

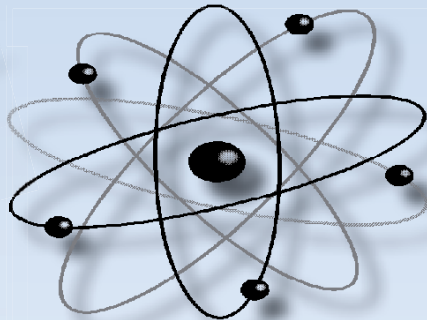
ISSN 2076-4359

Учёные записки

№ 1 (73)

2024

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Učenyje zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КНАГУ», находящейся на сайте <http://www.knastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя:
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27
Телефон для справок:
+7 (4217) 24-13-48

Адрес редакции: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Комсомольская, д. 50, ауд.508
Телефон для справок:
+7 (4217) 24-13-48
Индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.
Цена свободная.
© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КНАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:	Алексей Иванович Евстигнеев, доктор технических наук, профессор. E-mail: diss@knastu.ru
Заместитель главного редактора журнала:	Александр Витальевич Космынин, доктор технических наук, профессор. E-mail: avkosm@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:	Сергей Николаевич Иванов, доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Литературный редактор:	Александр Альфредович Шунейко, доктор филологических наук, доцент. E-mail: a-shuneyko@yandex.ru
Технический редактор:	Татьяна Николаевна Карпова E-mail: karpovat@list.ru
Перевод на английский язык:	Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Дизайн и верстка:	Оксана Вадимовна Приходченко, кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru
Менеджер информационных ресурсов:	Иван Константинович Андрианов, кандидат технических наук. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru

Серия: «Науки о природе и технике»

Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»	Сергей Николаевич Иванов, доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
Отделы:	
1. Авиационная и ракетно-космическая техника (2.5.13 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов)	Сергей Иванович Феоктистов, доктор технических наук, профессор. E-mail: ssf@knastu.ru
2. Энергетика (2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы)	Константин Константинович Ким, доктор технических наук, профессор. E-mail: kimkk@inbox.ru Александр Владимирович Сериков, доктор технических наук, профессор. E-mail: em@knastu.ru Сергей Николаевич Иванов, доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
3. Управление (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	Вячеслав Алексеевич Соловьев, доктор технических наук, профессор. E-mail: keparu@knastu.ru Андрей Юрьевич Торгашов, доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы комплексы программ)	Константин Сергеевич Бормотин, доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru Анатолий Александрович Буренин, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru
5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)	Борис Яковлевич Мокрицкий, доктор технических наук, доцент. E-mail: boris@knastu.ru Владимир Сергеевич Щетинин, доктор технических наук, доцент. E-mail: schetynin@mail.ru
6. Металлургия и материаловедение (2.6.3 - Литейное производство)	Эдуард Анатольевич Дмитриев, доктор технических наук, доцент, E-mail: rector@knastu.ru Олег Викторович Башков, доктор технических наук, доцент, E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (01.01.00; 01.02.00)	Анатолий Александрович Буренин, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru
8. Флот и кораблестроение (05.08.00; 05.22.00)	Николай Алексеевич Тарануха, доктор технических наук, профессор. E-mail: taranukha@knastu.ru
9. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (05.26.00; 25.00.00)	Ольга Григорьевна Шакирова, доктор химических наук, доцент, E-mail: hiht@knastu.ru
10. Строительство и архитектура (05.23.00)	Николай Петрович Крадин, доктор архитектуры, профессор, член-корреспондент РААСН. E-mail: n_kradin@mail.ru

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»	Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Отделы:	
1. Философия, социология и культурология (5.4.6; 5.7.8; 5.10.1)	Яна Станиславовна Крыжановская, доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowsckaia.yana2012@yandex.ru Евгения Валерьевна Савелова, доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. Виктория Юрьевна Прокофьева, доктор филологических наук, профессор. Илья Игоревич Докучаев, доктор философских наук, профессор.
2. Филология и искусствознание (5.9.5; 5.9.8)	Олег Александрович Бузуев, доктор филологических наук, профессор. E-mail: buz07@list.ru
3. Психология и педагогика (5.8.1; 5.8.2; 5.8.7)	Татьяна Евгеньевна Наливайко, доктор педагогических наук, профессор. E-mail: tenal@knastu.ru
4. История (5.6.1; 5.6.2)	Жанна Валерьяновна Петрунина, доктор исторических наук, доцент. E-mail: petrunina71@bk.ru, history@knastu.ru
5. Экономика (5.2.1; 5.2.3; 5.2.6)	Геннадий Иванович Усанов, доктор экономических наук, профессор. E-mail: Usanov_G@mail.ru

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦУЙ СЮЙ, профессор Шеньянского аэрокосмического университета (КНР)

ЭНЕРГЕТИКА

АЛЕКСАНДР ЛООС, доктор философии, профессор Академии Грюндига в Нюрнберге (Германия)

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматизации Будапештского университета технологий и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологий и экономики (Венгрия)

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КУЛЬЧИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Миякизи (Япония)

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

НИКИТА ФЁДОРОВИЧ МОРОЗОВ, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН

БОРИС ДМИТРИЕВИЧ АННИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики деформируемого твёрдого тела Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭДУАРД СТЕПАНОВИЧ ГОРКУНОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения УрО РАН

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ХОЛЬКИН, академик РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОРЬЕВ, доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного технологического университета «Станкин»

МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КАБЛОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского института авиационных материалов

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ НАУМОВ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем морских технологий ДВО РАН

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КИСЕЛЕВ, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Дальневосточного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института сельского хозяйства РАСХН

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ШИ ТИЕМАО, доктор философии, профессор, проректор Шеньянского архитектурно-строительного университета (КНР)

СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

ДАВИД ИЗРАИЛЕВИЧ ДУБРОВСКИЙ, доктор философских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института философии РАН

ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ СЕРДЮКОВ, доктор философских наук, профессор, профессор кафедры философии, социологии и права Дальневосточного государственного университета путей сообщения

ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОВЕДЕНИЕ

СВЕТЛАНА ГРИГОРЬЕВНА ТЕР-МИНАСОВА, доктор филологических наук, профессор, президент факультета иностранных языков и регионоведения Московского государственного университета

ВАН ЦЗИНЬЛИН, доктор философии, профессор, директор Института международного образования Чанчуньского университета (КНР)

ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА

ЕКАТЕРИНА ИОСИФОВНА АРТАМОНОВА, доктор педагогических наук, профессор кафедры педагогики высшей школы Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

ИСТОРИЯ

АЛЕКСАНДР МАНУЭЛЬЕВИЧ РОДРИГЕС-ФЕРНАНДЕС, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой новой и новейшей истории Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

ЭКОНОМИКА

АЛЕКСАНДР ЕВСТРАТЬЕВИЧ ЗУБАРЕВ, доктор экономических наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и международному сотрудничеству Тихоокеанского государственного университета

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА
MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Черный С. П., Савельев Д. О., Сбитнев Н. Р., Саяпина П. О.
S. P. Cherniy, D. O. Savelyev, N. R. Sbitnev, P. O. Sayapina

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ
ОБЪЕКТАМИ, ТРЕБУЮЩИМИ УЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

**FEATURES OF MODELING CONTROL SYSTEMS FOR COMPLEX OBJECTS REQUIRING
CONSIDERATION OF GEOMETRIC PARAMETERS**

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keapu@knastu.ru.

Sergej P. Cherniy – PhD in in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keapu@knastu.ru.

Савельев Дмитрий Олегович – старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», руководитель Центра робототехники Ресурсного центра Технопарка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keapu@knastu.ru.

Dmitriy O. Savelyev – Senior Lecturer, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Head of the Center for Robotics of the Resource Center of the Technopark, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keapu@knastu.ru.

Сбитнев Никита Романович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: eapu@knastu.ru.

Nikita R. Sbitnev – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: eapu@knastu.ru.

Саяпина Полина Олеговна – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keapu@knastu.ru.

Polina O. Sayapina – Graduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keapu@knastu.ru.

