS} , только если он образует цикл с остальными узлами в множестве (п.8).

3. Нет необходимости осуществлять максимальное количество итераций декодера и хранить полную историю декодирования.

Модифицированный алгоритм Коула для поиска треппин-сетов

Вход: Проверочная матрица квазициклического LDPC-кода с числом символьных узлов, уменьшенных в Z раз (Z – размер циркулянта), гиперпараметры $\gamma, \epsilon_1, \epsilon_2$, максимальное число итераций алгоритма декодирования $iter_{max}$, среднее число итераций алгоритма декодирования $iter_{avg}$.

Выход: Список треппин-сетов

$TS_{list} = \{TS_1(a,b): v_1, v_2, \dots, v_a; TS_2(a,b): v_1, v_2, \dots, v_a; \dots\}$, содержащий параметры треппин-сетов (a, b) и списки символьных узлов их образующих.

1. $TS_{list} = \{0\}$.

2. Выполнять в цикле (можно параллельно) по всем комбинациям S_2 множества деревьев с ошибками веса w_H .

3. Выполнять в цикле по итерациям графа декодирования $j = \text{iter}_{\text{avg}} \dots \text{iter}_{\text{max}}$:

4. Присваиваем значения логарифмов правдоподобия w_H символьным узлам кодового слова веса $LLR_{TS}(S_2) = \text{chan}_{LLR} \times (1 - \varepsilon_i)$, оставшимся $n - w_H$ символьным узлам кодового слова присваиваем значения $LLR_{\text{Code}/TS}(S_2) = \text{chan}_{LLR} \times \gamma$.

5. Выполняем декодирование с j итерациями на основе проверочной матрицы H с логарифмами правдоподобия $LLR_{TS}, LLR_{\text{Code}/TS}$.

6. Если в результате декодирования с j итерациями получаем нулевой синдром $Hx = 0$ и исходное сообщение, переходим к шагу 9.

7. Если в результате декодирования получаем нулевой синдром $Hx = 0$ и неверное сообщение, то найдено слово малого веса $TS(a, 0)$. Вносим его в список: $TS_{\text{list}} = TS_{\text{list}} \cup TS(a, 0)$ и записываем соответствующие символьные узлы графа: $v_1, v_2, \dots, v_a$.

8. Если в результате декодирования получаем ненулевой синдром $Hx \neq 0$, осуществляем проверку в соответствие с определением треппинг-сета. Если обнаружен треппинг сет, вносим его в список $TS_{\text{list}} = TS_{\text{list}} \cup TS(a, b)$ и записываем символьные узлы графа треппинг-сета (псевдокодированного слова): $v_1, v_2, \dots, v_a$.

9. Конец цикла по итерациям графа декодирования.

10. Конец цикла по комбинациям S_2 .

11. Вернуть TS_{list} .

Алгоритм поиска треппинг-сетов имеет два гиперпараметра $\gamma \in (0, 1]$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, ε_1 – ошибка в узлах первого уровня дерева, ε_2 – ошибка второго

уровня дерева (см. рис. 3). Для коротких кодов $n \leq 4000$, $\varepsilon_1 \in [2\varepsilon_2, 8\varepsilon_2]$, для длинных кодов $\varepsilon_1 \in [1.1\varepsilon_2, 2\varepsilon_2]$. На практике для кодов с высоким значением спектром связности, обхватом ≥ 6 и $EMD \geq 3$, полученных в результате применения метода имитации отжига и увеличения кодового расстояния при помощи геометрии чисел [21, 22], чаще всего $\gamma \in [0.15, 0.7]$. Для кода с распределением весов столбца $\text{var}_{\text{deg}} = (d_{\text{max}}, d_{\text{max}-1}, \dots, d_{\text{min}-1}, d_{\text{min}})$ достаточно рассмотреть

$$w_H = [d_{\text{max}} + d_{\text{min}}, d_{\text{max}} + 2 * \text{card} \left[\frac{\text{var}_{\text{deg}}}{d_{\text{max}}} \right] + 1],$$

где d_{max} – максимальный вес столбца, d_{min} – минимальный вес столбца, $\text{card}[\text{var}_{\text{deg}}/d_{\text{max}}]$ – число различных распределений весов столбца за исключением максимального веса.

Логарифмы правдоподобия в символьных узлах с импульсной ошибкой веса w_H равны $LLR_{TS} = \text{chan}_{LLR} \times (1 - \varepsilon_i)$, например, для фазовой модуляции (BPSK) на АБГШ-канале (AWGN-channel) $\text{chan}_{LLR} = \frac{2y}{\sigma^2}$, y – принятая точка модуляционного созвездия, σ – дисперсия шума АБГШ-канала.

Логарифмы правдоподобия в узлах без импульсной ошибки равны $LLR_{\text{Code}/TS} = \text{chan}_{LLR} \times \gamma$. Чем больше ε , тем больше вероятность отказа декодера с мягкими метриками в результате треппинг-сетов.

Параметр γ определяет возможность символьных узлов оставшегося подграфа, образованного узлами, не содержащими треппинг-сет, исправить ошибку, вызванную его узлами.

Пример результатов вывода данных алгоритмом: трэппин-сет (11, 10): $v_1=301$, $v_2=1167$, $v_3=1911$, $v_4=1947$, $v_5=3067$, $v_6=4272$, $v_7=4300$, $v_8=6682$, $v_9=7426$, $v_{10}=8336$, $v_{11}=9295$. Остальные символьные узлы квазициклического кода получаются путем Z-1 циклических сдвигов узлов $v_1 - v_9$.

Для вычисления вероятности ошибки на бит применяется линейная модель Шлегеля-Занга, [23].

Оценим требования к ОЗУ для реализации предложенного метода. Проверочные матрицы квазициклических LDPC-кодов, приведенные в следующем разделе, содержат 77 ненулевых циркулянтов размера 128 ($z=128$) в матрице размером 4 на 20. Для этих кодов потребовалось 16 Гб памяти для поиска трэппин-сетов TS(a,b), $b_{\max} \leq 29$. Умеренное использование ОЗУ позволяет применять графические ускорители GPU NVIDIA TITAN RTX и платы акселераторов на FPGA. NVIDIA TITAN RTX обеспечивает ускорение от 2 до 19 раз по сравнению с многоядерными (16 ядер) микропроцессорами. Современные платы FPGA (например, BittWare XUP-P3R) могут быть оснащены высокоскоростной оперативной памятью (до 512 Гбайт DDR4) и позволяют выполнить большую часть многоэтапной обработки на устройстве FPGA, обеспечивая ускорение по сравнению с GPU от 1,5 до 25 раз.

Результаты и их обсуждение

Сравнение эффективности предложенного метода с оригинальным методом Коула и методом Веласкеса-Субрамани приведено в табл. 2.

Предложенный метод позволил ускорить поиск трэппин-сетов в LDPC-коде Маккея PEG(1008, 504) в 5027 раз по сравнению с методом Веласкеса-Субрамани, в 43 раза по сравнению с оригинальным методом Коула. В случае LDPC-кода Маргулиса (2640, 1320) предложенный метод в 28 раз быстрее квазициклического метода Веласкеса-Субрамани и в 134 раза быстрее оригинального метода Коула.

Для демонстрации эффективности метода были построены два нерегулярных QC-LDPC-кода (2560, 2048) с базовой матрицей размера 4x20. Первый код А имеет обхват 4 ($d_{upper}=40$), второй код Б - обхват 6 ($d_{upper}=50$). Точные спектры связности графа Таннера для этих кодов: (4,2)=1;0,(4,3)=0;0,(4,4)=0;0,(6,2)=2;0,(6,3)=0;0,(6,4)=1;0,(6,5)=35;6016,(6,6)=125;14720, (8,2)=1;0, (8,3)=2;0, (8,4)=9;256, (8,5)=28;5248, (8,6)=242;33280, (8,7)=2122;276608, (8,8)=5381; 703232, (10,2)=2;0, (10,3)=2;0, (10,4)=18;256. Пара в скобках обозначает длину цикла и значение EMD, пара в правой части равенства обозначает число циклов для кодов А и Б, соответственно.

Таблица 2. Время, необходимое для поиска треппин-сетов TS(a,b) в соответствующих LDPC-кодах, в секундах

TS(a, b)	LDPC-код Маккея PEG(1008, 504) /			LDPC-код Маргулиса (2640, 1320) /		
	BC метод [5]	Предложенный метод	Метод Коула [4]	BC метод [5]	Предложен- ный метод	Метод Коула [/
a=5	53,42	99,5 (1-поток), 7 (32-потока)	4320 (1,2 часа)	520,95	0,97	29520 (8.2 часа)
a=6	31,74			4373,78		
a=7	984,51			716,04		
a=8	4,1			18843,19		
a=9	4864,37			13504,13	3479	
a=10	8143,11					
a=11	485919,5					
a=12	245,1					
...						
a=18						

На основе предложенного метода был получен список треппин-сетов в построенных кодах. Табл. 3 демонстрирует, как улучшение спектра связности

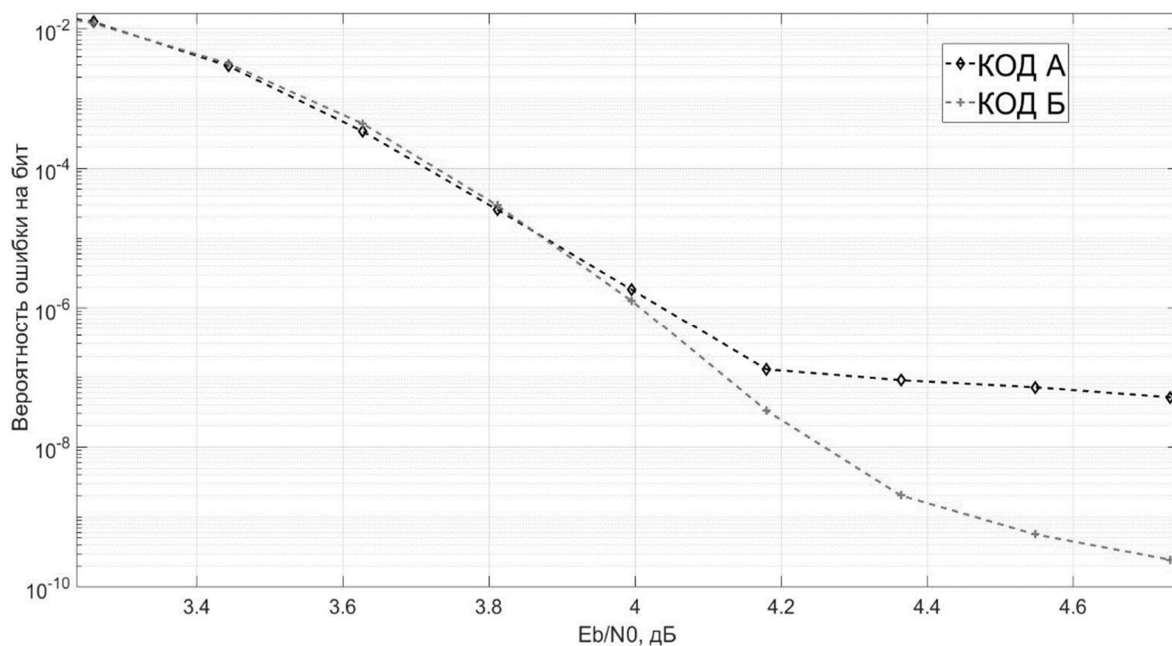
и кодового расстояния приводит к уменьшению количества треппин-сетов и тем самым к повышению эффективности декодирования кода (рис.4).

Таблица 3. Сводный список треппин-сетов TS(a, b) для кода А; кода Б

	b=2	b=3	b=4	b=5	b=6	b=7	b=8	b=9
a=2	128;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0
3	128;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0
4	0;0	0;0	520;79	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0
5	0;0	6;0	344;5	393;174	0;0	0;0	0;0	0;0
6	0;0	3;0	196;12	671;267	3728;2700	0;0	0;0	0;0
7	0;0	5;0	105;35	744;323	5109;3218	12434;14341	0;0	0;0
8	0;0	0;0	98;46	915;337	6959;4302	15427;14497	22615;31041	0;0
9	0;0	2;0	130;14	888;467	5102;3481	18550;16503	24858;24757	29106;37520
10	0;0	2;0	113;21	677;451	3492;2526	11791;9403	30707;28995	30834;32280
11	0;0	3;0	102;32	510;350	2303;1804	7106;5786	16947;15297	31194;30175
12	0;0	14;0	73;20	383;234	1482;1135	4125;3417	9075;7902	17218;14947

Таблица 3. Сводный список треппин-сетов TS(a, b) для кода А; кода Б

	b=2	b=3	b=4	b=5	b=6	b=7	b=8	b=9
13	0;0	8;0	58;24	243;164	849;673	2194;1743	4779;3738	9119;7014
14	1;0	7;2	29;19	165;81	519;326	1184;841	2360;1590	4735;3131
15	0;0	3;0	18;8	77;38	260;137	575;345	1195;643	2388;1340
16	0;0	2;0	8;2	40;15	112;65	245;125	519;274	1059;446
17	0;0	1;0	2;2	13;3	53;21	111;39	252;85	482;185
18	0;0	0;0	2;0	2;1	16;7	48;8	131;31	223;73
19	0;0	0;0	2;0	2;0	4;1	21;8	53;10	103;28
20	0;0	0;0	0;0	1;0	2;1	14;0	19;2	44;9
21	0;0	2;0	0;0	0;0	2;0	8;0	5;1	15;1
22	0;0	0;0	0;0	0;0	1;0	3;0	4;0	9;1
23	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0	1;0	1;1
24	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;0	0;1	1;0

**Рис. 4.** Результаты моделирования LDPC-кодов на 20 итерациях Layered Normalized Min-Sum декодера с фиксированной точкой (4,4,6), двоичная фазовая модуляция

В результате улучшения спектра связности кода Б вероятность ошибки на бит уменьшилась на два порядка при высоких отношениях сигнал/шум.

Выводы

В статье предложен модифицированный метод выборки по значимости

Коула для поиска треппин-сетов. Предложенный метод значительно ускорил

поиск треппинг-сетов по сравнению с ранее предложенными методами. На примере построения LDPC-кодов продемонстрировано, как улучшение спектра связности, кодового расстояния приводит

к уменьшению числа треппинг-сетов и соответствующему повышению энергетического выигрыша в области высоких отношений сигнал/шум.

Список литературы

1. Cole C. A., et al. Regular $\{4, 8\}$ LDPC Codes and Their Low error Floors // MILCOM. 2006. P. 1-7
2. Cole C. A., et al. Analysis and Design of Moderate Length Regular LDPC Codes with Low Error Floors // 40th CISS. 2006. P. 823-828.
3. Cole C. A. Error floor analysis for an ensemble of easily implementable irregular (2048, 1024) LDPC codes // MILCOM. 2008. P. 1-5.
4. Cole S. A., Wilson E. H., Giallorenzi T. A general method for finding low error rates of LDPC codes. URL: arxiv.org/abs/cs/0605051. (date of treatment: 14.04.2022)
5. Velasquez A., et al. Finding Minimum Stopping and Trapping Sets: An Integer Linear Programming Approach // In: Lee J., Rinaldi G., Mahjoub A. (eds) Comb. Optim. ISCO 2018. Lect. Notes in Comp. Science. Vol. 10856. P.. 402–415
6. Усатюк В.С., Егоров С.И. Устройство для оценки кодового расстояния линейного блочного кода методом геометрии чисел // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. № 4 (25). С. 24-33.
7. Richardson T. J. Error floors of LDPC codes // in 41st Annual Allerton Conference on Comm., Control and Computing. Oct. 2003. P. 1426–1435.
8. Improved min-sum decoding algorithms for irregular LDPC codes / J. Chen, R. M. Tanner, C. Jones, Y. Li // ISIT. 2005. P. 449-453.
9. Two-dimensional correction for min-sum decoding of irregular LDPC codes / J. Zhang, M. Fossorier, D. Gu, J. Zhang // in IEEE Communications Letters. March 2006. Vol. 10. № 3. P. 180-182.
10. Zhang S., Schlegel C. Controlling the Error Floor in LDPC Decoding // in IEEE Transactions on Comm. 2013. Vol. 61(9). P. 3566-3575.
11. Tian T., et al Selective avoidance of cycles in irregular LDPC code construction// in IEEE Trans. on Comm. 2004. Vol. 52. № 8. P. 1242-1247.
12. Vasić B., et al Trapping set ontology // 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). 2009. P. 1-7.
13. McGregor A., Milenkovic O. On the Hardness of Approximating Stopping and Trapping Sets in LDPC Codes // IEEE ITW. 2007. P. 248-253.

14. Jeruchim M. Techniques for estimating the bit error rate in the simulation of digital communication systems // IEEE Journal on selected areas in communications. 1984. Vol. 2. № 1. P. 153–170.
15. Smith P. J., Shafi M., Gao H. Quick simulation: A review of importance sampling techniques in communication systems, // IEEE J.Select.Areas Commun. 1997. Vol. 15. P. 597–613.
16. Компьютерное моделирование / В.М. Градов, Г.В. Овечкин, П.В. Овечкин, И. В. Рудаков. М.: КУРС: Инфра-М, 2020. 264 с.
17. Vasić B., Chilappagari S.K., Nguyen D. V. Chapter 6 - Failures and Error Floors of Iterative Decoders, Editor(s): Declercq D., Fossorier M., Biglieri E., Academic Press Library in Mobile and Wireless Comm. 2014. P. 299-341
18. Tanner R. M., Fuja T. E., Sridhara D. A Class of Group Structured LDPC Codes // Proceedings 6th ISCTA, Ambleside, England, July 2001. P.365-370.
19. Fossorier M. P. C. Quasi-cyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices // IEEE Trans. Inf. Theory. Aug. 2004. Vol. 50. № 8. P. 1788–1793.
20. Halford T. R., Chugg K. M. An algorithm for counting short cycles in bipartite graphs // in IEEE Trans. on Inform. Theory. 2006. Vol. 52(1). P. 287-292.
21. Usatyuk V., Vorobyev I. Simulated Annealing Method for Construction of High-Girth QC-LDPC Codes // 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Athens, Greece, 2018.
22. Usatyuk V., Egorov S., Svistunov G. Construction of Length and Rate Adaptive MET QC-LDPC Codes by Cyclic Group Decomposition // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Batumi, Georgia, 2019.
23. Schlegel C., Zhang S. On the Dynamics of the Error Floor Behavior in (Regular) LDPC Codes // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. Vol. 56. № 7. P. 3248-3264.