Аннотация. В представленной работе рассматривается один из возможных подходов к моделированию системы управления объектом с интеграцией его физических свойств и геометрических параметров. В качестве рассматриваемой системы, требующей учёта её кинематики и физических свойств, используется типовая модель с дельта-кинематикой – платформа Стюарта, выполненная на основе пакета программ 3D-моделирования. При создании параметрической модели используются библиотеки, которые позволяют импортировать векторные модели трёхмерного объекта для их последующего использования в общей имитационной модели. Показаны особенности такого подхода для воссоздания реальных условий функционирования объекта в имитационной модели, а также влияние на точность его функционирования при использовании трёхмерной модели кинематики.

Summary. In the present paper, one of the possible approaches to modeling an object control system with the integration of its physical properties and geometric parameters is considered. As the system under consideration, requiring consideration of its kinematics and physical properties, a typical model with delta kinematics is used - the Stewart platform, made on the basis of a 3D modeling software package. When creating a parametric model, libraries are used that allow you to import vector models of a three-dimensional object for their subsequent use in a general simulation model. The features of this approach for recreating the real conditions of an object's functioning in a simulation model are shown, as well as the effect on the accuracy of its functioning when using a three-dimensional kinematics model.

Ключевые слова: платформа Стюарта, имитационное моделирование, кинематика, система управления.

Key words: Stewart platform, simulation modeling, kinematics, control system.

УДК 681.5.017:681.521

Введение. Использование имитационных моделей даёт возможность в большинстве случаев заменить реальные объекты в эксперименте виртуальными, тем самым избежав финансовых и временных затрат на создание прототипов. С увеличением вычислительных мощностей появляются новые методы, программное обеспечение, которые позволяют существенно повысить интерпретируемость и качество имитационных моделей, что в конечном итоге даёт возможность снизить количество допущений, повысить качество математического описания технологического объекта и увеличить размерность его модели.

Зачастую при реализации имитационной модели системы управления технологическим объектом определённую трудность со стороны специализированного программного обеспечения вызывает формирование параметрической модели его геометрии и кинематики. Для снижения ошибки и повышения адекватности имитации физической модели такого объекта необходимо отдельно посредством CAD-системы выполнить проектирование её геометрической модели, поскольку интеграция имитационной модели и 3D-модели, отражающей геометрические параметры с кинематическими связями, позволит существенно приблизить формализуемый технологический объект к его реальному физическому состоянию. Такая форма интегрированной имитационной модели представляется актуальной для таких сложных технологических процессов, как робототехнические комплексы. По своей структуре такие объекты представляют собой сложные специфические объекты, которые имеют многокоординатную систему управления. Вместе с тем CAD-системы хорошо отражают кинематику, и для снижения количества допущений целесообразно включать элементы трёхмерных моделей в общую структуру имитационной модели объекта регулирования. В настоящее время проектирование таких систем становится всё более трудозатратным с точки зрения автоматизации ввиду усложнения конструкции мехатронных узлов и учёта сложности взаимосвязей внутри реализуемых технологических циклов.

Модели и методы. Для формализации математической модели системы управления робототехнического комплекса [1] с реализацией физических свойств объекта рассмотрим типовую модель платформы Стюарта с шестью степенями свободы [2], представленную на рис. 1, которой присущ целый набор специфических свойств объекта. Такие платформы применяются во многих областях – от 3D-принтеров, где необходимо быстрое действие, до калибровки бортовых систем и стыковки космических модулей, где необходима точность позиционирования. Платформа Стюарта представляет собой один из типовых конструктивных объектов с хорошо исследованными физическими и механическими свойствами и является технологическим объектом с дельта-кинематикой. Реализация модели такого объекта при помощи CAD-системы возможна с высокой степенью точности. Приведённая ниже обобщённая модель отражает основные конструктивные элементы её кинематики [3].

Для интеграции физического объекта с его параметрами необходимо импортировать векторную модель трёхмерного объекта, созданного в любой CAD-системе, в структуру имитационной модели. Такой подход позволит интегрировать в исследуемую имитационную модель системы набор тел со своей специфической физикой процессов.

Для реализации рассматриваемого объекта необходимо выделить несколько базовых элементов, из которых будет состоять модель. В их число входят: две плоскости (неподвижная 1 и подвижная 2), тяги 3 и серводвигатели 4 (см. рис. 1). Поскольку основным управляющим элементом платформы Стюарта являются серводвигатели, которые управляют положением подвижной платформы [4], их реализация в качестве трёхмерной модели будет иметь наибольшее влияние на точность проведения численного эксперимента на имитационной модели. В качестве примера рас-

смотрим существующие серводвигатели DYNAMIXEL AX-12A, внешний вид которых представлен на рис. 2.

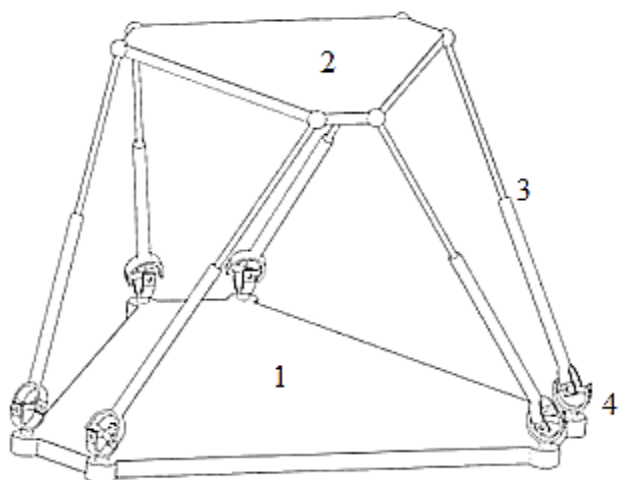


Рис. 1. Обобщённая модель платформы Стюарта



Рис. 2. Внешний вид серводвигателя DYNAMIXEL AX-12A

3D-модель рассматриваемого серводвигателя с учётом его геометрических параметров, представленная на рис. 3, была спроектирована в CAD-системе Компас-3D.

При построении параметрической модели платформы Стюарта необходимо учитывать различные кинематические особенности её элементов для воссоздания условий реального объекта, например шарнирные соединения между подвижной платформой и рычагами, установленными на серводвигателях.

После создания всех основных физических компонентов платформы Стюарта в CAD-системе каждый элемент необходимо импортировать в программу симуляции. При этом необходимо указать массу и плотность каждого компонента модели, а также точно позиционировать их положение в системе координат. Кроме того, элементы должны быть правильно скомпонованы, указаны все возможные соединения между ними с учётом возможных характеристик движения. Итоговая модель с учётом всех особенностей представлена на рис. 4.

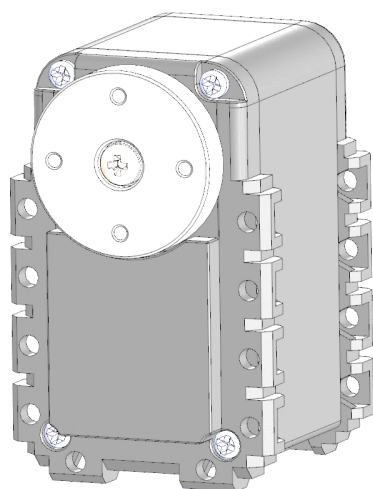


Рис. 3. Трёхмерная модель серводвигателя

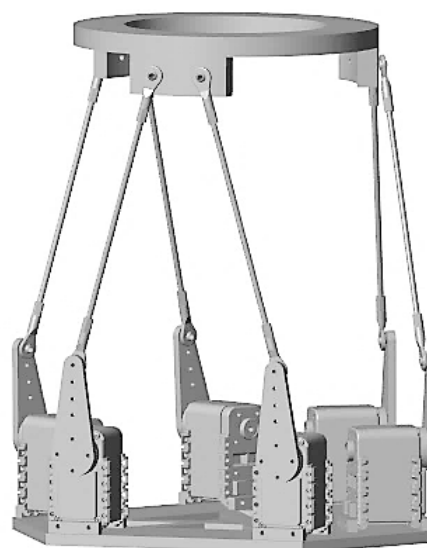


Рис. 4. Визуализация имитационной модели платформы Стюарта

Для проверки работоспособности модели, представленной на рис. 4, необходимо задать ей произвольную траекторию и убедиться, что все соединения и кинематические взаимосвязи обеспечивают реализацию движения по такой заданной траектории. На рис. 5 приведена тестовая имитационная модель, позволяющая изменять положение подвижной части платформы относительно её неподвижной составляющей путём изменения положения валов серводвигателей.