Информация об авторах

Усатюк Василий Станиславович, кандидат технических наук, главный инженер департамента исследований и разработок, ООО «Т8», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: usatiuk@t8.ru

Егоров Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sie58@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5859-1024>

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-90-102>

Адаптивный алгоритм системы пользовательского интерфейса инвалидной коляской-вертикализатором

С.Ф. Яцун¹, А.В. Мальчиков¹✉, М.П. Щербакова¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Резюме

Цель. Разработка схемы и адаптивного алгоритма работы интеллектуальной человеко-машинной системы пользовательского интерфейса инвалидной коляски-вертикализатора, учитывающего физиологические особенности оператора, колесной платформы и внешней среды.

Задачи. Изучение физиологических особенностей человеко-машинного взаимодействия у людей с повреждением опорно-двигательного аппарата. Разработка конструкции и математическое описание джойстика как компонента человеко-машинной системы. Разработка адаптивного алгоритма и математического обеспечения системы пользовательского интерфейса инвалидной коляски-вертикализатора.

Методы. Использование метода конечных автоматов для описания алгоритма переключения режимов движения. Применение полиномиальных функций с целью получения гладких законов изменения задающих значений для приводов устройства. Использование нелинейных коэффициентов чувствительности рукоятки джойстика для обеспечения адаптивных режимов движения коляски-вертикализатора.

Результаты. В ходе исследования были разработаны и описаны режимы движения инвалидной коляски-вертикализатора. Представлены и описаны схема конструкции и принцип работы джойстика. Математически и графически описаны режимы функционирования человеко-машинной системы. Предлагаемые в работе адаптивные алгоритмы системы пользовательского интерфейса инвалидной коляски-вертикализатора интерпретируют наклоны джойстика в задающие сигналы для регуляторов приводов коляски. Описано использование нелинейных коэффициентов чувствительности рукоятки джойстика для обеспечения адаптивных режимов работы коляски, учитывающих особенности движения рук людей с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата, движение коляски и состояния внешней среды.

Заключение. Разработанные в рамках работы адаптивные алгоритмы человеко-машинной системы и режимы движения инвалидной коляски-вертикализатора позволяют повысить безопасность и плавность движения за счет использования нелинейных коэффициентов чувствительности рукоятки джойстика и гладких законов задающих воздействий, полученных на основании полиномиальных функций.

Ключевые слова: инвалидная коляска-вертикализатор; джойстик; адаптивные алгоритмы; режимы движения; гладкая функция; конечный автомат.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке программы стратегического развития вузов "Приоритет-2030".

Для цитирования: Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Щербакова М.П. Адаптивный алгоритм системы пользовательского интерфейса инвалидной коляской-вертикализатором // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 90-102. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-90-102>.

Поступила в редакцию 23.11.2022

Подписана в печать 18.01.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Проблема помощи людям с нарушением опорно-двигательного аппарата остаётся одной из самых сложных, требующих от общества не только её понимания, но и участия в её решении. Согласно государственной информационной системе «Федеральный реестр инвалидов», на октябрь 2022 г., количество инвалидов в России превысило 10 млн., среди которых более 1 млн. человек – это инвалиды I группы, не менее трети которых не могут передвигаться самостоятельно. Для помощи таким людям призваны помочь различные приспособления: пандусы, подъёмники (вертикальные и горизонтальные), ступенькоходы, вертикализаторы, инвалидные кресла. Наиболее универсальным из перечисленных систем помощи инвалидам является коляска-вертикализатор [1-4]. Результаты клинических исследований показывают, что регулярная вертикализация является одной из самых эффективных реабилитационных процедур, которая показана пациентам с болезнями опорно-двигательного аппарата (ОДА) [5-7]. Она способна во многом улучшить обмен веществ и процесс кровообращения, ее методы самым благоприятным образом воздействуют на дыхательную, опорно-двигательную и

нервную систему человеческого организма [7].

Совмещение транспортных функций и функций вертикализатора требует особого внимания к реализации пользовательского интерфейса, с помощью которого оператор устройства может задавать требуемый режим работы. Вместе с тем, у людей с нарушением ОДА более чем в 50% случаев наблюдаются нарушения общей и мелкой моторики рук [8].

В связи с этим возникают сложности в управлении роботизированными устройствами из-за некорректного использования джойстика. Таким образом, необходима интеллектуальная фильтрация воздействий со стороны оператора. В отдельных случаях система не должна реагировать на поступающие воздействия, например, одновременное задание нескольких режимов движения, максимальное задание скорости движения, резкое изменение режима движения и т.д.

В рамках работы рассматривается актуальная проблема исследования и создания человеко-машинного интерфейса инвалидной коляски-вертикализатора (ИКВ) [9-11], учитывающего особенности людей с ограниченными возможностями.

Целью работы является разработка схемы и принципа работы интеллектуаль-

ной человеко-машинной системы пользовательского интерфейса ИКВ, реализующего адаптивные алгоритмы, учитывающего физиологические особенности оператора, колесной платформы и внешней среды.

Материалы и методы

Важнейшим вопросом при создании устройств коллаборативной робототехники является передача информации между машиной и оператором. К сожалению, быстрота реакции и огра-

ничения восприятия людей с инвалидностью не всегда позволяет избежать столкновений с препятствиями, правильно выбрать траекторию и скорость движения, обеспечить безопасность [12-14]. Рассматриваемые в работе адаптивные алгоритмы системы управления, позволяют обеспечить комфорт и безопасность пользователя и устройства ИКВ.

Схема конструкции и системы автоматического управления рассматриваемого устройства показана на рис. 1.

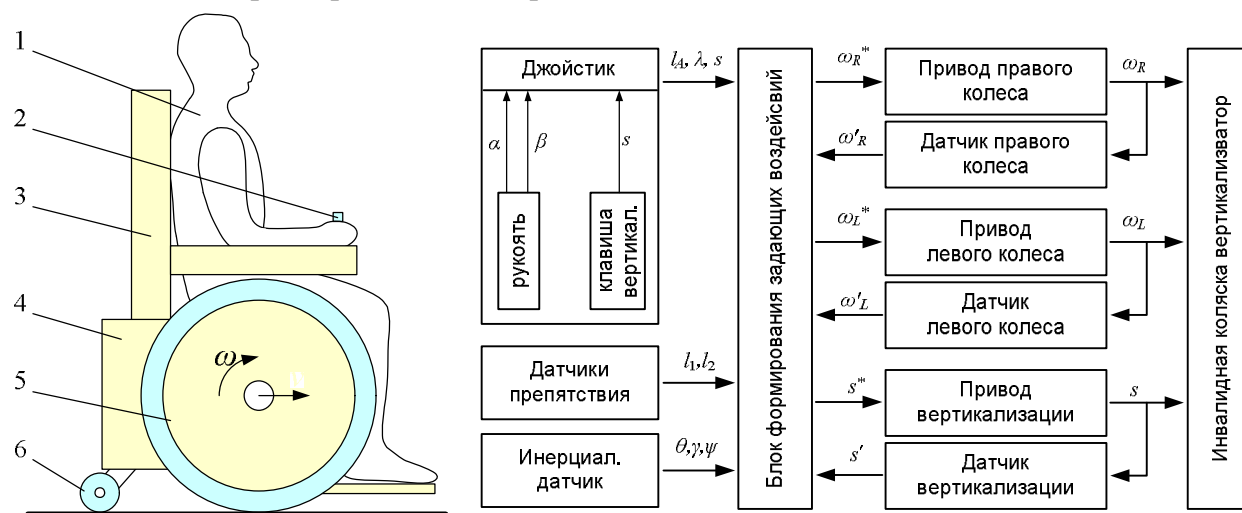


Рис. 1. Схема конструкции и системы управления инвалидной коляски-вертикализатора (ИКВ):

1 – оператор ИКВ; 2 – джойстик ИКВ; 3 – привод вертикализации; 4 – блок управления и аккумуляторов; 5 – ведущее колесо ИКВ; 6 – пассивное колесо

Инвалидная коляска-вертикализатор состоит из колесной платформы, устройства вертикализации и блока управления, оснащенного джойстиком, расположенного на подлокотнике. Для выбора режима работы ИКВ: коляска или вертикализация, используется отдельная клавиша джойстика. Для задания скорости и направления движения в режиме коляски используется непосредственно сам джойстик. Сигналы с ин-

формационной системы джойстика (l_A, λ, s) поступают на блок управления, который формирует сигналы для контуров управления скоростью вращения ведущих колес ИКВ (ω_R^*, ω_L^*). В режимах движения также используются данные с датчиков препятствий (l_1, l_2).

Рассмотрим схему конструкции важнейшего элемента человеко-машинной системы – джойстика (рис. 2).

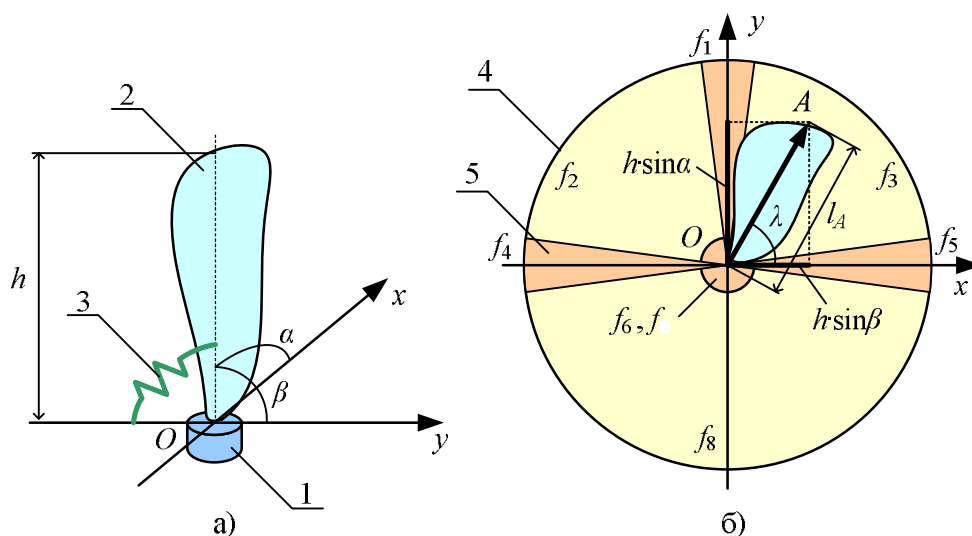


Рис. 2. Схема джойстика ИКВ: **1** – основание джойстика; **2** – рукоятка; **3** – возвратная пружина; **4** – проекция рабочей области рукоятки на плоскость Oxy ; ось, **5** – зоны нечувствительности

Джойстик представляет собой подпружиненную рукоятку, оснащенную двумя датчиками угла поворота α и β (поворот вокруг оси y и x , соответственно) (рис.2,а). В конструкции джойстика присутствуют механические ограничители, не позволяющие отклонять рукоятку более 60° от вертикального положения. Указанный функционал джойстика позволяет осуществлять регулирование скорости и направления движения устройства.

Предлагаемые в работе алгоритмы системы пользовательского интерфейса инвалидной коляской-вертикализатором призваны интерпретировать наклоны джойстика в задающие сигналы для регуляторов приводов ИКВ. Адаптивные свойства алгоритма обусловлены учетом различных факторов при формировании сигналов для приводов устройства. Так, например, необходим учет текущей скорости при смене режимов

(недопущение опрокидывания при повороте на скорости), ограничение желаемой скорости в зависимости от условий движений, обеспечение плавности разгона, торможения и поворота, фильтрация импульсных воздействий на рукоятку, вызванные спастичностью, судорогами или тремором у пациента. Для обеспечения адаптации задающей скорости вращения колес к сигналам рукоятки, в работе предлагается использовать нелинейные коэффициенты чувствительности, позволяющие ограничивать максимальные значения задающей скорости, игнорировать незначительные и случайные отклонения рукоятки при движении ИКВ.

Результаты и их обсуждение

Для удобства математического описания алгоритмов, сигнал с джойстика представим в виде вектора OA , выхо-

дящего из начала координат и направленного под углом λ (рис. 2, б).

Длина вектора l_A будет определяться следующим образом: $|OA| = \sqrt{(\hat{\alpha}^2 + \hat{\beta}^2)}$, где $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$ – показания датчиков углов поворота, а направление определяем согласно: $\lambda = \arctg(\hat{\alpha}/\hat{\beta})$. Далее будем опе-

рировать только значениями l_A и λ , характеризующими перемещение рукоятки джойстика.

Алгоритм перехода между отдельными режимами функционирования устройства покажем в виде схемы конечного автомата (рис.3).

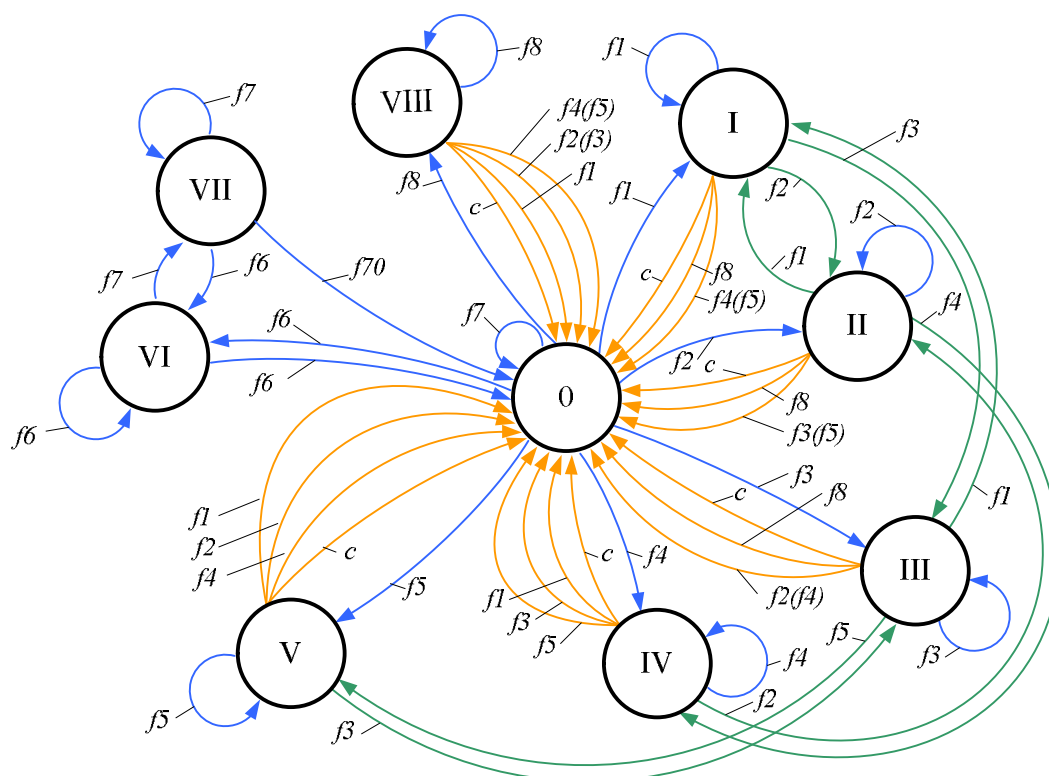


Рис. 3. Конечный автомат переходов между режимами движения

На данной схеме римскими цифрами I-VIII и 0 обозначены режимы, а латинскими буквами, в том числе с индексами, обозначены условия перехода. Как видно из схемы, большинство режимов может переключиться только при полной остановке (режим 0). Однако, возможны и плавные переходы, например между режимами «вперед» и «вперед влево» («вперед вправо»), при

этом пересчет угловых скоростей обеспечивает требуемые динамические характеристики движения ИКВ.

Плавный переход между режимами достигается за счет формирования гладких законов изменения задающих значений для приводов устройства полиномиальными функциями следующим образом: $\vec{\Omega} = (0, \sum_{i=0}^3 k_i t^i)^T$, где ко-

эффиценты k_i определяются следующим образом [15]:

$$\begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_T & t_T^2 & t_T^3 \\ 1 & t_K & t_K^2 & t_K^3 \\ 0 & 1 & 2t_T & 3t_T^2 \\ 0 & 1 & 2t_K & 3t_K^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_T \\ \omega_K \\ \dot{\omega}_T \\ \dot{\omega}_K \end{bmatrix}.$$

В нашем случае t_T – текущее время (определяется в миллисекундах по системному таймеру с момента включения питания системы управления ИКВ); t_K – конечное время (время, до которого устройство должна набрать/снизить заданную джойстиком скорость); $\omega_T, \dot{\omega}_T$ – текущее значение скорости (определяется с помощью датчиков, установленных на приводах ведущих колес) и ее производной (рассчитывается на контроллере методом конечных разностей); $\omega_K, \dot{\omega}_K$ – задаваемое наклоном джойстика значение желаемой скорости и ее производная (в большинстве случаев $\dot{\omega}_K=0$). Временной отрезок $[t_T, t_K]$ при расчете разгонных (тормозных) траекторий определяется согласно заданным заранее ограничениям максимального ускорения движения коляски (в общем случае определяется возможностями силовой установки ИКВ, однако может быть снижено по рекомендациям врачей). В пересчете на ускорение вращения вала привода это значение $\varepsilon_{\max}$. Конечное время для построения полинома зависит от предельных значений ускорения (перегрузок) и текущих измеряемых и рассчитываемых параметров скорости и может быть записано следующим образом:

$$t_K = t_T + \frac{(\omega_K - \omega_T)}{\varepsilon_{\max}}.$$

Обратим внимание, что значение максимального ускорения для разных режимов может быть разным.

Таким образом, требуемый закон изменения задающей скорости может быть представлен функцией исходных и рассчитываемых и измеряемых параметров в следующем виде:

$$\omega^* = \Omega(t_T, t_K, \omega_T, \omega_K, \dot{\omega}_T, \dot{\omega}_K, t). \quad (1)$$

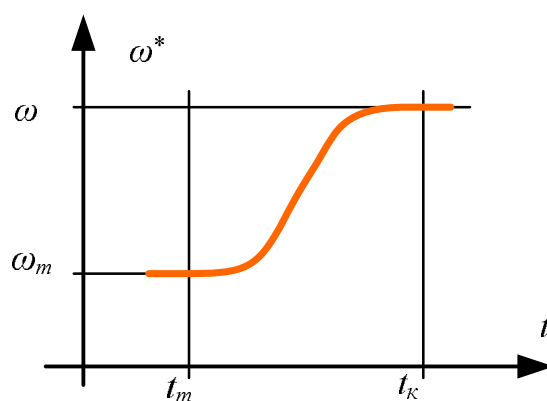


Рис. 4. Схема построения закона задающих воздействий с помощью полиномиальной функции

Таким образом требуемое значение скорости адаптируется в зависимости от состояния и текущего режима ИКВ.

В рамках рассматриваемой работы, согласно схеме на рис. 3, предлагается набор из 8 режимов движения робота в зависимости от положения рукоятки джойстика. Рассмотрим подробно режимы работы устройства и условия переходов.