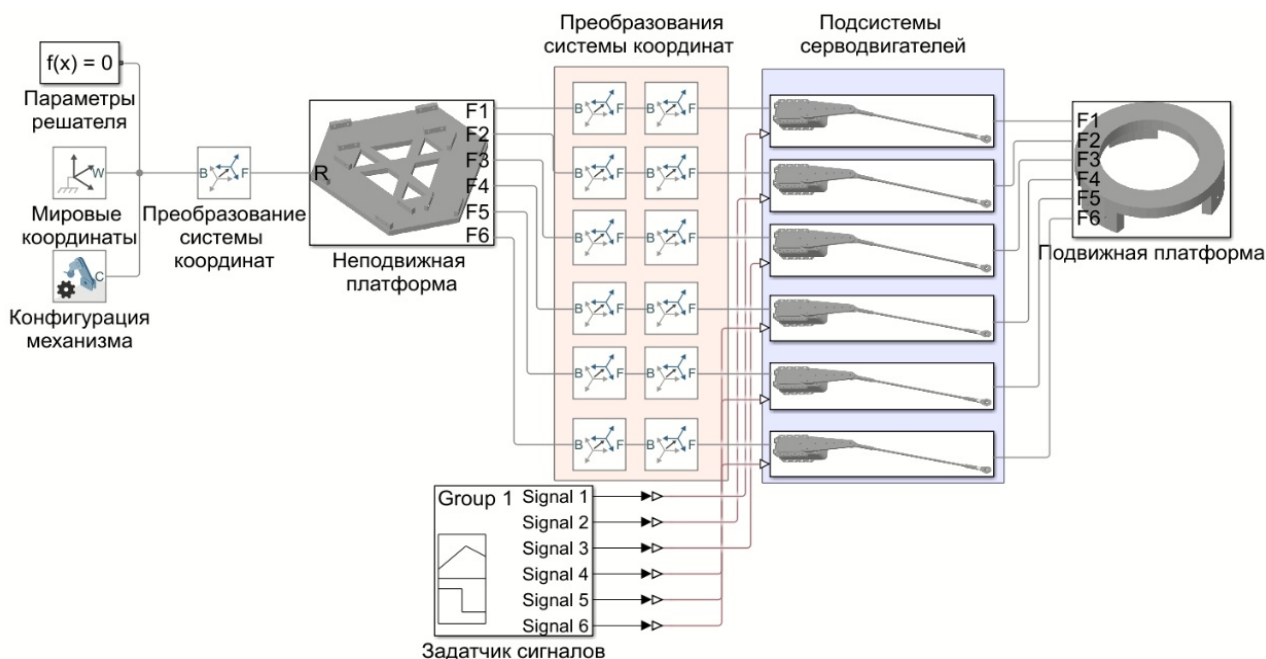


Рис. 5. Имитационная модель платформы Стюарта

На имитационной модели платформы Стюарта, представленной на рис. 5, приведены сгруппированные подсистемы, определяющие кинематику и физические свойства элементов, входящих в состав объекта. Подвижная и неподвижная платформы, а также модели корпусов серводвигателей, валов, плеч и опорных тяг представляют собой твёрдые тела, объединяющие в своём составе такие параметры, как геометрическая форма, масса, инерция, а также параметры системы координат. Звено «Мировые координаты» даёт возможность изменения начальных значений ортогональной системы координат, являющейся основным параметром для размещения трёхмерного объекта. В блоке «Параметры решателя» задаётся метод приближённого вычисления для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих проектируемый объект. Звено «Конфигурация механизма» содержит набор основных физических законов, позволяющих формализовать поведение части платформы Стюарта в пространстве. Каждое звено «Преобразование системы координат» позволяет задать однородную матрицу для преобразования одной системы координат в другую для последовательно соединённых звеньев с целью задания движения объекта в целом. Для интерпретирования сигналов управления в описанной системе регулирования используется «Задатчик сигналов», позволяющий генерировать набор непрерывных сигналов, которые представляют собой углы поворота серводвигателей (выходные порты блока Signal 1-6).

На рис. 6 изображена подсистема серводвигателя, имеющая в своём составе кинематические взаимосвязи между статической и подвижной частями платформы [6]. Блок «Шарнирное соединение» имитирует движение кинематической пары с одной степенью свободы.

Представленный на рис. 6 блок «Сферическое соединение» обеспечивает три степени свободы между кинематической парой и может задавать произвольное трёхмерное вращение по отношению к опорному механизму.

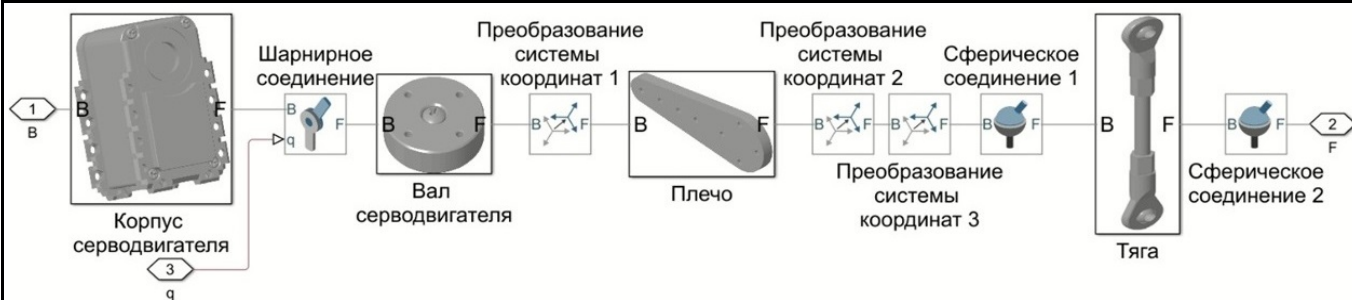


Рис. 6. Модель подсистемы серводвигателей

Для проверки работоспособности системы в качестве задающего сигнала отклонения вала каждого из серводвигателей была установлена произвольная трапецевидная форма управляющего сигнала (см. рис. 7).

На рис. 7 показаны задающие сигналы управления серводвигателями, которые должны работать попарно с заданной очередностью, на каждую точку подвижной опоры, наклоняя и возвращая её положение в исходную позицию. Сигналы управления чётными серводвигателями (2, 4, 6) имеют отрицательное значение, что определяет поворот вала в противоположном направлении, отличном от нечётных серводвигателей (1, 3, 5).

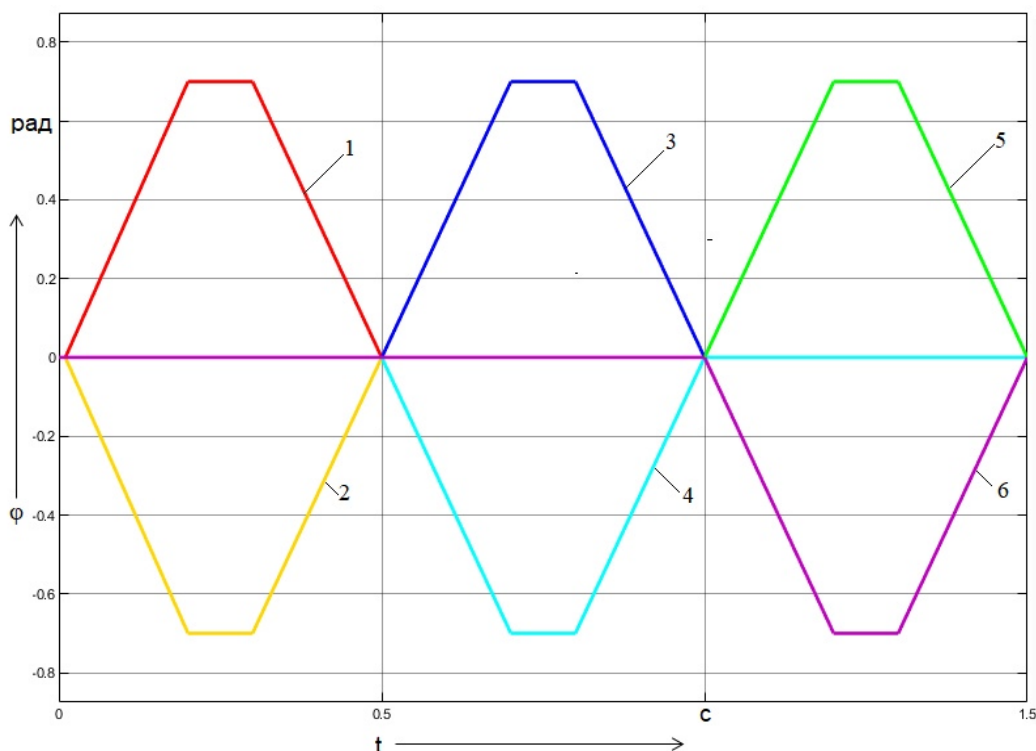


Рис. 7. Задающие сигналы управления серводвигателями

На рис. 8 представлена реакция системы на подачу задающего воздействия в виде набора сигналов трапецевидной формы.