I (VIII). «Вперед» («назад»). Базовым режимом движения для ИКВ является прямолинейное движение «вперед». Условием запуска режима «вперед» является наклон рукоятки в поло-

жительном направлении вокруг оси y , $f1$: ($85^\circ < \lambda < 95^\circ$).

Движение «назад» инициируется наклоном рукоятки в отрицательном направлении вокруг оси y $f10$: ($-95^\circ < \lambda < -85^\circ$).

При задании движения «вперед» («назад») система управления формирует гладкий закон изменения скорости до значения, соответствующего положению рукоятки, следующим образом:

$$\omega^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, k_\alpha l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), t \in [t_T, t_k], \quad (2)$$

где k_α – коэффициент чувствительности рукоятки джойстика вокруг оси x .

При активации режима движения «назад» система формирует сигнал для системы управления приводами аналогичным способом. Отметим, что коэффициент чувствительности рукоятки k_α является функцией угла наклона рукоятки следующим образом: $k_\alpha(\alpha) = k'_\alpha$ – для движения вперед, $k_\alpha(\alpha) = k''_\alpha$ – для движения назад.

С помощью нелинейного коэффициента чувствительности датчика система ограничивает максимально допустимую скорость движения назад, оставляя возможность точно настроить скорость с помощью рукоятки. Введение коэффициента чувствительности рукоятки джойстика открывает широкие возможности при реализации человеко-машинного взаимодействия. Так, например, коэффициент k_α может зависеть от текущей скорости коляски, снижая чувствительность на большой скорости или повышая чувствительность при медленном движении (преодоление

препятствий, приближение к объектам вплотную и т.д.).

В простейшем случае значения коэффициентов могут быть определены исходя из максимальной скорости коляски следующим образом: $k'_\alpha = \omega_{\max.f} / l_{A.\max}$, $k''_\alpha = \omega_{\max.b} / l_{A.\max}$, где $\omega_{\max.f}$ и $\omega_{\max.b}$ – максимально допустимые скорости движения вперед и назад соответственно, $l_{A.\max}$ – максимальное значение вектора сигнала джойстика.

Важной особенностью данных режимов «вперед» и «назад» является то, что при формировании задающих сигналов для регуляторов приводов учитываются данные, поступающие с ультразвуковых дальномеров, расположенных на ИКВ, а также с инерциального датчика, определяющего угол наклона ИКВ относительно поверхности. Так при наличии препятствия на пути движения происходит звуковое оповеще-

ние и независимо от задаваемой пользователем скорости (значения l_A), рассчитывается закон торможения в следующем виде:

$$\omega^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, 0.028, \dot{\omega}_T, 0, t). \quad (3)$$

При проектировании чувствительность датчика настраивается таким образом, чтобы расстояния от коляски до препятствия хватило для торможения с заданным ускорением. Обратим внимание, что скорость сбрасывается до 0,028 рад/с (соответствует скорости движения коляски 0.03 км/ч). Полной остановки не происходит для возможности максимально близко подъехать к желаемому

объекту (тренажеру, кровати, и т.д.). В режиме прямолинейного движения «вперед» и «назад» скорости вращения левого и правого колеса равны.

Отметим, что согласно предлагаемому алгоритму, запуск приводов вертикализации невозможен и может быть запущен только при полной остановке ИКВ (фиксируется показаниями текущих частот вращения колес) и активации соответствующего режима на пульте управления устройства.

IV, (V). «Разворот влево» («Разворот вправо»). Данный режим позволяет коляски осуществить разворот на месте вокруг геометрического центра, расположенного в центре оси ведущих колес. Режим запускается наклоном рукоятки вдоль поперечной оси y , $f4$: $-5^\circ < \lambda < 5^\circ$ – разворот направо, $f5$: $175^\circ < \lambda < 185^\circ$ – разворот налево. Здесь $\pm 5^\circ$ – коридор нечувствительности, введенный для удобства пользователя. Так как разворот предполагает вращение колес с одинаковой угловой скоростью, но в разных направлениях то режим может запускаться только при полной остановке робота. При движении такая команда будет означать желание пользователя остановить ИКВ.

Таким образом желаемые конечные скорости колес, в зависимости от величины наклона рукоятки (l_A) рукоятки джойстика будет:

– для разворота направо: $\omega_{k.L} = k_\beta l_A$,
 $\omega_{k.R} = -k_\beta l_A$,

– для разворота налево: $\omega_{k.L} = -k_\beta l_A$,
 $\omega_{k.R} = k_\beta l_A$.

При этом, согласно указанной методике, система управления ИКВ формирует гладкие законы изменения вращения приводов.

$$\omega^*(t) = \Omega(t, t_k, \omega_T, \pm k_\beta l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), \quad (4)$$

где k_β – коэффициент чувствительности рукоятки джойстика вокруг оси y .

Значение коэффициента k_β может быть определено исходя из максимальной скорости коляски при развороте следующим образом: $k_\beta = \omega_{\max.r} / l_{A.\max}$, где $\omega_{\max.r}$ – максимально допустимые скорость при развороте.

II, (III). «Вперед влево» («Вперед вправо»). Данный режим позволяет менять направление движения без остановки. Таким образом, желаемая траектория движения будет представлять собой фрагмент дуги с определенным радиусом, зависящим от положения рукоятки. Данные режимы инициируются наклоном рукоятки одновременно вперед и в сторону: $f3$: $5^\circ \leq \lambda \leq 85^\circ$, – вперед вправо, $f4$: $95^\circ \leq \lambda \leq 175^\circ$ – вперед влево.

Как можно понять, данный режим с точки зрения наклона рукоятки является переходным между вперед и разворот на месте, поэтому рассмотрим расчет конечных желаемых значений угловых скоростей колес согласно схеме (рис. 5).

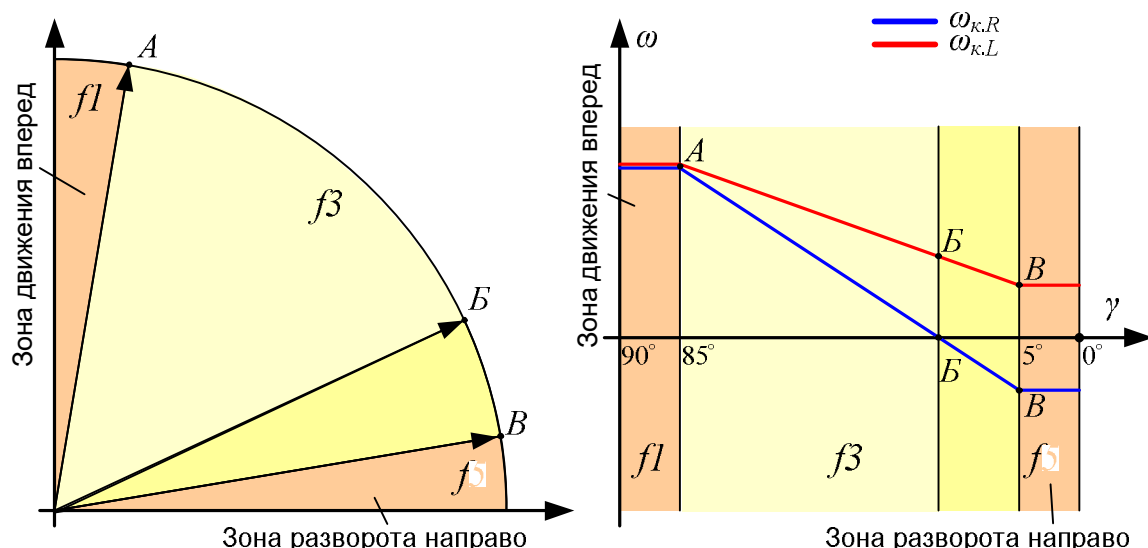


Рис. 5. Схема смены режимов в зависимости от положения рукоятки

Согласно схеме, показанной на рис. 5, отражающей наклон рукоятки вправо-вперед, в диапазоне от $\lambda=0^\circ..90^\circ$, здесь можно увидеть 4 отдельные зоны: зона движения вперед (условие $f1$), зона разворота направо (условие $f5$), зона движение вперед направо (условие $f3$), а также переходная зона. Особенность переходной зоны заключается в том, что скорости вращения колес ИКВ имеют разный знак, но при этом не равны между собой, что позволяет двигаться с радиусом кривизны меньшим, чем расстояние между колесами. Такое разнообразие режимов поворота-разворота дает коляске высокие маневровые характеристики, что необходимо при перемещении в ограниченном пространстве больничной палаты или жилой комнаты.

Рассмотрим формирование значения желаемых угловых скоростей колес при правом повороте: $\omega_{к.Л}=k_E l_A$, $\omega_{к.Р}=$

$k_I l_A$, здесь k_E , k_I – коэффициенты для внешнего и внутреннего колес соответственно, значения которых рассчитываются по крайним положениям в зависимости от угла λ следующим образом:

- для точки А: $k_E=k_I=k_A = \omega_{\max.f}/l_{A.\max}$,
- для точки В: $k_I=0$,
- для точки В: $k_E = \omega_{\max.r}/l_{A.\max}$, $k_I=-\omega_{\max.r}/l_{A.\max}$.

Таким образом система управления ИКВ формирует гладкие законы изменения угловой скорости вращения колес для вперед-направо:

$$\begin{cases} \omega_L^*(t)=\Omega(t, t_k, \omega_T, k_E l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), \\ \omega_R^*(t)=\Omega(t, t_k, \omega_T, k_I l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), \end{cases} \quad (5)$$

– для вперед налево:

$$\begin{cases} \omega_L^*(t)=\Omega(t, t_k, \omega_T, k_I l_A, \dot{\omega}_T, 0, t), \\ \omega_R^*(t)=\Omega(t, t_k, \omega_T, k_E l_A, \dot{\omega}_T, 0, t). \end{cases} \quad (6)$$

Линейные законы изменения коэффициентов угловых скоростей для внутреннего и внешнего колеса обеспечивают

ограничение скорости при повороте, препятствующего опрокидыванию коляски.

Отметим, что система управления ИКВ из-за соображения безопасности не подразумевает режима назад-вправо или назад-влево. Наклон рукоятки в соответствующие области при движении вперед будет приводить к остановке устройства. Наклон рукоятки на углы $\lambda = -5^\circ \dots -85^\circ$, $\lambda = 185^\circ \dots 265^\circ$, при нулевой скорости, будет приводить к движению назад, согласно режиму, описанному ранее.

VI, (VII). «Вертикализация» («Посадка»). Режим вертикализации пациента инициируется с отдельной клавишей на пульте управления (условие $f6$ ($f7$)). Режим может быть запущен только при полной остановке робота, любые движения джойстика при этом системой управления игнорируются. Движение в вертикальной плоскости описывается гладкими функциями для подъема:

$$v^* = \Omega(t_T, t_K, 0, v_{\max}, 0, 0, t), \quad (7)$$

для посадки:

$$v^* = \Omega(t_T, t_K, v_{\max}, 0, 0, 0, t), \quad (8)$$

где $v_{\max}$ – предельная скорость перемещения вертикализатора 0,012 м/с. Отметим, что в процессе подъема движение может быть прервано и запущен режим посадки. Возврат к режиму коляски может быть осуществлен только при нижнем положении кресла ИКВ.

Выводы

Обеспечение безопасности передвижения людей с ограниченными возможностями требует учета физиологических особенностей человеко-машинного взаимодействия при реализации пользовательских интерфейсов роботизированных ассистирующих устройств. В рамках работы предложена схема адаптивного алгоритма переключения режимов работы инвалидной коляски-вертикализатора, учитывающая возможные ошибки задания параметров движения, связанные с нарушением работы ОДА пациента: судороги, тремор, спастичность. Кроме того, нелинейные коэффициенты чувствительности рукоятки джойстика ИКВ позволяют обеспечивать бесшовную смену режимов, а использование полиномиальных функций в системе формирования задающих воздействий для регуляторов двигателей обеспечивает плавность переходных процессов и адаптацию к текущему состоянию ИКВ. Предлагаемый математический аппарат, описывающий функционирование адаптивного алгоритма, может быть реализован в виде программного обеспечения системы управления инвалидных кресел и прочих устройств, требующих создания человеко-машинного интерфейса между роботизированной системой и человеком с нарушением функций ОДА.

Список литературы

1. Крапивина Ю. Д., Киба Д. А. Система управления вертикализатором для инвалидов колясок // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Комсомальск-на -Амуре, 2017. С. 114-116.
2. Щербакова М. П., Мальчиков А. В. Разработка многоканальной САУ инвалидной коляски-вертикализатора // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике. Курск, 2021. С. 300-303.
3. Simpson R. C. Smart wheelchairs: A literature review // Journal of rehabilitation research and development. 2005. Т. 42. №. 4. С. 423.
4. Lankenau A., Rofer T. Smart Wheelchairs - State of the Art in an Emerging Market // KI. 2000. Vol. 14. №. 4. P. 37-39.
5. Вертикализация: обоснование ключевой роли в общей системе реабилитации / С. Г. Щербак, А. Е. Терешин, А. С. Голота, А. Б. Крассий // Медицинский алфавит. 2010. Т. 1. №. 4. С. 32-34.
6. Макарова М. Р., Ромашин О. В. Вертикализация как фактор ранней реабилитации больных с травматической болезнью спинного мозга // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2013. Т. 90. №. 4. С. 47-52.
7. Вадутов Р. Р., Быков Е. В., Коломиец О. И. Эффективность ранней вертикализации после оперативного лечения поясничного отдела позвоночника // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. 2018. Т. 13. №. 2. С. 232-238.
8. Barondess, J. A., Cullen, M., De Lateur, B. Musculoskeletal disorders and the workplace. Washington, DC: National Academy of Sciences, 2001.
9. Разработка вертикальной направляющей для процесса вертикализации ИКВ / А.В. Мальчиков, М.П. Щербакова, Л.В. Березина, А.С. Печурин, А.Ю. Белов // Молодежь и XXI век - 2020. Т. 4. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 171-174.
10. Щербакова М.П., Рукавицын А.Н. Гусева Ю.В., Развитие биомехатронных технологий для людей с ограниченными физическими возможностями. Школа юных инноваторов. Курск, 2018. 435 с.
11. Modeling of human-machine interaction in an industrial exoskeleton control system / S. Jatsun, A. Malchikov, O. Loktionova, A. Yatsun // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham, 2020. P. 116-125.
12. Hartman A., Nandikolla V. K. Human-machine interface for a smart wheelchair // Journal of Robotics. 2019.

13. Incorporating user inputs in motion planning for a smart wheelchair / S. P. Parikh, V. Grassi, V. Kumar, J. Okamoto // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004. IEEE, 2004. Vol.2. P. 2043-2048.

14. Marchal-Crespo L., Furumasu J., Reinkensmeyer D. J. A robotic wheelchair trainer: design overview and a feasibility study // Journal of neuroengineering and rehabilitation. 2010. Vol. 7. №. 1. P. 1-12.

15. Simulation of a walking robot-exoskeleton movement on a movable base / S. Jatsun, A. Malchikov, A. Yatsun, A. S. M. Leon // Journal of Artificial Intelligence and Technology. 2021. Vol. 1. №. 4. P. 207-213.

16. Бартенев В.В., Яцун С.Ф. Анализ методов управления движением мобильных колесных роботов по заданной траектории // Управляемые вибрационные технологии и машины: сборник научных трудов международной конференции. Курск, 2012. С. 144-152.

17. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калинин, Л. Н. Кравчук. М.: Наука, 2001. С. 26-91.

18. Tzafestas S. G. Mobile robot control and navigation: A global overview //Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2018. Vol. 91. № 1. P. 35-58.

19. Бартенев В. В., Яцун С. Ф., Аль-Еззи А. С. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. №. 4-1. С. 288-293.

Информация об авторах

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Щербакова Мария Петровна, инженер научно-исследовательской лаборатории кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: 5-storm-7@mail.ru

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-103-113>

Рекурсивный алгоритм закрашивания областей распознанных объектов

М. В. Бобырь¹ ✉, Н. И. Храпова¹, О. Г. Супрунова¹, А. А. Дородных¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: maxbobyry@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Разработка рекурсивного алгоритма закрашивания распознанных областей на бинаризованном изображении и выделение контуров цветовой метки с целью нахождения минимального времени подсчета количества закрашенных пикселей в распознанной метке.

Методы. Алгоритм закрашивания областей основывается на рекурсивном методе. Алгоритм начинает работу с центральной точки изображения и анализирует наличие незакрашенных пикселей в смежных ячейках. Рассматривается восемь направлений обхода пикселей относительно начальной точки с целью определения наименьшего времени закрашивания распознанной области. Обход осуществляется в следующих направлениях: восток-юг-запад-север; восток-север-запад-юг; юг-восток-север-запад; юг-запад-север-восток; запад-юг-восток-север; запад-север-восток-юг; север-восток-юг-запад; север-запад-юг-восток. Алгоритм содержит несколько этапов: проверка выхода из рекурсии при условии закрашивания всех областей, закрашивание исходной ячейки, закрашивание элементов по четырем направлениям от начальной точки, подсчет количества закрашенных элементов.

Результаты. Разработан рекурсивный алгоритм закрашивания распознанных областей на бинаризованном изображении, с возможностью выделения контуров распознанной метки. Определено направление оптимального обхода, который имеет наименьшее время по отношению к другим рассматриваемым направлениям. Тестирование осуществлялось для циклов с 10, 50 и 100 итерациями. По представленному алгоритму создана специализированная программная модель. Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для заливки распознанной метки» – 2023612631.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований показали, что для значения цикла в 10 итераций наилучшее время закрашивания области равно 12762 мс, для значения цикла в 50 итераций наилучшее время равно 76008 мс, для значения цикла в 100 итераций наилучшее время равно 160568 мс. Минимальное среднее время выполнения операции по закрашиванию составило 84357 мс, следовательно, наилучшей из восьми комбинаций прохода оказалось направление – север-восток-юг-запад.

Ключевые слова: рекурсивный алгоритм; закрашивание областей; распознавание метки; направления обхода; быстроедействие.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-21-00071 – «Разработка модели компьютерного зрения для интеллектуальной навигации робототехнических систем, основанной на построении трехмерных сцен по картам глубин».

© Бобырь М. В., Храпова Н. И., Супрунова О. Г., Дородных А. А., 2023

Для цитирования: Рекурсивный алгоритм закрашивания областей распознанных объектов / М. В. Бобырь, Н. И. Храпова, О. Г. Супрунова, А. А. Дородных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 103-113. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-103-113>.

Поступила в редакцию 26.01.2023

Подписана в печать 15.02.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Закрашивание – это процедура заливки необходимых областей на изображении [1]. Данная процедура используется при подсчете площади 3d объектов на картах глубин [2,3], построенных на основе нечеткой логики [4-6], в медицине, с целью выявления патологий на медицинских снимках, таких как рентгенография, флюорография, ультразвуковое исследование, магнитно-резонансная томография [7-9].

Существует несколько способов заливки областей. В работе [10] представлен алгоритм закрашивания невидимых областей, который используется в биометрических системах персональной идентификации по изображениям лиц. Для автоматической сегментации области лица предлагается метод минимального разреза графа с использованием особых точек для предварительной разметки [11-13]. В качестве таких точек используются глаза, нос и т.д. В работе [14] рассматривается алгоритм маркировки связанных областей для оценки качества семян пшеницы. Данный алгоритм позволяет присваивать уникальные метки для отдельных не пересекающихся связанных областей на изображении.

Также для выделения областей фигуры на изображении используются ал-

горитмы поиска в ширину и глубину [15-18]. Ограничением данных моделей является высокая чувствительность самого алгоритма к размеру изображения и количеству цветов, что может послужить причиной получения неоптимального решения, которое проявляется в том, что не все пиксели в распознанной области будут закрашены. В работе [19] для решения аналогичных задач, представлен алгоритм закрашивания областей фигуры на основе деревьев. Данный алгоритм аналогичен предыдущим методам поиска решений, отличием которого является использование дерева вместо графа, а выбор наилучшего способа заполнения изображения происходит с помощью алгоритма поиска в глубину [18]. В работе [20, 21] рассматривается алгоритм закрашивания областей на основе эвристик. Данный алгоритм основывается на применении простых правил для поиска оптимального решения задачи. Алгоритм эвристик использует две функции для оценки пикселей: первая функция оценивает пиксель по его соседям, а вторая функция оценивает пиксель по правилам закрашивания. На основе этих функций возможно оценить каждый пиксель и выбрать наилучший из них. Ограничением данной работы является затрата вычислительного времени, необходимого для проверки усло-

вий двух эвристик. В связи с этим возникает актуальная задача, заключающаяся в разработке новых моделей и методов, позволяющих закрашивать выделенные области на изображении и подсчитывать количество пикселей в них.

Материалы и методы

Предложенный нами алгоритм закрашивания областей основывается на

рекурсивном методе. Данный алгоритм содержит 3 входных переменных: начальный элемент, базовый цвет и цвет заливки. Рассматривается восемь комбинаций прохода (восток-юг-запад-север; восток-север-запад-юг; юг-восток-север-запад; юг-запад-север-восток; запад-юг-восток-север; запад-север-восток-юг; север-восток-юг-запад; север-запад-юг-восток).

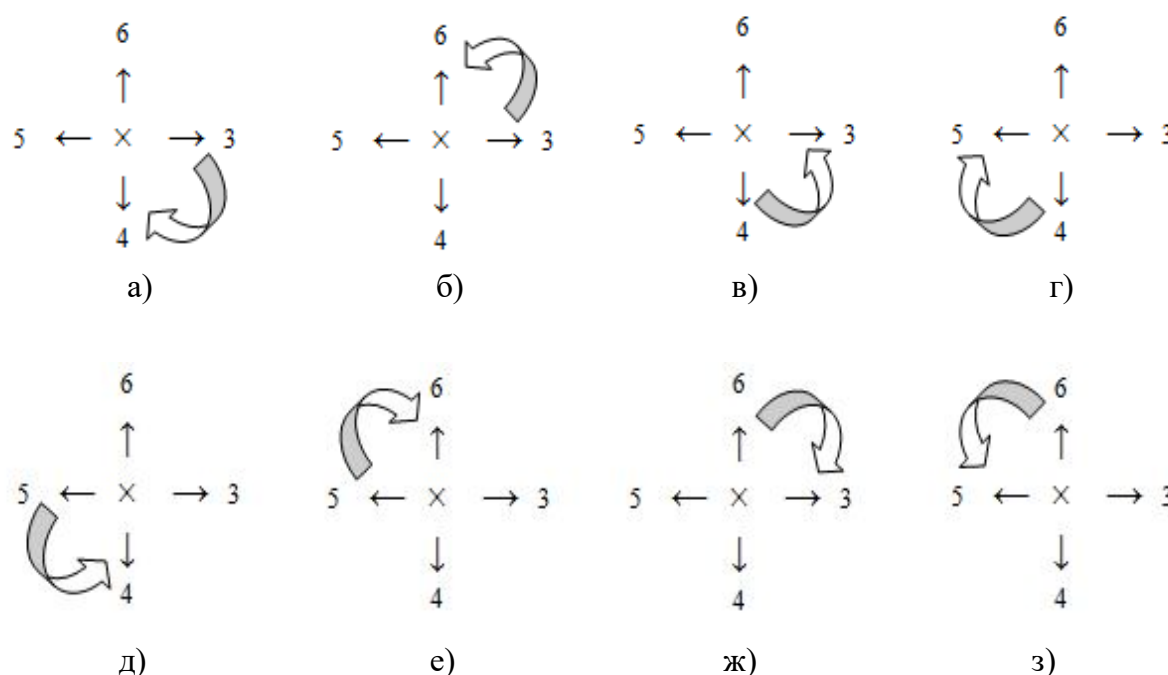


Рис. 1. Комбинации направлений обхода: **а** – восток-юг-запад-север; **б** – восток-север-запад-юг; **в** – юг-восток-север-запад; **г** – юг-запад-север-восток; **д** – запад-юг-восток-север; **е** – запад-север-восток-юг; **ж** – север-восток-юг-запад; **з** – север-запад-юг-восток

Алгоритм содержит следующие шаги:

- 1) проверка условия выхода из рекурсии;
- 2) поиск всех элементов массива;
- 3) определения элементов для закрашивания;
- 4) заливка выбранной области.

Учитывая условия для закрашивания, поочередно применяется рекур-

сивный вызов функции для смежных точек. Если точка не является граничной, она закрашивается.

Разработанный рекурсивный алгоритм закрашивания областей (рис.1) используется для подсчета количества пикселей и вычисления времени их закрашивания в распознанной метки.

По представленному алгоритму создана специализированная программная модель [22].

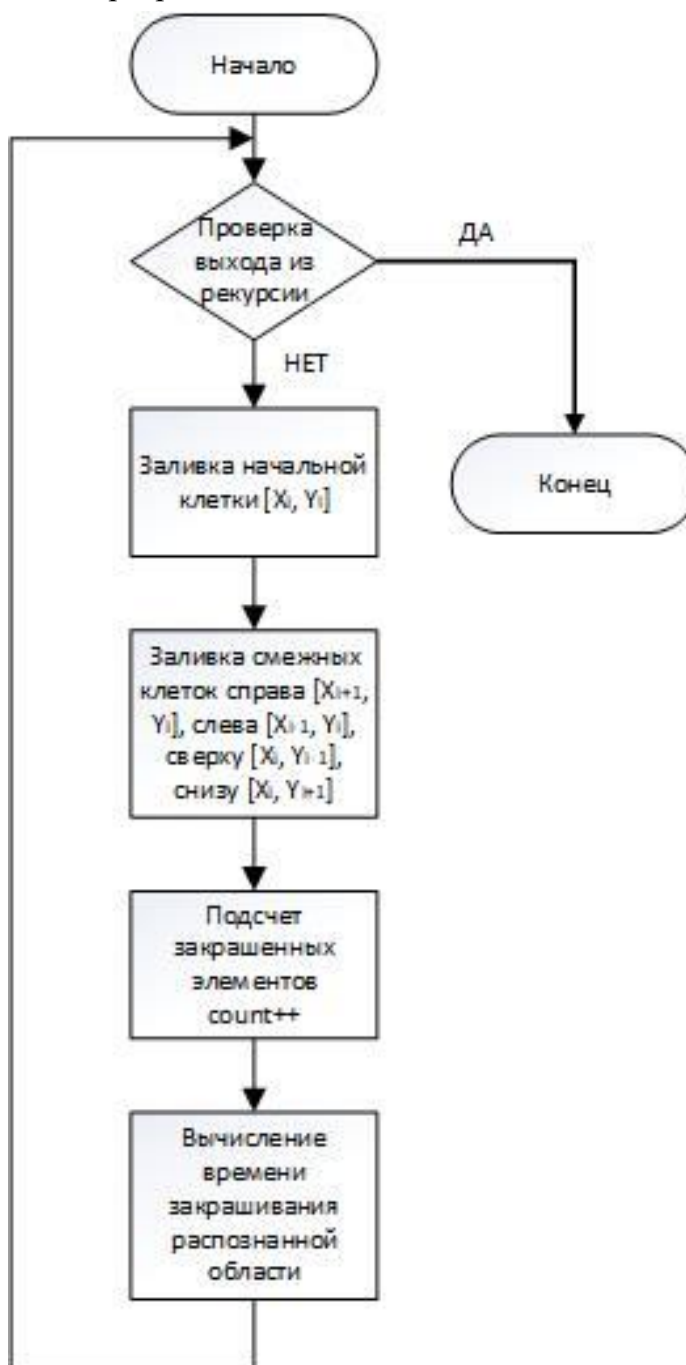


Рис. 2. Алгоритм закрашивания областей на основе рекурсии

Программа имеет несколько входных переменных: размер окна, массив для закрашивания, направление закрашивания, количество циклов закрашивания, координаты начальной точки, номер закрашиваемого элемента в мас-

сиве и граничные пиксели, которые не нужно закрашивать. Выходными переменными являются время закрашивания окна и количество элементов в закрашиваемой области.

Ниже представлен псевдокод для областей распознанных объектов.
рекурсивного алгоритма закрашивания

```

Procedure Filling
Input:  int maxx, maxy – размер окна;
int N – направление закрашивания;
int n – количество циклов закрашивания;
int x, y – координаты начальной точки;
string symbols = { " ", "#", "*", ">", "v", "<", "^" } – элементы, выводимые в консоль
программы;
int z – номер закрашиваемого элемента в массиве symbols;
int map[maxx, maxy] – массив для закрашивания;
Random rnd – случайное значение граничного пикселя.
Output: time – время закрашивания окна [maxx, maxy]
count = 0 – счетчик количества элементов в закрашиваемой области;
Begin
Init(); // Инициализация процедуры
x = maxx/2; y = maxy/2; // Установка позиции курсора в центр окна
Show(x, y, z); // Закрашивание центральной ячейки окна
Fill(x,y); // Вызов функции закрашки области
End
Function Init()
End
for i = 0; i < n; i++
Show(rnd.Next(0, maxx), rnd.Next(0, maxy), 1); // Заполнения массива окна
элементом # в случайных ячейках
Begin
Function Show(int x, int y, int z)
Begin
map[x, y] = z; // заполнение окна [maxx, maxy] элементами массива symbols
End
Function Fill(int x, int y)
End
//Thread.Sleep(1); // Создание анимации
if (map[x, y] > 0) // Проверка условия выхода из рекурсии
return; // если окно закрашено полностью – выход

Show(x, y, 3); Fill(x + 1, y); // Установка направления
и закрашивание правой ячейки ★
Show(x, y, 4); Fill(x, y + 1); // Установка направления
и закрашивание нижней ячейки ★
Show(x, y, 5); Fill(x - 1, y); // Установка направления
и закрашивание левой ячейки ★
Show(x, y, 6); Fill(x, y - 1); // Установка направления
и закрашивание верхней ячейки ★
Show(x, y, 2); // Закрашивание ячейки элементом «*»
count++; // Подсчет закрашиваемых элементов
Begin

```

Представленный программный код отображает комбинацию обхода пикселей, изображенную на рис. 1а (восток-юг-запад-север). Знаком «★» отмечены строки кода, которые отвечают за направления обхода относительно начальной точки. Чтобы изменить направ-

ления в программном коде необходимо поменять местами данные строки. Например, чтобы установить направление, представленное на рис. 1б (восток-север-запад-юг), программный код должен выглядеть следующим образом:

```

Begin
Function Show(int x, int y, int z)
Begin
    map[x, y] = z;    // заполнение окна [maxx, maxy] элементами массива symbols
End

Function Fill(int x, int y)
End
    //Thread.Sleep(1);           // Создание анимации
    if (map[x, y] > 0)           // Проверка условия Выхода из рекурсии
        return;                 // если окно закрашено полностью – Выход

    Show(x, y, 3); Fill(x + 1, y); // Установка направления и закрашивание правой
ячейки
    Show(x, y, 6); Fill(x, y - 1); // Установка направления и закрашивание Верхней
ячейки
    Show(x, y, 5); Fill(x - 1, y); // Установка направления и закрашивание левой ячейки
    Show(x, y, 4); Fill(x, y + 1); // Установка направления и закрашива-
ние нижней ячейки

    Show(x, y, 2);           // Закрашивание ячейки элементом «*»
    count++;                 // Подсчет закрашиваемых элементов
Begin

```

Если раскомментировать строку `//Thread.Sleep(1);`, то можно наблюдать, как программа будет проходить каждую ячейку, заполняя массив окна элементами, т.е. активируется анимационный режим.

Результаты и их обсуждение

Для экспериментальных исследований использовалось специальное программное обеспечение, разработанное

авторским коллективом [22]. Программное обеспечение было разработано в среде Visual Studio 2019. Для тестирования использовался ПК со следующими характеристиками: Процессор: AMD Ryzen 5 2400G with Radeon Vega Graphics 3,60 GHz. ОЗУ: 8,00 GB.

Проведены экспериментальные исследования, в которых менялось направление закрашивания областей при значениях циклов в 10, 50 и 100 итераций.

В табл. 1 представлено полученное время областей распознанных объектов для выполнения операции по закрашиванию каждого направления обхода (см. рис.1).

Таблица 1. Время выполнения операции по закрашиванию областей распознанных объектов

Table 1. The operation execution time for filling areas of recognized objects

Направления обхода	Циклы	Время, мс	Среднее значение, мс
3 4 5 6	10	12937	84500
	50	79997	
	100	160568	
3 6 5 4	10	12762	84789
	50	79846	
	100	161760	
4 3 6 5	10	13843	85551
	50	79723	
	100	163089	
4 5 6 3	10	13417	85223
	50	80250	
	100	162003	
5 4 3 6	10	13027	85038
	50	80131	
	100	161957	
5 6 3 4	10	13561	85397
	50	80094	
	100	162537	
6 3 4 5	10	13059	84357
	50	76008	
	100	164004	
6 5 4 3	10	13185	86042
	50	82014	
	100	162927	

При сравнении полученных значений по циклам были получены следующие результаты (рис. 3):

– для значения цикла в 10 итераций наилучшее время равно 12762 мс было получено для направления восток-север-запад-юг;

– для значения цикла в 50 итераций наилучшее время равно 76008 мс было получено для направления север-восток-юг-запад;

– для значения цикла в 100 итераций наилучшее время равно 160568 мс

было получено для направления восток-юг-запад-север.

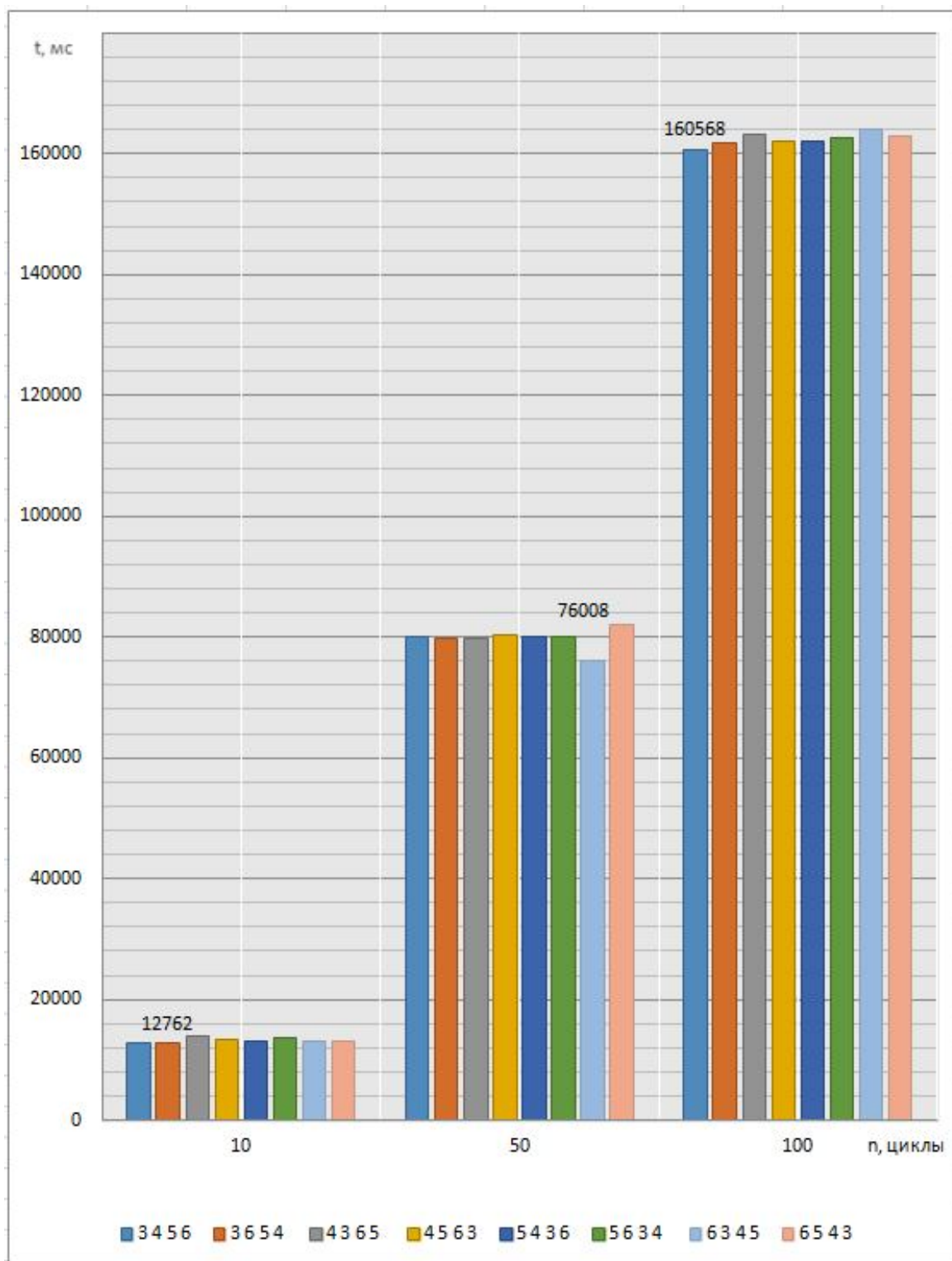


Рис. 3. Результаты экспериментальных данных

Наилучшие результаты выделены в табл. 1 полужирным начертанием.

Расчет среднего времени выполнения операции по закрашиванию для каждого направления показал следую-

щее – наилучшим направлением закрашивания областей оказалось 6-3-4-5 – север-восток-юг-запад (см. табл.1), так как при этой комбинации получено минимальное среднее время выполнения операции по закрашиванию, которое составило 84357 мс.