Как видно из рис. 8, переходные процессы исполнительных устройств отличаются от задающих сигналов управления серводвигателями плавностью протекания процессов, что обусловлено физическими свойствами объекта управления и нелинейностью протекающих процессов [5].

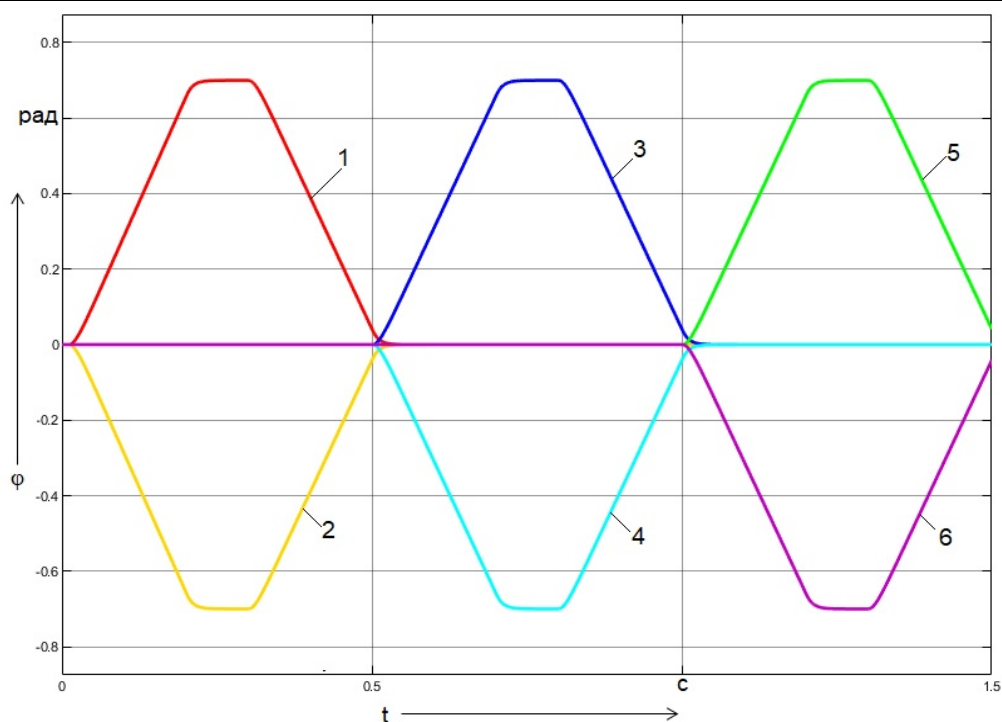


Рис. 8. Переходные процессы изменения положения серводвигателей

На рис. 9 представлены результаты моделирования платформы Стюарта с использованием CAD-системы, которая иллюстрирует отклонение рабочей зоны подвижной части платформы от исходного положения.

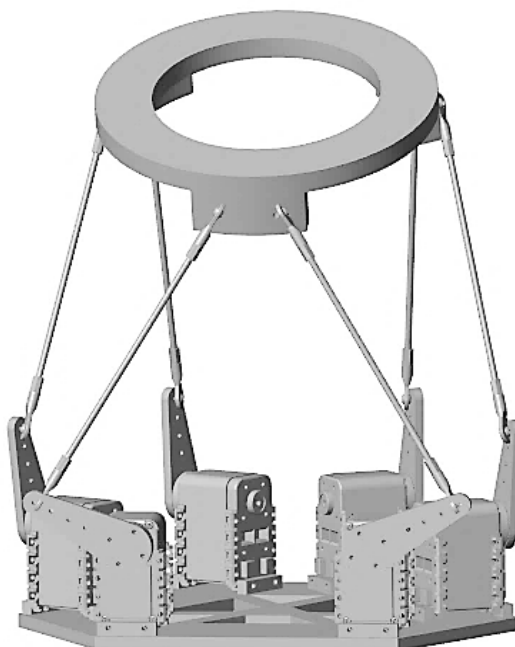


Рис. 9. Визуализация позиционирования платформы Стюарта с произвольным наклоном

Заключение. Визуализация объекта в имитационной модели является важным инструментом для анализа и синтеза системы управления, которая обеспечивает более точное описание не только процессов регулирования, но и физических свойств, что позволяет существенно миними-



зировать ряд ограничений и допущений при описании объекта регулирования. Кроме того, использование трёхмерной модели позволяет проводить эксперименты и исследования, которые могут быть невозможны на реальных объектах из-за их высокой стоимости или опасности.

В данном примере с параллельным манипулятором была рассмотрена имитационная модель объекта без расчёта и настройки системы управления, которые необходимы в дальнейшем для описания поведения объекта управления. К таким расчётам можно отнести определение параметров серводвигателей, компенсацию сопутствующих нелинейных элементов, математический расчёт обратной задачи кинематики для нахождения углов поворота сервоприводов и другие расчёты. В примере использованы упрощённые элементы. Пример демонстрирует интеграцию в имитационную модель объекта с заданными геометрическими параметрами и физическими свойствами, что даёт возможность наглядно судить о работоспособности системы и адекватности её поведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorkavyy A. I., Gorkavyy M. A., Melnichenko M. A., Berkh A. V. Improving the Functioning of the Cybernetic Control System of the Mechatronic Module of the Robotic Complex // Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. Vol. 228, p. 702, 2021.
2. Слоущ, А. В. Об управлении движением пространственной платформы с несколькими степенями подвижности / А. В. Слоущ, Х. М. Альван // Теория механизмов и машин. – 2003. – Т. 1. – № 1 (1). – С. 63-69.
3. Цифровые технологии обучения на симуляторах / К. С. Шоланов, В. С. Ешпанов, Ж. С. Артыкбаев, М. В. Сарсембай // Педагогика, психология, общество: актуальные вопросы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Чебоксары: Издательский дом «Среда», 2020. – С. 156-160.
4. Турлапов, В. Е. Анализ положений платформ Стюарта, основанный на варианте структуры, разрешимом в радикалах / В. Е. Турлапов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2005. – № 1 (6). – С. 54-59.
5. Савельев, Д. О. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления / Д. О. Савельев, С. П. Черный, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 3. – С. 213-221.
6. Лапиков, А. Л. Решение прямой задачи кинематики для платформы Гью Стюарта с использованием аналитического уравнения плоскости / А. Л. Лапиков, В. Н. Пашенко // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 4. – С. 124-134.

Черный С. П., Муравьев Е. М., Иванов Д. Р.
S. P. Cherniy, E. M. Muraviev, D. R. Ivanov

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГОРОДСКОГО ТРАФИКА

SIMULATION OF A FUZZY URBAN TRAFFIC CONTROL SYSTEM

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keapu@knastu.ru.

Sergej P. Cherniy – PhD in in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keapu@knastu.ru.

Муравьев Евгений Максимович – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Evgenij M. Muraviev – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Иванов Данила Романович – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Danila R. Ivanov – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. В представленной работе проведён анализ существующих систем управления регулированием городского трафика с применением оценки движущихся объектов по основным направлениям движения и учётом выделенного интервала для перемещения пешеходов. Представленные зависимости загруженности перекрёстка получены со средств визуального наблюдения, штатно установленных для контроля дорожной обстановки в городских условиях, и учитывают различные категории транспортных средств и особенности их передвижения. На основе средств дискретно-событийного моделирования и результатов визуального наблюдения получена имитационная модель классической системы управления. Выявлены недостатки использования классической схемы регулирования, которая не позволяет учитывать целый ряд параметров, связанных с недетерминированными изменениями в городском трафике. Для снижения влияния возмущающих факторов и увеличения пропускной способности в работе предложена интеллектуальная система регулирования фаз переключения светофоров перекрёстка, учитывающая количество и особенности перемещения различных участников дорожного движения. Приведены сравнительные характеристики при регулировании фаз работы светофора для классической и интеллектуальной систем управления, показаны достоинства нечёткой системы управления регулированием городского трафика при её сравнении с классическим аналогом, а также представлены возможности таких систем для дальнейшего гибкого расширения и распространения в условиях взаимного влияния перекрёстков друг на друга.

Summary. In the presented work, an analysis of existing control systems for regulating urban traffic is carried out using the assessment of moving objects in the main directions of movement and taking into account the allocated interval for the movement of pedestrians. The presented dependencies on the congestion of the intersection are obtained from the means of visual observation, which are normally installed to monitor the road situation in urban conditions and take into account various categories of vehicles and features of their movement. Based on the means of discrete event modeling and the results of visual observation, a simulation model of a classical control system is obtained. The disadvantages of using the classical regulation scheme are revealed, which does not allow taking into account a number of parameters associated with non-deterministic changes in urban traffic. To reduce the influence of disturbing factors and increase throughput, an intelligent system for regulating the switching phases of intersection traffic lights is proposed, taking into account the number and features of movement of various road users. Comparative characteristics are given when regulating the phases of traffic light operation for classical and intelligent control systems, the advantages of a fuzzy control system for regulating urban traffic when compared with its classical counterpart are shown, and the possibilities of such systems for further flexible expansion and distribution in conditions of mutual influence of intersections on each other are presented.



Ключевые слова: нечёткий логический регулятор, нечёткое множество, лингвистическая переменная, интеллектуальная система управления, контроль городского трафика.

Key words: fuzzy logic controller, fuzzy set, linguistic variable, intelligent control system, urban traffic control.

УДК 681.5.01:658.5

Введение. В современном мире автоматизированные системы управления встраиваются в различные технологические процессы и сферы деятельности человека. При этом с расширением алгоритмических и вычислительных возможностей для построения систем управления не только расширяются области их применения, но и увеличивается сложность технологических объектов и процессов. Одной из таких сфер является управление транспортными потоками в условиях изменяющегося городского трафика. Существующие алгоритмы управления светофорами не позволяют оптимизировать время проезда перекрёстков из-за возникновения заторов с одной из сторон дороги. Традиционная система управления светофорами работает по заранее заданному расписанию или в режиме, основанном на сенсорных устройствах, таких как петлевые детекторы, встроенные в дорожное покрытие. Однако эти системы не могут адаптироваться к изменяющимся условиям дорожного движения в режиме реального времени.

Регулирование дорожного трафика в условиях растущего количества транспортных средств на сегодняшний момент становится проблемой не только крупных мегаполисов [2; 7]. Разгрузка дорожной сети чаще всего решается либо стандартными методиками регулирования по алгоритму «зелёной волны», либо строительством систем развязок и путепроводов. Эффективность первого подхода зачастую существенно снижается с увеличением количества транспортных средств и отсутствием возможности динамической вариации временных интервалов. Второй способ ограничен как техническими, так и экономическими возможностями. Применение различных методик интеллектуального управления технологическими процессами позволяет реализовывать желаемые законы управления для объектов практически любой сложности, функционирующих в условиях неполноты информации и существенного количества недетерминированных воздействий [4–6]. Проблема переключения фаз светофорного регулирования в условиях различной загруженности направлений различными транспортными средствами (ТС) в условиях растущего городского трафика с применением нечёткого управления представляет собой актуальную задачу.

Модели и методы. Для реализации классических способов светофорного регулирования необходимо управлять движением потоков ТС на основе дискретно-событийного моделирования [8–10]. Переключение фаз системы регулирования городского трафика производится на основе заранее определённого планового графика и представляет собой набор строго фиксированных интервалов времени. На рис. 1 представлена имитационная модель перекрёстка, реализованная в среде MATLAB, которая отражает процесс движения ТС, а также позволяет локально на основе подходов дискретно-событийного моделирования оценивать очередность поступления и движения объектов в различные интервалы времени. Визуально модель, представленную на рис. 1, можно разделить на 4 части, соответствующие направлениям движения со всех сторон перекрёстка. Основные фрагменты (см. рис. 2) соединены между собой перекрёстными связями, которые определяют взаимное влияние транспортных потоков на каждое из направлений.

Основными блоками структурной схемы являются:

- подсистемы формирования потоков пешеходов в двух направлениях с определением скорости перемещения одиночного объекта;
- подсистема формирования входящего потока транспортных средств, позволяющая определять типы транспортных средств по габаритам и скорости движения;
- блок формирования взаимного влияния потоков транспортных средств с других направлений перекрёстка.

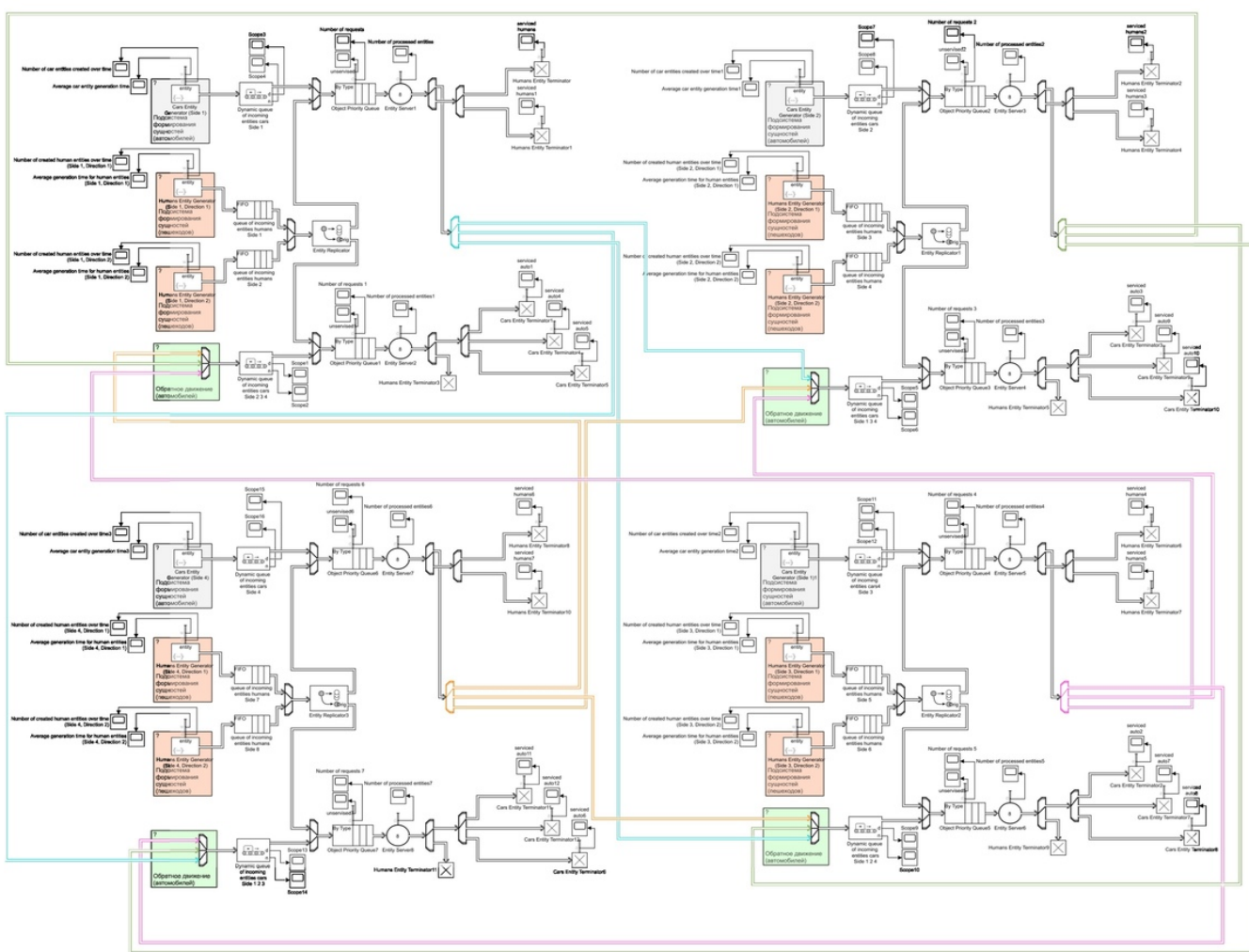


Рис. 1. Имитационная модель с классической системой регулирования перекрёстком с пешеходным переходом

Соединение основных функциональных блоков выполняется посредством звеньев, формирующих очерёдность прохождения каждой единицы общего трафика движения по всем направлениям. Переключение фаз светофорного регулирования реализовано набором переключателей с соответствующими настройками временных интервалов, заранее определённых схемой регулирования.