Выводы

В представленной работе описан рекурсивный алгоритм закрашивания рас-

познанных областей на бинаризованном изображении, с возможностью выделения контуров распознанной метки. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых было определено направление оптимального обхода, который имеет наименьшее время закрашивания области и подсчета количества пикселей в распознанной метке.

Список литературы

1. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Якушев А. С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // Информатика и автоматизация. 2021. № 20(2). С. 407-434.
2. Аврашков П. П., Коськин Н. А., Константинов И. С. Оценка эффективности различных моделей конвертации изображений в стереоформат с помощью карт глубины // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 12. С. 165-168.
3. Гайворонский В. А. Подход к созданию объемного панорамного изображения на основе пассивных методов определения карт глубины // Информационные системы и технологии. 2022. № 1(129). С. 24-29.
4. Бобырь М. В., Храпова Н. И., Ламонов М. А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 162-176. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>
5. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. 2020. Vol. 88. P. 106030. DOI 10.1016/j.asoc.2019.106030.
6. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378.
7. Обнаружение опухоли мозга на основе МРТ с применением метода нечеткой кластеризации с-средних / А. Г. Зотин, Ю. А. Хамад, С. В. Кириллова [и др.] // Медицина и высокие технологии. 2018. № 1. С. 20-28.
8. Смольникова У. А., Ушков А. Д. Опыт оценки цифровых рентгенограмм с применением системы автоматического распознавания изменений в легких // Лучевая диагностика и терапия. 2020. № S1. С. 84.
9. Улучшение сегментации патологий легких и плеврального выпота на КТ-снимках пациентов с Covid-19 / Д. С. Лащенкова, А. М. Громов, А. С. Конушин, А. М. Мещерякова // Программирование. 2021. № 4. С. 56-62.

10. Алгоритмы предобработки и постобработки данных для биометрических систем распознавания лиц / В. С. Горбацевич, Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, С. А. Хайин // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 6(120). С. 9-14.
11. Мельников Б. Ф., Чурикова Н. П. Алгоритмы сравнительного исследования двух инвариантов графа // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т.15, №1. С. 45-51.
12. Хачумов М. В., Талалаев А. А., Хачумов В. М. Об одном эвристическом критерии в задаче определения изоморфизма графов на основе инвариантов // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 2. С. 159-163.
13. Галкин В. А., Арьков К. А. Автоматизированная система визуализации алгоритма Дейкстры на графах // Естественные и технические науки. 2019. № 6(132). С. 190-192.
14. Ковалев А. В., Бакуменко А. Н. Алгоритм маркировки связанных областей при потоковой обработке изображения // Инженерный вестник Дона. 2022. № 4(88). С. 191-201. EDN NTTPYR.
15. Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Крюков А. Г. Исследование свойств алгоритма поиска в ширину для нахождения маршрута передвижения роботов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 39-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56>.
16. Метод распределения нагрузки в GPU-реализации алгоритма поиска в ширину на графе / М. А. Чернокутов, Д. Г. Ермаков, М. Л. Гольдштейн, Д. А. Усталов // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 2. С. 229-232. EDN SAYCFZ.
17. Зуенко А. А. Интеграция методов поиска в ширину и логического вывода для удовлетворения табличных ограничений // Онтология проектирования. 2021. Т. 11, № 4(42). С. 521-532. DOI 10.18287/2223-9537-2021-11-4-521-532.
18. Компьютерная реализация поиска в глубину / Е. А. Пронина, А. А. Лебединская, П. Г. Шурхаленко // Мировая наука. 2018. № 11(20). С. 234-237.
19. Будникова И. К., Бабкин Т. А. Интеллектуальный анализ данных на основе инструментария алгоритма C&RT (Общие деревья) // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2021. № 1(23). С. 112-115.
20. Мельников Б. Ф., Дудников В. А. О задаче псевдооптимального размещения графа на плоскости и эвристиках для её решения // Информатизация и связь. 2018. № 1. С. 63-70.
21. Alzakki H. M., Tsvetkov V. Yu. Selection texture regions on the image based on classification assessment density of contour elements // Big Data and Advanced Analytics. 2017. No. 3. P. 113-118.
22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612631 Российская Федерация. Программа для заливки распознанной метки: № 2023610839: заявл. 23.01.2023; опубл. 06.02.2023 / М. В. Бобырь, Н. И. Храпова,

О. Г. Супрунова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет".

Информация об авторах

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Храпова Наталия Игоревна, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7947-1427>

Супрунова Ольга Геннадьевна, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Dlya.dela2010@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8371-6543>

Дородных Александр Алексеевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alex.dorodnych@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0292-3127>

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-114-123>

Автотестирование встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы

А. И. Мартышкин ¹ ✉, И. А. Кирюткин ², Е. А. Мереняшева ²

¹ Пензенский государственный технологический университет
проезд Байдукова/ул.Гагарина, д. 1а/11, г. Пенза 440039, Российская Федерация

² Пензенский государственный университет
ул. Красная, д. 40, г. Пенза 440026, Российская Федерация

✉ e-mail: alexey314@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Основная идея заключается в построении математической модели тестирования, которая объединяет различные аспекты встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы и ее взаимодействий. Эта модель обеспечивает эффективное представление тестовых сценариев и позволяет анализировать динамику реконфигурируемой вычислительной системы во время тестирования. В статье также обсуждаются методы формирования тестовых последовательностей, исходя из свойств конечного автомата.

Методы. Авторы предлагают представить автотест в виде конечного автомата Мили, где состояния служат для хранения информации о текущем состоянии встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы. Входным сигналом является взаимодействие с системой, а выходным сигналом – реакция системы на входной сигнал. Такой подход позволяет формализовать процесс тестирования и упростить анализ возможных проблем.

Результаты. В данной статье рассматривается применение теории автоматов в контексте автоматизированного тестирования встраиваемых реконфигурируемых вычислительных систем. Теория автоматов предоставляет эффективные методы и инструменты для анализа и моделирования дискретных динамических систем, что делает ее подходящей для решения задач автоматизированного тестирования.

Заключение. Результаты исследования показывают, что использование теории автоматов может существенно улучшить качество и эффективность автоматизированного тестирования встраиваемых реконфигурируемых вычислительных систем. Этот подход обеспечивает более глубокий анализ системы и позволяет обнаружить и предотвратить потенциальные проблемы, которые могут возникнуть в процессе ее работы.

Ключевые слова: автомат Мили; временные автоматы; конечные автоматы; теория автоматов; автоматизированное тестирование; автотест; встраиваемая реконфигурируемая вычислительная система.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-00110, <https://rscf.ru/project/21-71-00110/>.

Для цитирования: Мартышкин А. И., Кирюткин И. А., Мереняшева Е. А. Автотестирование встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 114-123. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-114-123>.

Поступила в редакцию 17.02.2023

Подписана в печать 02.03.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Автоматизированное тестирование встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы (РВС) может значительно упростить ее разработку и отладку, чем в случае, если бы тестирование производилось вручную. В качестве примера представим тестирование приложения мобильного телефона. Основные способы, средства и методы тестирования, представленные в данной статье, подойдут и для тестирования многоядерной РВС [1, 2, 3, 4]. С использованием автоматизированного тестирования программа выполняет проверку результатов своей работы при помощи специальных инструментов, что способствует существенному сокращению времени, затрачиваемого на проведение тестирования, и упрощает этот процесс [5, 6, 7]. В качестве примера протестируем

мобильное приложение, которое складывает 2 числа.

Материалы и методы

Автотест можно описать как абстрактный автомат (АА), который представляет собой математическую модель дискретного устройства. АА характеризуется алфавитом состояний, в нашем примере это состояния РВС, входным алфавитом это действия над РВС, функциями переходов и выходов и начальным состоянием [8, 9, 10].

В нашем примере стартовое состояние будет состояние «S1».

Состояние «S1» представляет страницу «меню», «S2» – страница «калькулятор», «S3» – «инструкция».

Каждое состояние автомата имеет переходы и петли: переходы описывают переход с одной страницы на другую, а петли, тестовые действия на странице [9, 10] (рис.1).

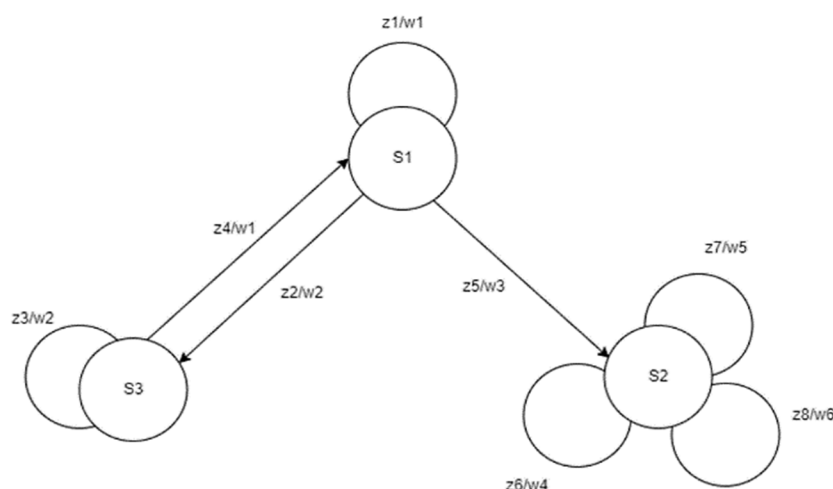


Рис. 1. Граф автотеста

Например, переход из состояния «S1» с сигналом «z2» ведёт в состояние «S3», что соответствует переходу к странице «инструкция», петля с входным сигналом «z1» соответствует про-

верки элементов на этой странице [1, 7, 11, 12].

В соответствии с графом была построена таблица переходов автомата (табл. 1).

Таблица 1. Таблица переходов

SM\zF	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8
S1	w1	w2			w3			
S2						w4	w6	w5
S3			w2	w1				

СКУ

$$S_1(t+1) = z_1 S_1 \vee z_4 S_3;$$

$$S_2(t+1) = z_5 S_2 \vee z_6 S_2 \vee z_7 S_2 \vee z_8 S_2;$$

$$S_3(t+1) = z_3 S_3 \vee z_2 S_1.$$

СВФ:

$$w_1(t) = z_1 S_1 \vee z_4 S_3; w_2(t) = z_3 S_3 \vee z_2 S_1;$$

$$w_3(t) = z_5 S_1; w_4(t) = z_6 S_2;$$

$$w_5(t) = z_8 S_2;$$

$$w_6(t) = z_7 S_2 \quad ; [3, 8, 9, 10, 13].$$

Сравнительный анализ сетей Петри и автоматов для автоматического тестирования вычислительных систем позволяет выявить ключевые различия между этими двумя подходами.

Сети Петри представляют собой графическую модель, состоящую из вершин, переходов и связей между ними. Они предоставляют наглядное представление параллелизма и синхронизации процессов. В то время как абстрактные автоматы представляют собой модель состояний и переходов между ними. В случае автоматов, структура мо-

дели представляет собой граф, вершины которого обозначают состояния, а ребра – переходы между состояниями. Сравнительная характеристика представлена в табл. 2.

Абстрактные автоматы представляют собой простой и понятный подход для моделирования и автоматического тестирования вычислительных систем. Они позволяют легко описывать последовательность действий пользователя и предсказуемо анализировать возможные состояния системы. Хотя Сети Петри обладают высокой выразительностью и могут быть полезны в некоторых случаях, они могут быть избыточными и сложными для анализа при тестировании вычислительных систем. Вместо этого, они лучше подходят для моделирования и тестирования сложных многопоточных и параллельных систем с множеством взаимодействующих компонентов.

Таблица 2. Сравнение автоматов и сетей Петри

Функционал	Сети Петри	Автоматы
Моделирование	Основным преимуществом сетей Петри является их способность представлять параллелизм, что может быть полезно для моделирования и анализа многопоточных приложений в автотестировании	Автоматы, будучи дискретными моделями, имеют ограниченные возможности для представления параллелизма, но хорошо подходят для реализаций последовательных действий
Визуализация	Сети Петри могут показать сложные взаимодействия и зависимости между состояниями системы, что может быть полезно при тестировании сложных многопоточных систем	Автоматы также предлагают визуальное представление, но оно может быть менее интуитивным и наглядным для представления параллелизма. Для описания последовательных шагов теста автоматы более подходят автотестированию
Анализ	Сети Петри позволяют проводить формальный анализ и верификацию, что может быть полезно для выявления ошибок и проблем в автотестировании. Однако анализ сетей Петри может быть сложным	Автоматы также позволяют проводить формальный анализ, но в отличие от сетей Петри, анализ автоматов может быть проще и менее затратным в некоторых случаях. Что удобнее использовать в автотестировании
Применимость к автотестированию	Сети Петри хорошо подходят для автотестирования систем с параллельными процессами, а также для анализа сложных зависимостей между состояниями. Однако из-за их сложности, они могут потребовать больше времени на разработку и анализ	Автоматы хорошо подходят для автотестирования простых и детерминированных систем. Их анализ может быть проще и быстрее, чем у сетей Петри. Однако для представления параллелизма они могут быть недостаточно подходящими

Для реализации автотестов используются следующие технологии:

Java – язык программирования.

Maven – фреймворк для автоматизации сборки проектов.

TestNG – фреймворк для создания отчетов тестирования.

Appium – среда автоматизации тестирования приложений на различных платформах, таких как iOS, Android и Windows.

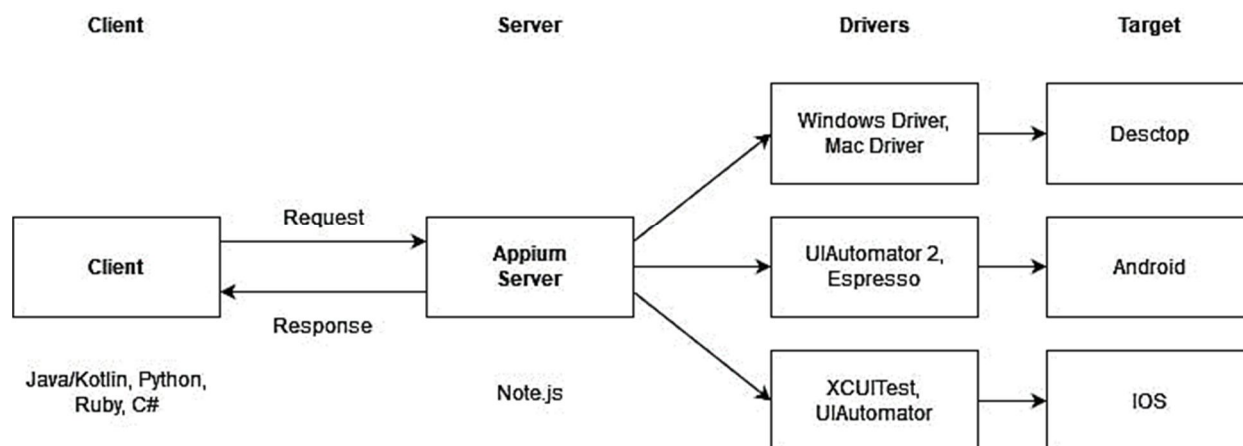


Рис. 2. Принцип работы Appium

Appium – это HTTP-сервер, который работает по следующему принципу (рис. 2):

- Сервер получает запрос на подключение от клиента.
- Сервер прослушивает команды.
- Клиент делает запрос к серверу.
- Сервер взаимодействует с различными драйверами платформ.
- Драйверы взаимодействуют с нативными приложениями, и выполняется необходимое действие в приложении.
- Сервер возвращает HTTP-ответ.
- Каждое действие в Appium происходит в контексте сеанса.
- Сеанс начинается с объекта `Desired capabilities`, чтобы указать точный тип соединения, которое мы хотим, и какое поведение нас больше всего интересует [14].

Результаты и их обсуждение

Приложение, написанное на языке Dart во фреймворке flutter (рис. 4), представляет простой калькулятор для сложения двух чисел.

Для взаимодействия с этим приложением будем использовать flutter driver. Драйвер должен различать элементы приложения, поэтому в каждом элементе приложения пропишем «ключ» – некий идентификатор элемента [15, 16].

```

TextField(
  key: Key('NumberOne'),
  keyboardType: TextInputType.number,
)
  
```

В приведенном примере текстовому полю присвоен ключ `NumberOne`, какое именно использовать название ключа не важно, главное, чтобы в приложении они не повторялись.

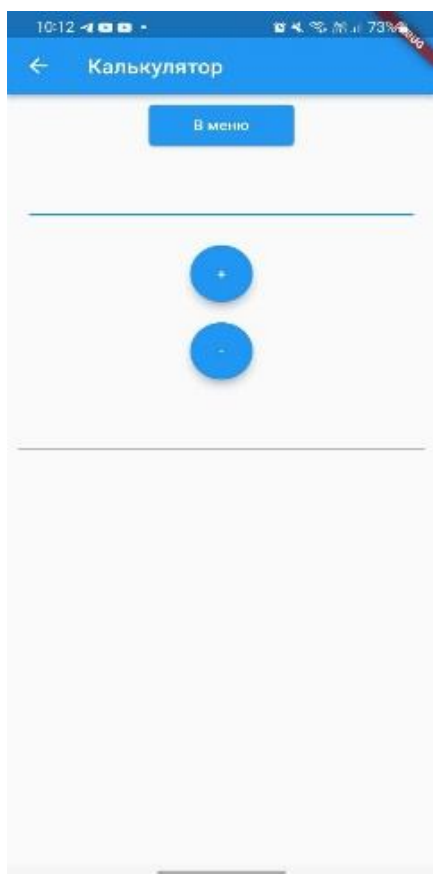


Рис. 3. Страница "Калькулятор" приложения

Сам автотест представляет собой проект Maven, на языке Java. В файле `pom.xml` проекта прописываем зависимости для `appium` и `testNg`, `testNg` необходим для формирования отчета по пройденным тестам [2].

В проекте взаимодействие с приложением происходит через драйвер, `AndroidDriver<MobileElement> driver`. Для инициализации драйвера необходимо задать ему свойства, среди них имя устройства, версия операционной системы (ОС) устройства, имя пакета тестируемого приложения и другие. Так же указываем путь к локальному хосту, с которого запущен аппиум сервер.

```
flutterCapabilities.setCapability ("ap-
pium:platformVersion", "11");
```

```
flutterCapabilities.setCapability ("ap-
pium:reportDirectory", "html");
driver = new AndroidDriver
<MobileElement> (new URL
("http://127.0.0.1:4723/wd/hub"),
flutterCapabilities);
```

После того, как мы инициализировали драйвер, можем перейти непосредственно к автотесту [2, 14, 17, 18]. Чтобы обращаться к элементам, используем скрипт `flutterWait` и указываем параметры, по которым мы можем работать с элементами, например, для того чтобы найти элемент в приложении, используем `driver.executeScript("flutter: waitFor", find.byValueKey(valueKey), timeout)`, где метод `find.byValueKey(valueKey)` указывает, что элемент ищем по ключу `valueKey`, например, можем передать ключ `NumberOne`. Упомянутый выше функционал тестов не ограничивается только поиском элементов по ключам. Так же можем использовать поиск по тексту, пролистывание, нажатие на элемент, ввод текста в текстовые поля. Функционал покрывает все действия, которые человек может повторить вручную [6].

Подход в организации проекта будет таким (рис. 6). Методы для нахождения элементов будут находиться в суперклассе, от которого будут наследоваться классы, которые будут соответствовать страницам нашего приложения для теста РВС. Далее в классе теста будут использоваться методы объектов наших страниц. Каждый метод будет представлять собой действие, по функционалу аналогичное действию человека [19, 20, 21, 22].

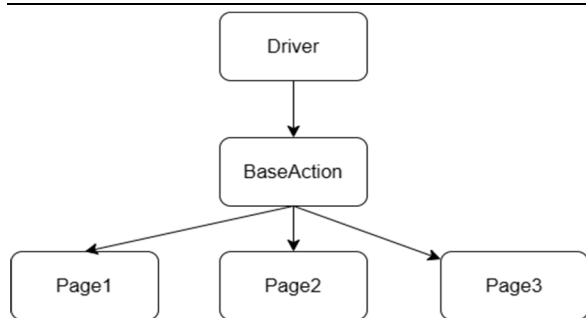


Рис. 4. Иерархия классов теста

Итоговый тест будет выглядеть так:

```

public class TestFlutterApplication
extends BaseTest {
    public void testApp()
    {
        MenuPage menuPage= new MenuPage();
        ManualPage manualPage=new ManualPage();
        CalculatorPage calculatorPage=
new CalculatorPage();
        menuPage.checkElements()
            .goToManual();
        manualPage.checkElements()
            .goToMenu();
        menuPage.goToCalculator()
        calculatorPage.setFirstNumber()
  
```

```

        .setSecondNumber()
        .getSum();
    }
}
  
```

Таким образом, тест [5] представляет собой последовательность действий, понятных каждому человеку, а полный код тестов спрятан в суперклассах страниц.

Количественная оценка предложенного метода:

1. Экспериментальным путем получено, что время работы автотеста значительно быстрее ручного тестирования, все время уходит только на составление автотеста. Для приведенного в исследовании теста время выполнения ручного тестирования инженером достигает 30 секунд, автотеста – 2 секунды. На рис. 5 приведено сравнение производительности выполнения тестирования при разных подходах.

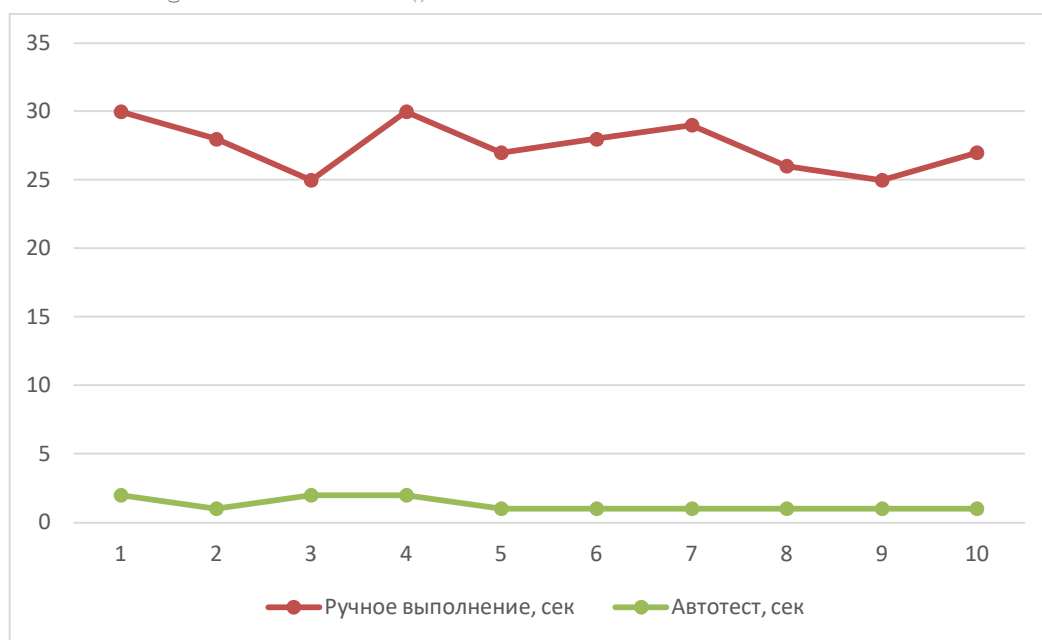


Рис. 5. Сравнение производительности подходов тестирования

Понятность и наглядность автотестов позволяет легко воспроизводить тесты, созданные с использованием предложенного подхода по сравнению с другими методами. Более понятные и наглядные тесты упрощают их использование.

Гибкость тестирования упрощает внесение изменений в программное обеспечение и тесты, что снижает время на разработку автотестов под новые изменения.

Эти метрики показывают эффективность и преимущества данного метода автоматического тестирования на основе абстрактных автоматов.

Выводы

В данной статье мы представили автотест мобильного приложения в виде конечного автомата, который в свою очередь визуально представляет работу автотеста, что служит примером теста РВС.

Список литературы

1. Волчихин В.И., Вашкевич Н.П., Бикташев Р.А. Модели событийных недетерминированных автоматов представления алгоритмов управления взаимодействующими процессами в многопроцессорных вычислительных системах на основе использования механизма монитора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 2 (26). С. 5-14.
2. Бурдонов И.Б., Косачев А.С., Кулямин В.В. Использование конечных автоматов для тестирования программ // Программирование. 2000. Т. 26. №. 2 С. 61–73.
3. Formalized Description of Cyber-Physical Systems Models Using Temporary Non-Deterministic Automata / D.A. Trokoz, K.A. Zabrodina, V.S. Safronova, M.D. Veselova, M.P. Sinev, M.A. Mitrohin, E.I. Gurin, T.Y. Pashchenko // Journal of Physics: Conference Series. II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021). Krasnoyarsk, 2021. Vol. 1889. №. 2. 22068 p. IOP Publishing.
4. Гузик В.Ф., Каляев И.А., Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы. Таганрог.: Южный федеральный университет, 2016. 472 с.
5. Котенко А.П., Букаренко М.Б. Моделирование конечными автоматами систем массового обслуживания с различными каналами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4-2. С. 318-321.
6. Дубинин В.Н., Дроздов Д.Н. Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов (Ч. 1. Формальная модель) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016. № 1 (37). С. 28-39.
7. Симанков В.С., Толкачев Д.М. Моделирование сложных объектов в режиме реального времени на основе сетей Петри // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2012. № 4 (110). С. 202-209.

8. Методика преобразования темпорального конечного автомата в СП-модель / Д.А. Трокоз, Р.А. Бикташев, М.П. Синев, М.С. Федяшов, Н.Н. Шеянов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2020. Т. 9. № 3 (51). С. 45-49.
9. Соловьев В. В. Минимизация конечных автоматов Мили путем использования значений выходных переменных для кодирования внутренних состояний // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 1. С. 98-106.
10. Твардовский А. С., Евтушенко Н. В., Громов М. Л. Минимизация автоматов с таймаутами и временными ограничениями // Труды Института системного программирования РАН. 2017. Т. 29. №. 4. С. 139-154.
11. Берёза А. Н., Ляшов М. В. Эволюционный синтез конечных автоматов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №7. С 210–217.
12. Темпоральный анализ киберфизических систем с использованием теории автоматов / Д.А. Трокоз, Н.В. Исхаков, М.П. Синев, М.А. Митрохин, Н.О. Сивишкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2019. Т. 8. № 3 (47). С. 113-117.
13. Захаров Н.Г., Рогов В.Н. Синтез цифровых автоматов. Ульяновск, 2003. 135 с.
14. Сетевая модель языка "Т" на основе цветных безопасных иерархических рекурсивных сетей Петри / Д.В. Пашенко, Д.А. Трокоз, Г.В. Мартяшин, К.С. Максимова, Е.А. Бальзанникова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 3 (35). С. 25-35.
15. Tashildar A. et al. Application development using flutter // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2020. Vol. 2. № 8. P. 1262-1266.
16. Денисов А. А. Современные средства разработки мобильных приложений // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2019. № 2. С. 64-67.
17. Dai W., Dubinin V., Vyatkin V. Automatically Generated Layered Ontological Models for Semantic Analysis of Component Based Control Systems //IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems (IEEE Publishing). 2013. Vol. 9. № 4. P. 2124–2136.
18. Generalized structural models of complex distributed objects / M. Yu. Mikheev, T.V. Zhashkova, A. B. Shcherban, A. K. Grishko, I. M. Rybakov // Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016. Yerevan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. p. 7807742. DOI 10.1109/EWDTS.2016.7807742. EDN YVGCCT.
19. Рыбалко М. А., Иванова Е. А. Тестирование программного обеспечения, методы тестирования // Информационное общество: современное состояние и перспективы развития. Краснодар, 2017. С. 320-322.
20. Караваева О. В., Борисова К. В. Разработка системы автоматизированного тестирования // Вестник науки и образования. 2018. № 13 (49). С. 45-48.
21. Надыкто М. О., Белим С. В. Разработка автотестов для обеспечения качества программного обеспечения // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Омск, 2022. С. 588-594.

22. Лагарникова А. В. Алгоритм построения автотестов на основе часто используемых тестовых сценариев в мобильном приложении // Вестник науки. 2019. Т. 1. № 2 (11). С. 155-158.

Информация об авторах

Мартышкин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Программирование», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: alexey314@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3358-4394>

Кирюткин Илья Алексеевич, студент кафедры «Вычислительная техника», Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: kiryutkin.02@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-4355-0796>

Мереняшева Елизавета Андреевна, студент кафедры «Вычислительная техника», Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: Lizamerenyasheva@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3744-4521>

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-124-140>

Двухмодульный нейросетевой способ обработки информации в газоаналитических системах

О.Г. Бондарь¹, Е.О. Брежнева¹ ✉, К.А. Ботииков¹, Н.В. Поляков¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Резюме

Цель работы. Снижение дополнительных погрешностей измерения концентраций газов в газоаналитических системах (ГС), вызванных чувствительностью полупроводниковых сенсоров к нецелевым компонентам газовых смесей, температуре и влажности окружающей среды. Разработать и апробировать двухмодульный нейросетевой способ обработки информации в ГС, позволяющий автоматизировать процессы генерации обучающих данных и поиска оптимальной структуры искусственных нейронных сетей (ИНС), снизить погрешности воспроизведения характеристик сенсоров, за счет замены их математических моделей нейросетевыми.

Методы: теория искусственных нейронных сетей, численные методы, методы имитационного моделирования. Для оценки эффективности предложенного решения рассчитывались относительная погрешность (δ), средноквадратическое отклонение (СКО), осуществлялось сравнение с аналогами.

Результаты. Исследован двухмодульный нейросетевой способ обработки информации в ГС. Методом численного моделирования проведены экспериментальные исследования по выбору оптимальных структур ИНС, объема и состава обучающих данных. В ходе экспериментальных исследований рассчитаны погрешности генерации обучающих данных с помощью ИНС (менее 5%) и определения концентраций детектируемых газов в условиях колебания параметров воздушной среды и состава газовой смеси (менее 4%).

Заключение. Предложен двухмодульный нейросетевой способ обработки информации, отличающийся применением двух последовательных модулей многослойных нейронных сетей для генерации обучающих данных и обработки информации, поступающей от сенсорного блока ГС. Применение вспомогательного модуля позволяет сжать исходные данные, унифицировать и автоматизировать процесс их генерации, а также повысить точность воспроизведения многопараметрических функций преобразования сенсоров, в сравнении с альтернативными способами. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности применения способа обработки информации для снижения дополнительных погрешностей количественного определения состава воздушной среды в условиях колебания параметров.

Ключевые слова: нейронные сети; концентрация газа; полупроводниковый сенсор; погрешности измерения; параметры воздушной среды.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Двухмодульный нейросетевой способ обработки информации в газоаналитических системах / О.Г. Бондарь, Е.О. Брежнева, К.А. Ботииков, Н.В. Поляков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 124-140. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-124-140>.

Поступила в редакцию 09.01.2023

Подписана в печать 28.02.2023

Опубликована 14.04.2023

© Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботииков К.А., Поляков Н.В., 2023

Введение

Решение задач раннего обнаружения пожаров, контроля параметров воздушной среды опасных производственных объектов и технологических процессов требует применения высокоточных, быстродействующих и надежных газоаналитических систем. В настоящее время особая роль уделяется вопросам повышения точности измерения концентраций газов в составе сложных многокомпонентных смесей в условиях колебания параметров воздушной среды. Как правило, в современных ГС для повышения точности измерений концентраций газов применяются высокоселективные и дорогостоящие оптические и электрохимические сенсоры. Ограниченный перечень детектируемых газов, низкое быстродействие, высокая стоимость, малый срок службы селективных электрохимических сенсоров значительно сужает область их применения. Как результат – актуальным направлением в данной области является разработка новых и модернизация существующих сенсоров газа и их схем включения [1-7]. Одними из таких типов сенсоров являются недорогие и быстродействующие полупроводниковые сенсоры, обладающие длительным сроком службы и высокой чувствительностью к широкому списку токсичных и взрывоопасных газов.

Принцип работы полупроводниковых сенсоров основан на изменении электропроводности чувствительного слоя при

адсорбции на него детектируемого газа. Основным недостатком полупроводниковых сенсоров является чувствительность к колебаниям температуры, влажности, а также низкая селективность, обусловленная физико-химическими процессами, лежащими в основе его функционирования.

Для снижения влияния колебаний параметров воздушной среды в ГС широко применяются методы пробоподготовки газовых смесей, осуществляется поиск оптимальных рабочих температур и материалов чувствительных пленок сенсоров [8].

Альтернативным направлением в решении данной задачи является применение интеллектуальных способов совместной обработки информации, реализуемых на базе микроконтроллера. Высокую эффективность для решения таких задач показали ИНС [9-11]. В настоящее время ИНС широко используются в системах технического зрения, автоматизированного управления технологическими процессами, в робототехнике, в биомедицине [12-18]. В ГС нейронные сети нашли применение при решении задач качественного анализа состава газовых смесей [9]. Известно применение нейронных сетей для раздельного определения концентраций газов в составе многокомпонентных смесей одним полупроводниковым сенсором, заключающееся в обработке сигналов

сенсоров, получаемых в динамическом температурном режиме [8,10].

Материалы и методы

В зависимости от условий эксплуатации ГС, сенсоры газа, входящие в ее состав, могут подвергаться значительным климатическим перепадам температуры и влажности. В связи с чем, в данной работе предпринята попытка использовать ИНС для совместной обработки информации, поступающей не только от сенсоров газа, но и от сенсоров температуры и влажности, с целью снижения дополнительных погрешностей измерений.

Основным ограничивающим фактором применения ИНС в ГС является процесс генерации обучающих данных. Наиболее распространённым методом их получения является использование только экспериментальных данных, что крайне дорогостояще и трудоемко, а

также усложняет автоматизацию процесса их генерации, накладывает ограничение на объем обучающей выборки [11, 19, 20].

Альтернативным вариантом генерации обучающих данных является применение эмпирических и теоретических моделей сенсоров [21]. Применение математических моделей усложняет процесс автоматизации генерации данных, так как требует адаптации их структуры и параметризации нелинейных многопараметрических функций, кроме того, теоретические модели не всегда позволяют достичь заданной величины погрешности воспроизведения характеристик сенсоров.

На рис. 1 и 2 представлены схемы, демонстрирующие суть предлагаемого способа обработки информации в ГС, отличающегося применением двух модулей нейронной сети.



Рис. 1. Вспомогательный модуль на основе нейронных сетей: **Cn** — концентрации газов; **T** — температура; **RH** — относительная влажность воздуха; **S** — выходной сигнал сенсора

Вспомогательный модуль нейронной сети используется для автоматической генерации обучающих данных в требуемом объеме, а основной модуль осуществляет совместную обработку сигналов сенсоров на основе ИНС. Исходные данные (концентрации газов C_n , температура T , влажность RH и соответствующие им сигналы S_n) для обучения нейронных моделей сенсоров могут быть получены с помощью разработанного измерительного модуля на базе *Arduino Nano* (рис. 3) или оцифровкой, имеющихся функций преобразований сенсоров. Блоки оптимизации и параметризации используются на этапе поиска структуры и коэффициентов нейронной сети, обеспечивающей требуемый уровень погрешностей.

Выходом нейронной модели сенсора является его сигнал, который используется на этапе обучения нейронной сети для совместной обработки информации в основном модуле.

Процесс обучения нейронной сети основного модуля начинается с генерации виртуальных газовых смесей случайным образом по равномерному закону. Каждая газовая смесь (Mix_{gas}) характеризуется набором значений концентраций основных компонентов (C_n) и параметров воздушной среды (влажности RH и температуры T):

$$Mix_{gas} = (C_1 \dots C_n, RH, T)^T.$$

Обученные ранее нейронные модели сенсоров генерируют совокупность сигналов S_i , соответствующих составу поданной на вход газовой смеси и параметрам воздушной среды.