На рис. 3 представлены графики, демонстрирующие загруженность проезжей части по направлениям движения на перекрёстке при классической схеме регулирования за один час. На каждом из графиков отражена взаимосвязь количества транспортных средств, ожидающих проезд в определённый временной интервал, которая соответствует одному из четырёх направлений движения через перекрёсток. Контроль входной выборки системы осуществляется стандартными методами на основе системы видеонаблюдения перекрёстка, используемой для фиксации нарушений правил дорожного движения и алгоритмов распознавания образов.

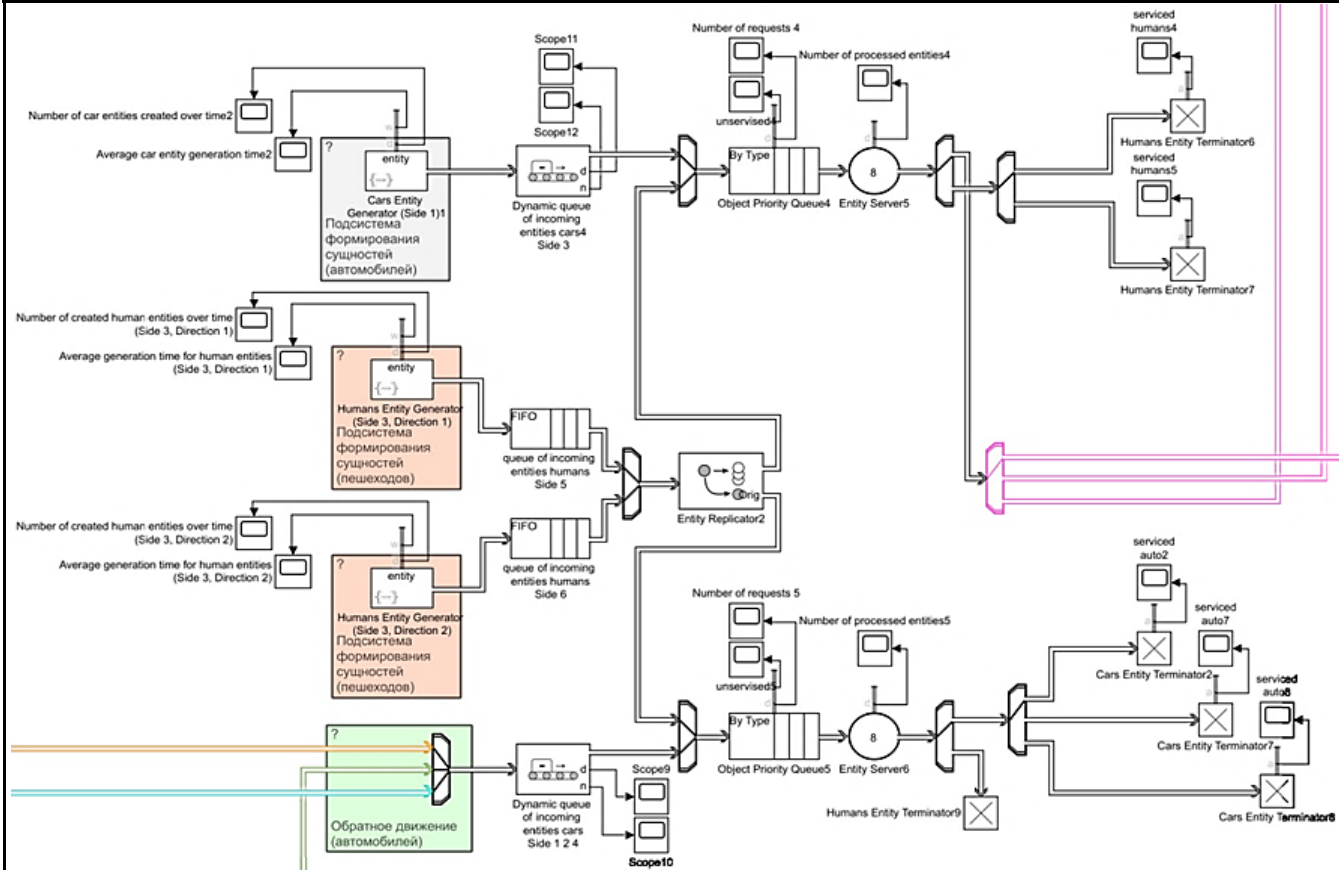


Рис. 2. Фрагмент модели перекрёстка по одному из направлений

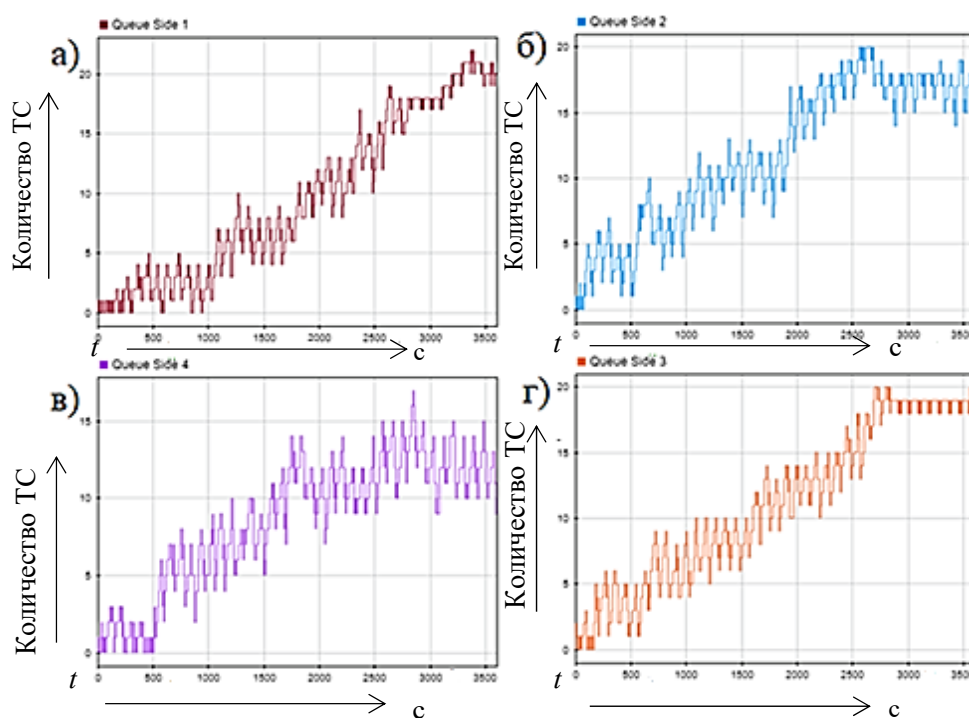


Рис. 3. Графики загрузки по направлениям при классической схеме регулирования

Из графиков, приведённых на рис. 3, видно, что количество ТС в каждом переходном процессе увеличивается до определённого количества, практически выходящего за предел видимости системы идентификации. Это соответствует низкой пропускной способности системы при имеющейся нагрузке ТС на транспортную сеть в час пик, тем самым создаются пробки на проезжей части.

Такая система с классическим управлением показывает стабильность работы в условиях малой плотности населения в регионе либо низкой нагрузки на дорожную сеть. В прочих случаях, когда условия, приведённые выше, не соблюдены, система с использованием классического принципа управления продолжает свою работу в стабильном состоянии, но количество ТС, находящихся непосредственно перед перекрёстком и подъезжающих к нему, создаёт пробку большой протяжённости.