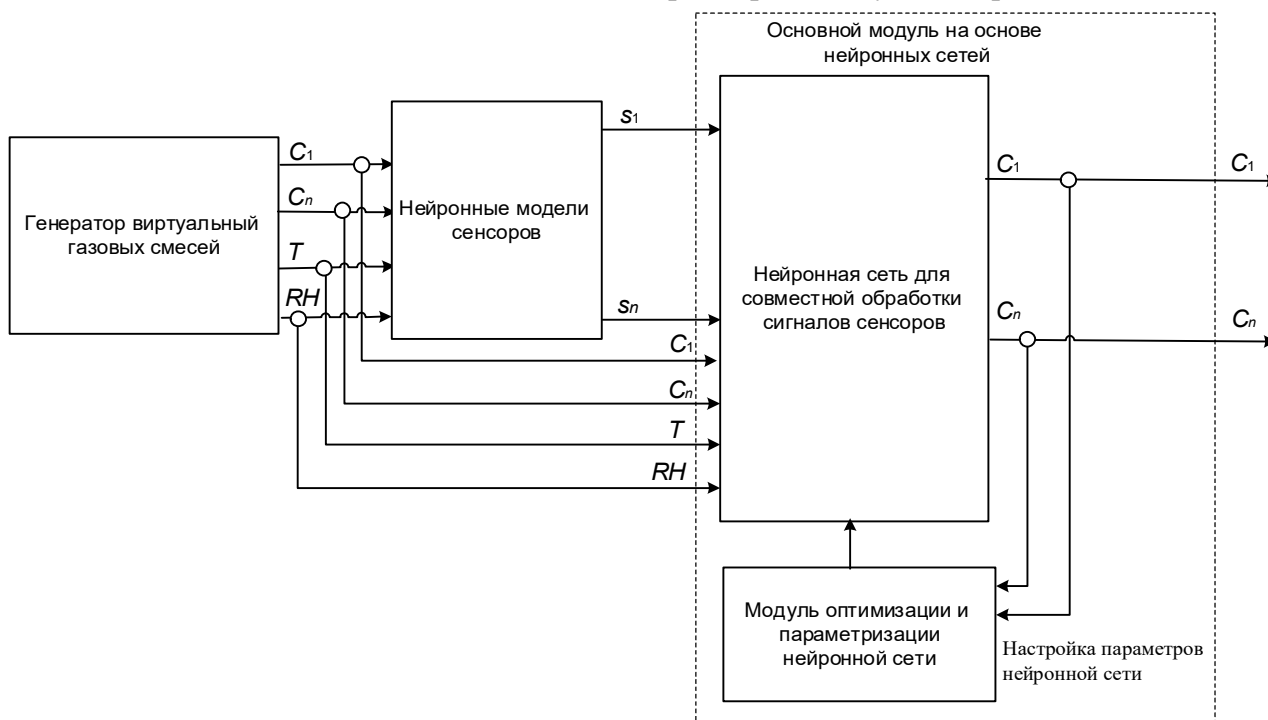


Рис. 2. Основной модуль на основе нейронных сетей

Обучающими данными для основного модуля ИНС служат концентрации детектируемых газов, совокупности сигналов сенсоров газа и параметров воздушной среды:

$$C=(C_1,...C_n)^T,$$

$$S=(S_1,...S_n, S_{RH}, S_T)^T.$$

Апробация способа проводилась на массово выпускаемых полупроводниковых сенсорах фирмы *Figaro*, типовые характеристики которых представлены на примере сенсора угарного газа *TGS2442*

(рис. 4 – 6). Приведенные в технической документации характеристики демонстрируют высокую чувствительность сенсора не только к перекрестному газу водороду, но и к колебаниям температуры и относительной влажности воздуха. Применение предложенного способа должно позволить снизить погрешности измерения детектируемого угарного газа при отклонении параметров среды от нормальных условий.

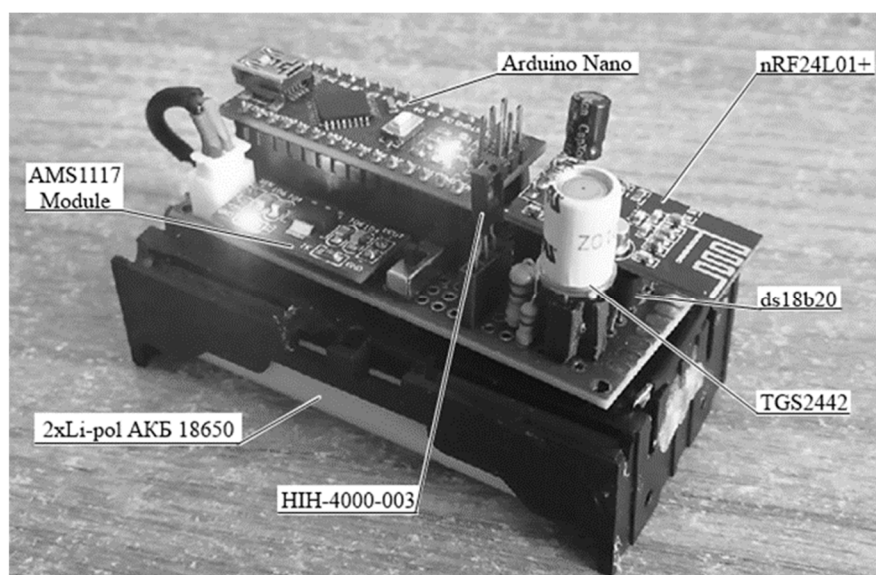


Рис. 3. Измерительный модуль: **ds18b20** – датчик температуры, **HHH-4000-003** – датчик влажности, **TGS2442** – сенсор угарного газа

Исследования проводились в два основных этапа. На первом этапе осуществлялась разработка нейронной модели полупроводниковых сенсоров для вспомогательного модуля, на втором – нейронной модели основного модуля для совместной обработки информации, поступающей от сенсорной части ГС. При разработке нейронных моделей

пользовались общими рекомендациями по выбору начального значения числа нейронов в скрытом слое и по оценке объема обучающих данных n [22]:

$$n = \frac{w}{\varepsilon},$$

где w – число настраиваемых коэффициентов сети; ε – величина ошибки.

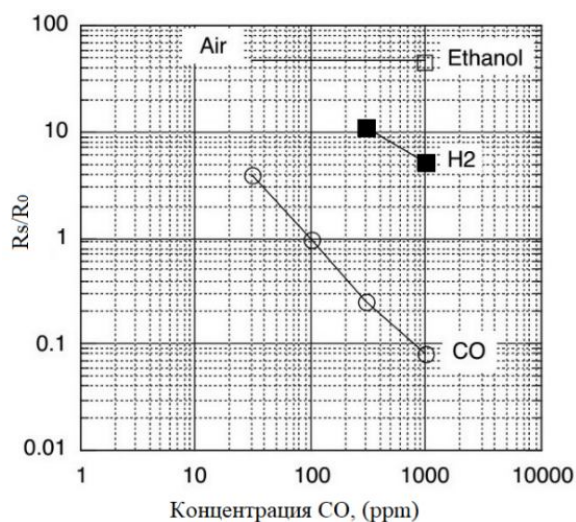


Рис. 4. Характеристика чувствительности сенсора TGS2442 к детектируемому угарному газу и перекрестному газу (водороду): R_s/R_0 – выходной сигнал сенсора, определяем отношением измеренного сопротивления к сопротивлению сенсора при концентрации CO 100 ppm

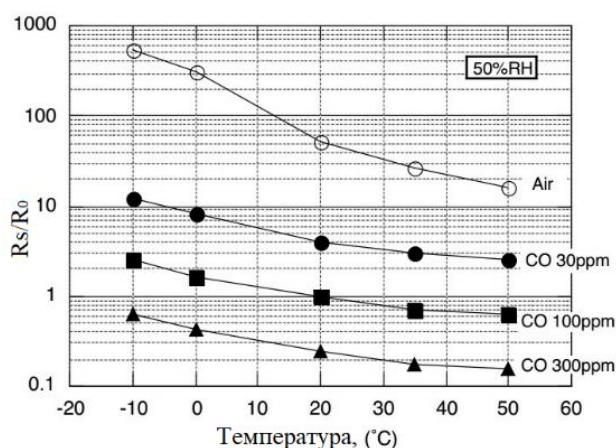


Рис. 5. Характеристика чувствительности сенсора TGS2442 к колебаниям температуры

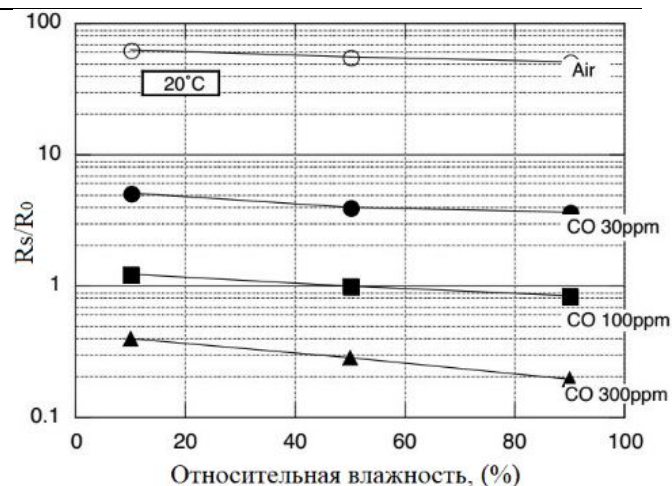


Рис. 6. Характеристика чувствительности сенсора TGS2442 к колебаниям относительной влажности

Общими при разработке двух модулей являлись задачи поиска оптимальной структуры ИНС и оптимального состава и объема обучающих данных. Методика поиска оптимальной структуры ИНС заключалась в постепенном наращивании числа нейронов в скрытом слое до достижения требуемого уровня максимальной относительной погрешности на тестовой выборке. При достижении целевого значения осуществлялось контрольное увеличение числа нейронов в скрытом слое и в случае, если не отмечалось значительного снижения уровня погрешности, фиксировалось предыдущее значение.

Вторая задача была направлена на уменьшение объема обучающих данных за счет варьирования числа тренировочных примеров по каждому из влияющих на сигнал факторов. Как только по одному из влияющих факторов наблюдался рост уровня погрешностей, число тренировочных примеров по нему фиксировалось.

Многослойная сеть прямого пространства обучалась по 3 раза для каждого набора обучающих данных. Для оценки эффективности обучения сети использовались тестовые выборки, включающие в себя значения влияющих факторов, отсутствующие в обучающих данных. В процессе обучения сети, с помощью встроенной функции *MATLAB*, осуществлялся контроль «эффекта переобучения».

За исходную структуру нейронной модели полупроводниковых сенсоров была взята структура 4-3-1, где четыре нейрона во входном слое соответствуют четырем воздействующим факторам, таким как влажность (RH), температура (T), детектируемый и перекрестный газы. Число нейронов в выходном слое выбирается равным единице и соответствует целевому сигналу сенсора. Исходный объем обучающей выборки составил три тысячи двести значений. Наилучший результат был получен для структуры нейронной модели 4-6-1, по прохождению двух тысяч эпох максимальная относительная погрешность не превышала 5%, среднеквадратическое отклонение 0,14%.

Результаты и их обсуждение

Исследования проводились численным методом в среде *MATLAB* с использованием специализированного программного пакета по нейронным сетям *Neural*

Networks Toolbox. Базовой для исследований являлась архитектура ИНС прямого распространения, функция активации (ФА) нейронов входного и скрытого слоев – сигмоида, выходного – линейная ФА.

По вышеописанной методике были получены оптимальные объемы и составы обучающих данных для трех типовых полупроводниковых сенсоров угарного газа *TGS2442*, водорода *TGS821* и метана *TGS2612-D00*. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов демонстрирует возможность применения унифицированной нейронной модели полупроводниковых сенсоров структурой 4-6-1, относительная погрешность δ воспроизведения характеристик сенсоров которой не превышает 5,0 %.

Анализ результатов показал, что объем обучающей выборки может быть значительно снижен за счет уменьшения тренировочных примеров по зависимостям выходного сигнала сенсора от температуры и влажности. Наибольший вклад в объем обучающих данных вносят основные зависимости, представляющие собой функции сигналов сенсора от концентраций детектируемых газов.

Показано, что для повышения эффективности обучения сети воспроизводить основную зависимость следует увеличивать частоту тренировочных примеров по краям диапазона характеристики.

Таблица 1. Результаты эксперимента по оптимизации объема (n) и состава обучающих данных для нейронных моделей сенсоров

Воспроизводимая характеристика	Диапазон	n	δ , %	СКО / MSE, %
Сенсор водорода $TGS821$				
1- $S(H_2)$	30 – 100 ppm	70	3,74	0,19
	100 – 1000 ppm	130	2,65	
	1000 – 3000 ppm	350	0,92	
2 – $S(CO)$	30 – 3000 ppm	300	3,1	0,19
3 – $S(RH)$	30 - 90 %	50	2,6	1,25
4 – $S(T)$ при $RH=35\%$	-10 - +40 $^{\circ}C$	50	1,84	0,33
5 – $S(T)$ при $RH=65\%$		50	3,63	0,91
6 – $S(T)$ при $RH=95\%$		50	1,68	0,52
Сенсор угарного газа $TGS2442$				
1 – $S(CO)$	30 – 100 ppm	300	3,12	0,15
	100 – 1000 ppm	250	4,85	
	1000 – 3000 ppm	700	2,03	
2 – $S(H_2)$	30 – 3000 ppm	500	0,73	0,11
3 – $S(RH)$ при $C_{co}=30$ ppm	35 - 90 %	100	0,70	0,38
4 – $S(RH)$ при $C_{co}=1000$ ppm		100	1,05	0,39
5 – $S(RH)$ при $C_{co}=300$ ppm		200	0,92	0,54
6 – $S(T)$ при $C_{co}=30$ ppm	-10 - +40 $^{\circ}C$	100	1,0	0,14
7 – $S(T)$ при $C_{co}=100$ ppm		200	1,8	0,28
8 – $S(T)$ при $C_{co}=300$ ppm		200	0,73	0,36
Сенсор метана $TGS2612-D00$				
1 – $S(CH_4)$	10 – 100 ppm	100	1,6	0,15
	100 – 5000 ppm	25		
2 – $S(H_2)$	10 – 5000 ppm	125	1,0	0,23
3 – $S(RH)$ при $C_{CH_4}=5000$ ppm	35 - 90 %	100	3,6	0,27
4 – $S(T)$ при $RH=35$ %	-10 - +50 $^{\circ}C$	100	1,0	0,14
5 – $S(T)$ при $RH=65$ %		100	3,0	0,15
6 – $S(T)$ при $RH=95$ %		100	1,1	0,11

Состав и объем обучающих данных напрямую зависит от экстраполяционных возможностей ИНС, в связи с чем в

данной работе были проведены соответствующие исследования. С этой целью, в обучающих данных намеренно

сужались границы диапазонов изменения факторов, влияющих на сигнал сен-

сора, а тестирование осуществлялось во всем рабочем диапазоне.

Таблица 2. Исследование экстраполяционных возможностей ИНС

Воспроизводимая характеристика	Диапазон обучающих данных	Диапазон тестовых данных	δ , %	СКО / MSE, %
1- $S(H_2)$	50 - 2500 ppm	30 - 3000 ppm	4,80	1,52
2 – $S(CO)$			3,91	1,21
3 – $S(RH)$	45 - 80 %	35 - 90 %	2,72	2,05
4 – $S(T)$ при $RH=35\%$	-5 - +30 °C	-10 - +40 °C	4,12	2,27
5 – $S(T)$ при $RH=65\%$			1,27	0,58
6 – $S(T)$ при $RH=95\%$			2,32	1,21

Полученные значения максимальной относительной погрешности (менее 5%) воспроизведения данных, отсутствующих в обучающей выборке и выходящих за ее границы, позволяют судить об удовлетворительных экстраполяционных свойствах ИНС.

На следующем этапе с помощью нейронных моделей сенсоров генерировались обучающие, тестирующие и контрольные (контроль «эффекта переобучения») данные для проведения экспериментальных исследований по оптимизации структуры и оценки эффективности применения основного модуля ИНС с целью отстройки от перекрестной чувствительности газовых сенсоров и подавления влияния колебаний пара-

метров воздушной среды в газоаналитических системах.

Апробация проводилась на газоаналитической системе угарный газ-водород. На рис. 7 представлена обобщенная структура ИНС основного модуля.

Поиск оптимальной структуры ИНС и объема обучающих данных осуществлялся по описанной выше методике для нейронных моделей вспомогательного модуля (табл. 3).

В табл. 4 представлены результаты тестирования ИНС структурой 4-6-2. Эксперимент показал, что число коэффициентов в структуре ИНС 4-2-2 недостаточно для решения поставленной задачи, для структуры 4-8-2 проявляется «эффект переобучения» сети.

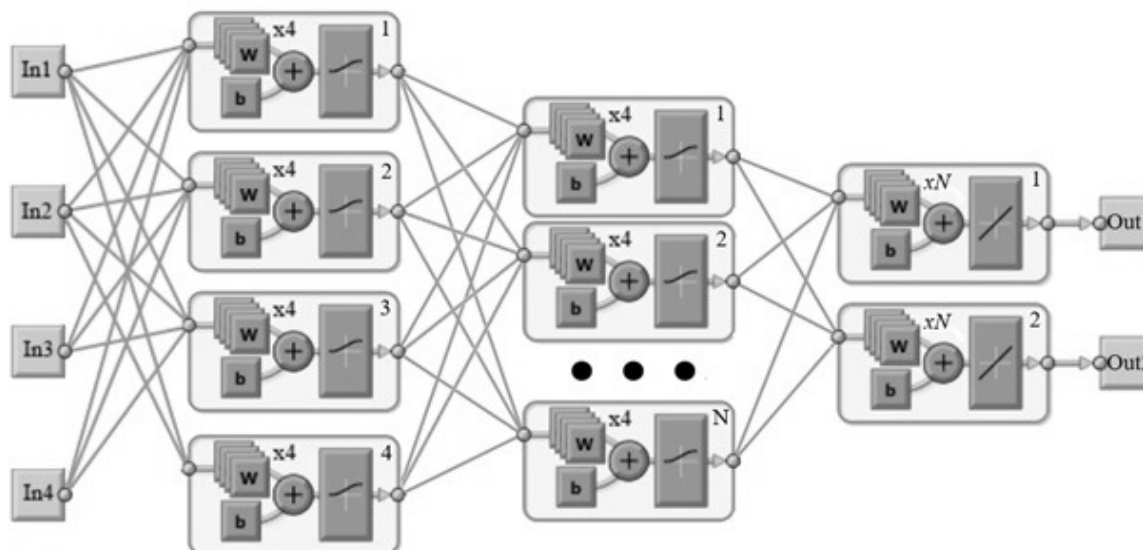


Рис. 7. Обобщенная структура ИНС основного модуля: **In** – входы сети, на которые подаются сигналы сенсоров; **Out** – выходы сети, соответствующие концентрациям газов

Таблица 3. Результаты поиска оптимальной структуры ИНС для основного модуля

Table 3. Search results for the optimal ANN structure for the main module

Структура ИНС	n	Пройдено эпох обу- чения (макс. 3000) /	δ , %	СКО / MSE, %
4-2-2	2200	2351	162,0	2,1
4-4-2	2200	3000	18,3	0,37
	1200	3000	23,3	0,2
	700	3000	25,0	0,5
4-6-2	2200	3000	14,1	0,21
	1200	3000	6,3	0,24
	700	3000	6,5	0,32
	600	3000	3,8	0,28
	500	3000	6,2	0,37
4-8-2	2200	3000	13,1	0,13
	1200	2835	18,3	0,15
	700	471	28,5	0,56

Таблица 4. Результаты тестирования ИНС структурой 4-6-2

Детектируемый газ	Условия тестирования	δ , %/ Δ , ppm	СКО / MSE, %
CO	$C_{CO}=30 - 3000 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=0 \text{ ppm}$, $RH=50\%$, $T=25^\circ\text{C}$	3,80 %	0,21
	$C_{CO}=0 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=30 - 3000 \text{ ppm}$, $RH=50\%$, $T=25^\circ\text{C}$	0,83 ppm	-
	$C_{CO}=30 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=0 \text{ ppm}$, $RH=35-95 \%$, $T=25^\circ\text{C}$	0,9 %	0,4
	$C_{CO}=100 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=0 \text{ ppm}$, $RH=35-95 \%$, $T=25^\circ\text{C}$	0,5 %	0,4
	$C_{CO}=300 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=0 \text{ ppm}$, $RH=35-95 \%$, $T=25^\circ\text{C}$	0,3 %	0,2
	$C_{CO}=30 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=0 \text{ ppm}$, $RH=50 \%$, $T=-10-+40^\circ\text{C}$	3,0 %	1,7
	$C_{CO}=100 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=0 \text{ ppm}$, $RH=50 \%$, $T=-10-+40^\circ\text{C}$	3,6 %	0,8
	$C_{CO}=300 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=0 \text{ ppm}$, $RH=50 \%$, $T=-10-+40^\circ\text{C}$	0,8 %	0,2
H ₂	$C_{CO}=30 - 3000 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=0 \text{ ppm}$, $RH=50\%$, $T=25^\circ\text{C}$	0,46 ppm	-
	$C_{CO}=0 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=30 - 3000 \text{ ppm}$, $RH=50\%$, $T=25^\circ\text{C}$	3,4 %	0,28
	$C_{CO}=0 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=100 \text{ ppm}$, $RH=35 - 95\%$, $T=25^\circ\text{C}$	0,8	0,6
	$C_{CO}=0 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=100 \text{ ppm}$, $RH=35\%$, $T=-10-+40^\circ\text{C}$	2,1	1,2
	$C_{CO}=0 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=100 \text{ ppm}$, $RH=65\%$, $T=-10-+40^\circ\text{C}$	3,9	1,5
	$C_{CO}=0 \text{ ppm}$, $C_{H_2}=100 \text{ ppm}$, $RH=95\%$, $T=-10-+40^\circ\text{C}$	1,0	2,8

Наилучший результат показала нейронная сеть структурой 4-6-2, для которой проводились дополнительные исследования по снижению объема обучающих данных. Получен следующий оптимальный объем и состав обучающих данных:

1. $S(CO)$ – 200 точек;

2. $S(H_2)$ – 200 точек;

3. $S(RH)$ – 100 точек;

4. $S(T)$ – 100 точек.

На рис. 8-11, в виде графиков, представлены результаты тестирования нейронной сети основного модуля по каналу угарного газа при нормальных условиях и влияниях факторов окружающей среды.

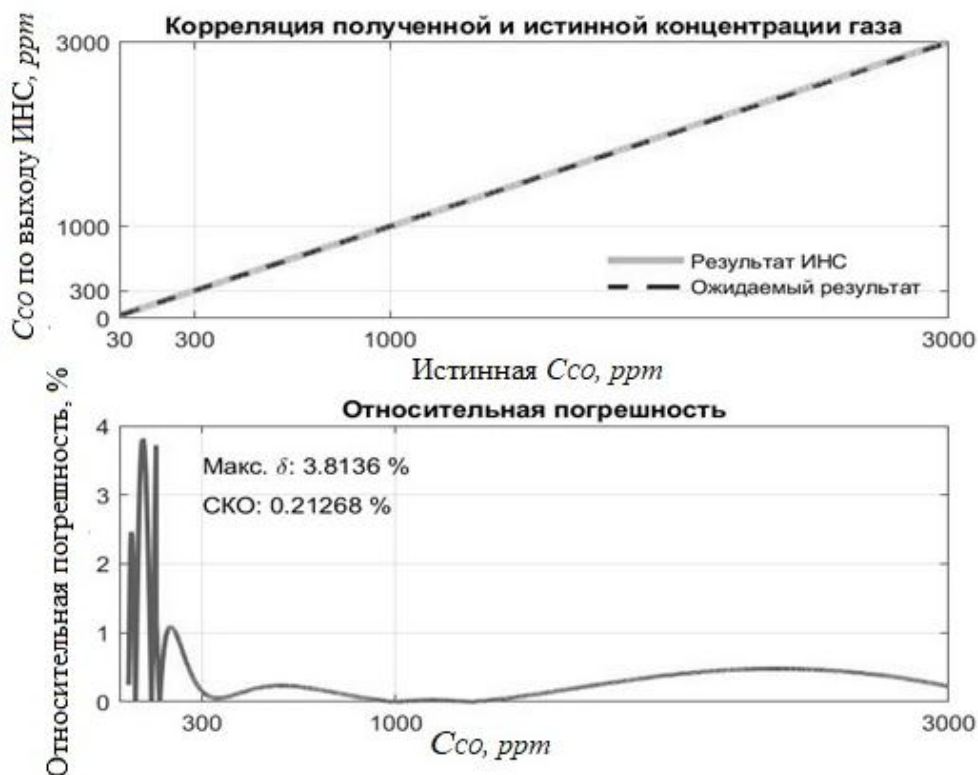


Рис. 8. Тестирование ИНС основного модуля определять концентрацию угарного газа при нормальных условиях

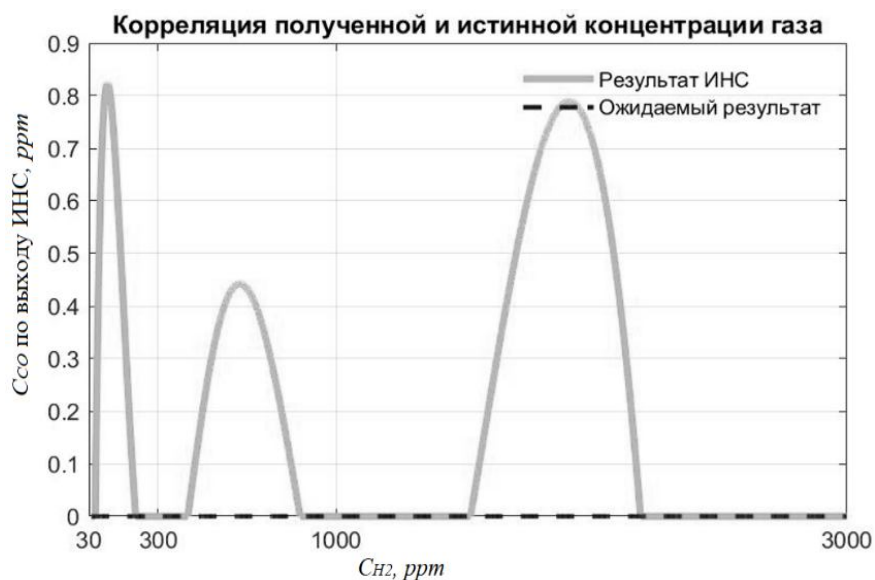


Рис. 9. Тестирование ИНС основного модуля обеспечивать отстройку от перекрестного газа – водорода в диапазоне 30 – 3000 ppm

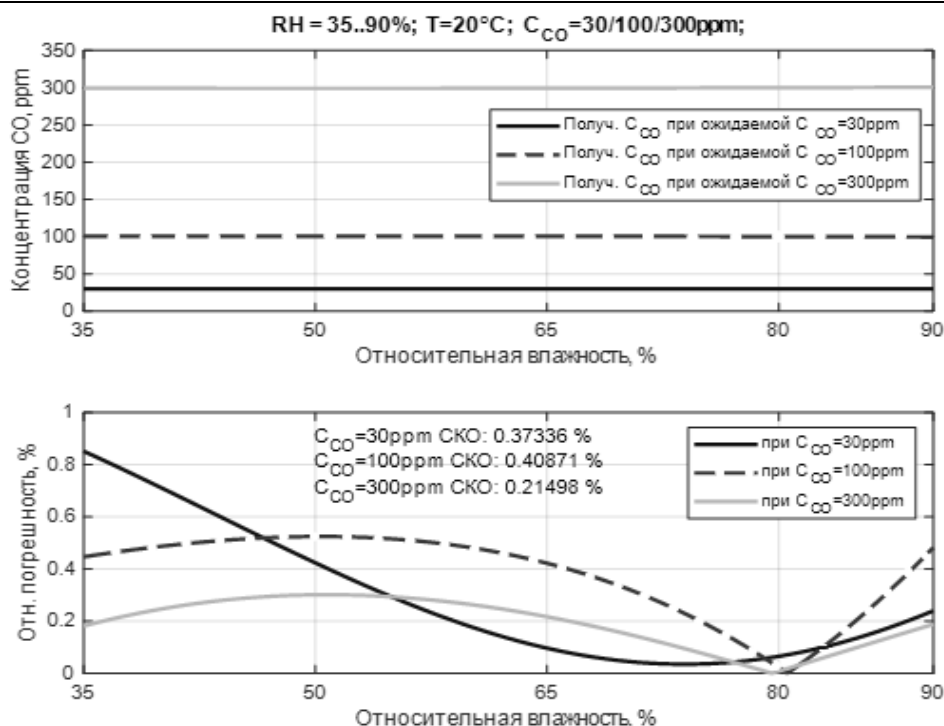


Рис. 10. Тестирование ИНС основного модуля обеспечивать отстройку от влияния влажности в диапазоне 35-90% в присутствии 30, 100, 3000 ppm CO

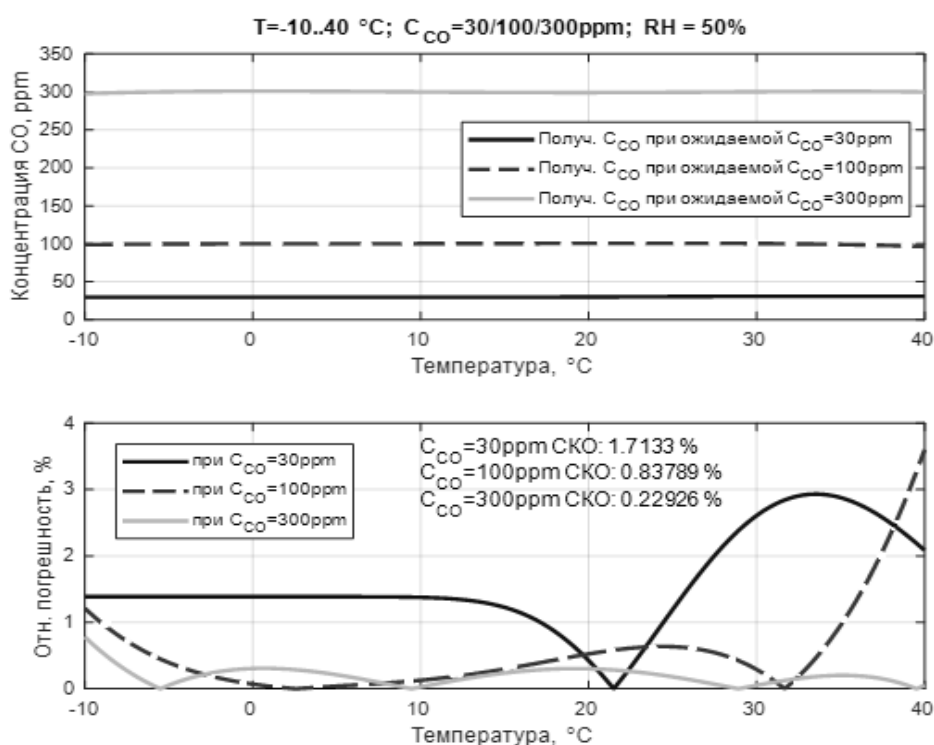


Рис. 11. Тестирование ИНС основного модуля обеспечивать отстройку от влияния температуры в диапазоне -10 - +40 °C в присутствии 30, 100, 3000 ppm CO

В табл. 5 представлены результаты сравнения погрешностей, предложенного двухмодульного нейросетевого спо-

соба обработки информации с аналогами, отдельно для вспомогательного и основного модулей [11, 21, 23].

Таблица 5. Результаты сравнения с аналогами

Table 5. Comparison results with peers

Источники погрешностей		Вспомогательный модуль		Основной модуль		
		Математические модели	Нейронная модель	ГС на основе высокоселективных сенсоров	ГС на основе полупроводниковых сенсоров	ГС на основе ИНС
Основная погрешность, % ($C_{nep}=0\text{ ppm}$, $RH=50\%$, $T=25^{\circ}\text{C}$)	C_{CO}	5,0	4,85	15,0	5,0	3,8
	C_{H_2}	0,9	2,03	15,0	-	3,4
Погрешности при появлении перекрестного газа ($C_{пер}=30 - 3000\text{ ppm}$), %		-	-	<30, (6,7 привед. погр.)	47,0 ppm (абсолютная)	0,83 ppm
Погрешности от изменения влажности окружающей среды ($RH=35-95\%$), %		16,0	1,8	18,0	18,0	0,9
Погрешности от изменения температуры окружающей среды ($T=-10-+40^{\circ}\text{C}$), %		29,0	1,05	37,5	58,0	3,6
Быстродействие, с		-	-	30,0	8,0	8,0
Срок службы, мес.		-	-	36,0	60,0	60,0

Выводы

Описан двухмодульный нейросетевой способ обработки информации в ГС. К особенностям стоит отнести использование двух последовательных модулей нейронных сетей для генерации обучающих данных и обработки сигналов сенсоров. В программе *MATLAB* с использованием специализированного программного пакета по нейронным сетям *Neu-*

ral Networks Toolbox методом численного моделирования проведены экспериментальные исследования по выбору оптимальных структур ИНС и объема и состава обучающих данных. Показано, что оптимальный вклад в объем обучающих данных вносят зависимости выходных сигналов сенсоров от концентраций детектируемых газов. В ходе экспериментальных исследований рассчитаны погрешности генерации обу-

чающих данных с помощью ИНС (менее 5%) и определения концентраций детектируемых газов в условиях коле-

бания параметров воздушной среды и состава газовой смеси (менее 4%).

Список литературы

1. Ayodele B.V., Khan M.R., Nooruddin S.S. et al. Modelling and optimization of syn-gas production by methane dry reforming over samarium oxide supported cobalt catalyst: response surface methodology and artificial neural networks approach // *Clean Techn Environ Policy*. 2017. Vol. 19. P. 1181–1193.
2. Газовые сенсоры для измерений концентрации вредных веществ: особенности применения / В. М. Тележко, М. В. Тютчев, М. В. Аверьянова, А. Д. Паранин, Е. В. Хойна // *Измерительная техника*. 2021. №10. С. 65–71.
3. Tin dioxide nanoparticles with high sensitivity and selectivity for gas sensors at sub-ppm level of hydrogen gas detection / XT. Yin, WD. Zhou, J. Li et al. // *J Mater Sci: Mater Electron*. 2019. Vol. 30. P. 14687–14694.
4. Light enhanced room temperature resistive NO₂ sensor based on a gold-loaded organic–inorganic hybrid perovskite incorporating tin dioxide / Y. Chen, X. Zhang, Z. Liu et al. // *Microchim Acta*. 2019. Vol. 47.
5. Cerium-doped SnO₂ nanomaterials with enhanced gas-sensitive properties for adsorption semiconductor sensors intended to detect low H₂ concentrations / G. Fedorenko, L. Oleksenko, N. Maksymovych et al. // *J Mater Sci*. 2020. Vol. 55. P. 16612–16624.
6. Oleksenko L.P., Maksymovych N.P. Sensors for CO Based on Semiconductor Nanomaterials Pd/SnO₂ // *Theor Exp Chem*. 2019. Vol. 55. P. 201–206.
7. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Pozdnyakov V. V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor // *Measurement Techniques*, 2018. Vol. 61. № 5. P. 514-519.
8. Анисимов О.В. Исследование отклика тонкопленочного сенсора на основе оксида олова в импульсном режиме для различных газов // *Известия вузов. Физика*. 2006. №3. С. 186-187.
9. Khaldi S., Dibi Z. Neural Network Technique for Electronic Nose Based on High Sensitivity Sensors Array // *Sens Imaging*. 2019. Vol. 15.
10. Анищенко Ю.В., Гусельников М.Э. Контроль аварийных выбросов в атмосферу // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск «Безопасность. Технологии. Управление»*. 2009. С.9-14.

11. Гусельников М.Э., Кротова Ю.В. Разработка полупроводникового газоанализатора // Безопасность жизнедеятельности. 2008. №1. С. 50-52.
12. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В., Килин Г.А. Использование нейронных сетей для управления газотурбинными установками малой и средней мощности // Российская электротехника. 2019. №90. С. 737–740.
13. Cao X., Suganthan P.N. Video shot motion characterization based on hierarchical overlapped growing neural gas networks // Multimedia Systems. 2003. Vol. 9. P. 378–385.
14. Three-day forecasting of greenhouse gas CH₄ in the atmosphere of the Arctic Belyy Island using discrete wavelet transform and artificial neural networks / A. Rakhmatova, A. Sergeev, A. Shichkin et al. // Neural Comput & Applic. 2021. Vol. 33. P. 10311–10322.
15. Cretu AM., Chagnon-Forget M., Payeur P. Selectively densified 3D object modeling based on regions of interest detection using neural gas networks // Soft Comput. 2017. Vol. 21. P. 5443–5455.
16. Марковников Н. М., Кипяткова И. С. Аналитический обзор интегральных систем распознавания речи // Тр. СПИИРАН. 2018. № 58. С. 77–110.
17. Воевода А.А., Романников Д.О. Синтез нейронной сети для решения логико-арифметических задач // Тр. СПИИРАН. 2018. № 58. С. 77–110.
18. Winkler D.A. Neural networks as robust tools in drug lead discovery and development // Mol Biotechnol. 2004. Vol. 27. P. 139–167.
19. Wang X., Cao W. Non-iterative approaches in training feed-forward neural networks and their applications // Soft Comput. 2018. Vol. 22. P. 3473–3476.
20. Wójcik P.I., Kurdziel M. Training neural networks on high-dimensional data using random projection // Pattern Anal Applic. 2019. Vol. 22. P. 1221–1231.
21. Брежнева Е.О. Многофакторное моделирование функции преобразования металллоксидных датчиков СО // Датчики и Системы. 2012. №4. С.64-69.
22. Swingler K. Applying neural networks: A practical guide. London: Academic Press, 1996. 345 p.
23. Drägerwerk AG & Co. KGaA: официальный сайт. URL: https://www.draeger.com/ru_ru/Safety/Portable-Gas-Detectors (дата обращения: 20.12.2021)

Информация об авторах

Бондарь Олег Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru

Брежнева Екатерина Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Ботиков Константин Алексеевич, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: botikov.03@mail.ru

Поляков Николай Владимирович, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikera2016@mail.ru

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. Публикация бесплатная.

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Приставительные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://science.swsu.ru>.