Для улучшения показателей управления светофорным регулированием необходимо применение адаптивных систем управления. Так, например, интеллектуальная система управления светофорами может использовать различные источники данных, такие как видеорекамеры, датчики движения, информацию о трафике и даже данные смартфонов водителей. Алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта могут анализировать эти данные и принимать решения о регулировании светофоров в режиме реального времени. На рис. 4 представлена структурная схема одного из возможных вариантов построения интеллектуальной системы регулирования с применением нечёткого логического регулятора.

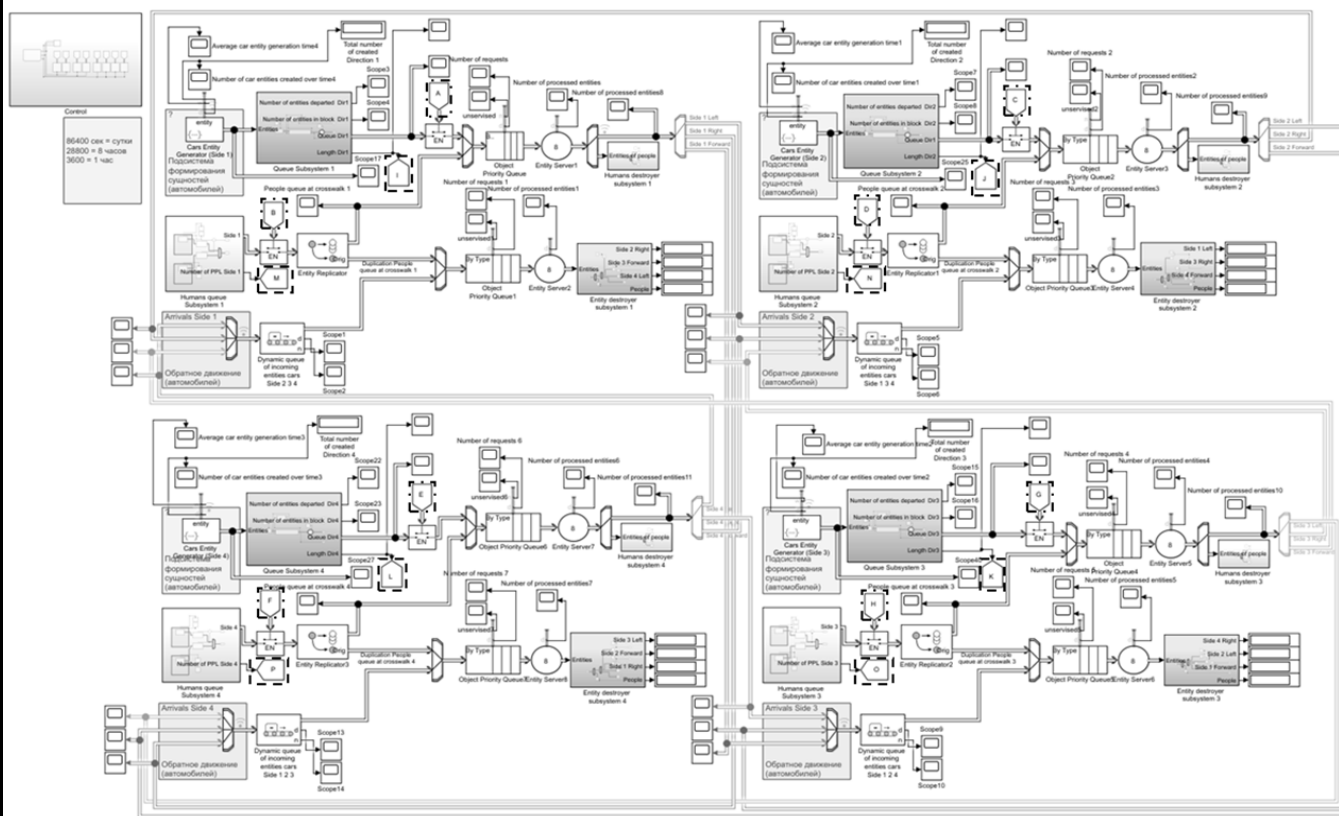


Рис. 4. Имитационная модель с интеллектуальной системой регулирования перекрёстка с пешеходным переходом

Внедрение нечёткого логического регулятора в систему (см. рис. 4) осуществляется путём передачи информации о состоянии основных контролируемых параметров (выделены на модели пунктирной линией), управляющие воздействия помечены, соответственно, штрихпунктирной линией. На рис. 5 представлена функциональная схема нечёткого логического регулятора. Набор пе-

ременных I, J, K, L формализует понятие входных лингвистических переменных «длина очереди ТС» по каждому направлению, в свою очередь, набор переменных M, N, O, P аналогично описывает понятие «количество пешеходов» по каждому направлению. Понятия, формируемые выходными лингвистическими переменными, соответствуют переключению фаз: переменные A, G выполняют смену временного интервала фаз светофора в противоположных направлениях, C, E – аналогично для ТС, движущихся перпендикулярно; переменные B, D, H, F производят изменения фаз светофорного регулирования для соответствующих потоков пешеходов.

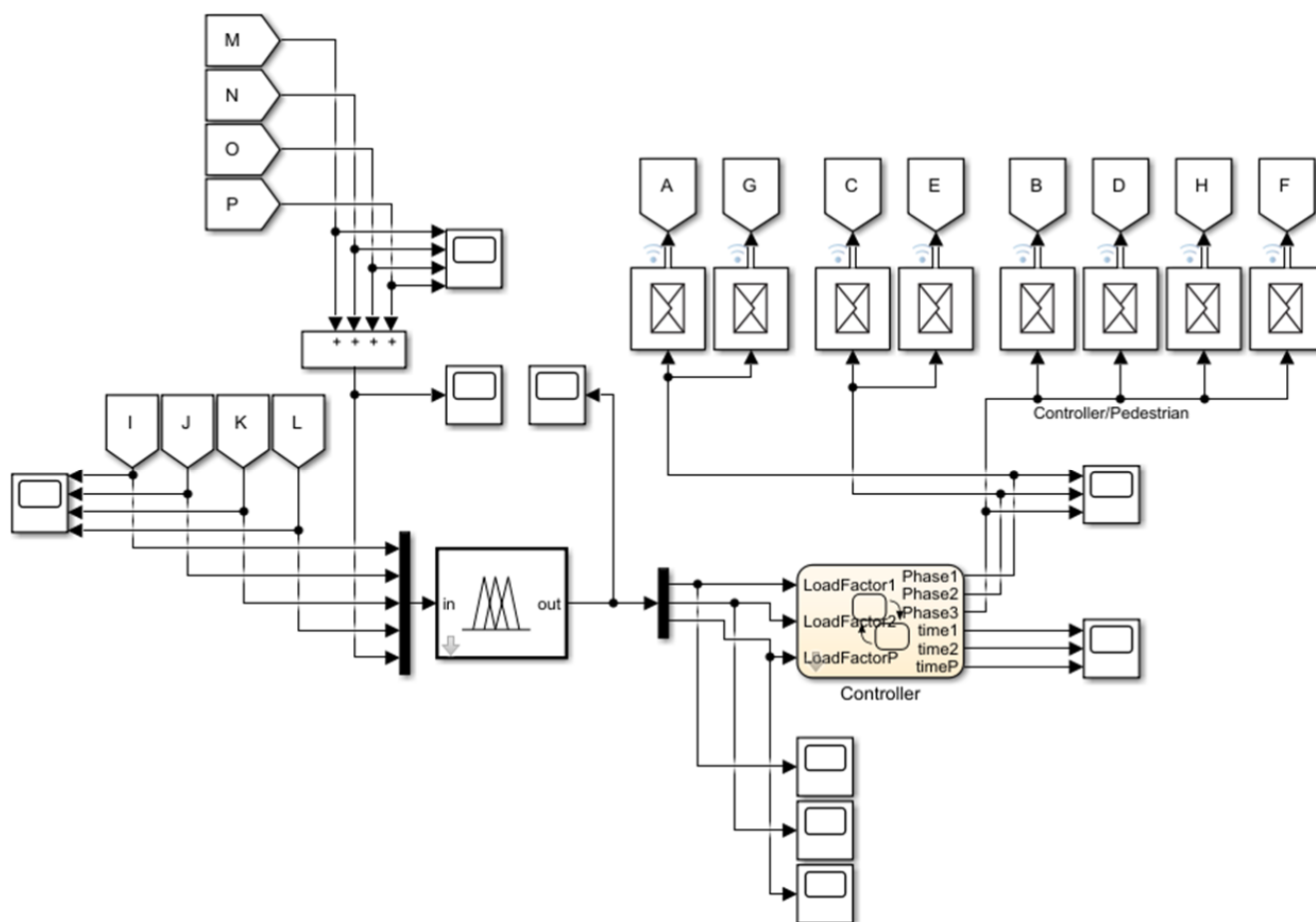


Рис. 5. Функциональная схема нечёткого логического регулятора

Построение интеллектуальной системы управления регулированием такого сложного объекта связано с настройкой нечёткого логического регулятора на основании широко используемых методик [1; 3]. Основной функцией встроенного в данную модель нечёткого логического регулятора является анализ данных о состоянии направлений движения ТС через перекрёсток и скоплениях пешеходов. Пять входных лингвистических переменных формализует информацию о состоянии загруженности различных направлений движения и количестве ожидающих проход пешеходов. Каждая лингвистическая переменная описывается перечнем из трёх термов вида [high; medium; low] с набором из z - и s -образных функций принадлежности на краях области определения и треугольной в средней части этого диапазона. Выходными параметрами регулятора являются сигналы весовых коэффициентов, которые используются для формирования управляющих воздействий, варьирующих длительность фаз, и содержат аналогичный набор термов и три функции принадлежности треугольной формы. База знаний нечёткого логического регулятора содержит перечень из 21 правила продукций.

Фрагмент продукционной базы правил имеет следующий вид:

1. *If (Direction1 is high) and (Direction3 is high) then (TrafficControl1 is high);*
2. *If (Direction2 is low) and (Direction4 is low) then (TrafficControl2 is low);*
3. *If (PPL is average) then (TrafficControl3 is medium);*

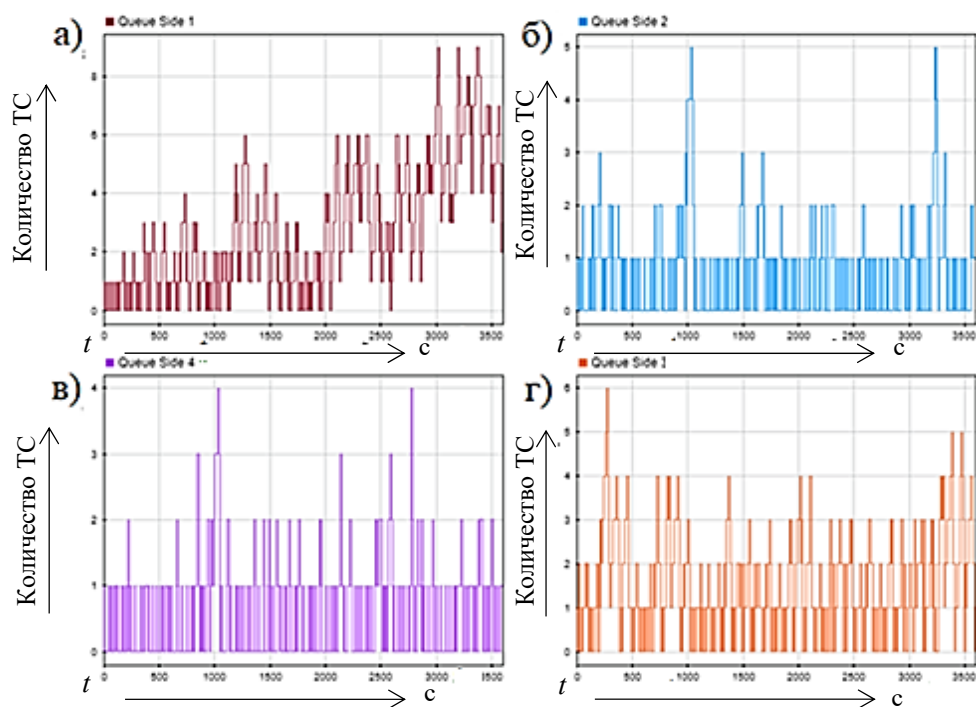
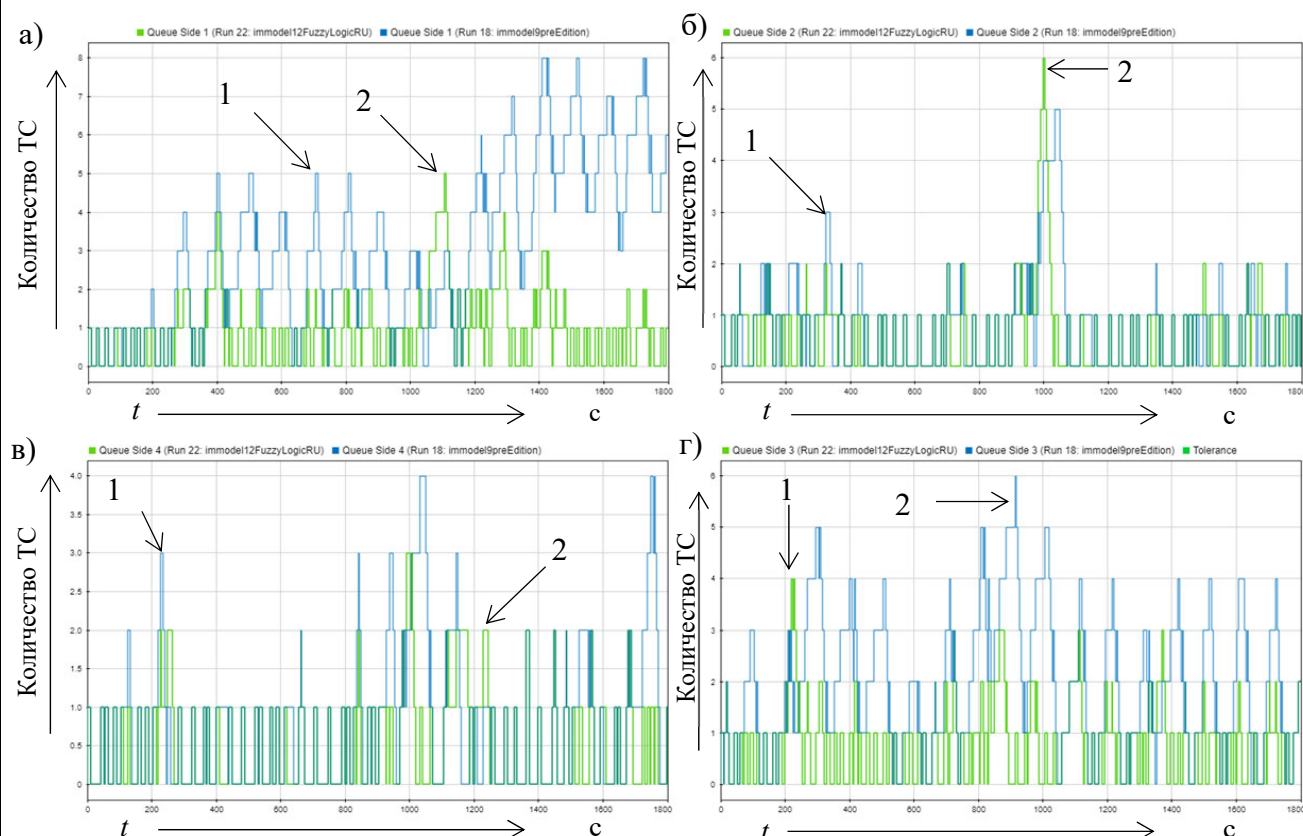


Рис. 6. Графики загрузки перекрёстка по направлениям при интеллектуальном управлении

Анализируя результаты моделирования (см. рис. 6), отображающего графики загрузки перекрёстка по направлениям при использовании трёхфазной схемы регулирования дорожного трафика, можно увидеть, что с учётом равных условий генерации объектов количество ТС по направлениям при применении нечёткого логического регулятора значительно снизилось по сравнению с использованием алгоритмов классического светофорного регулирования. Анализ загрузки перекрёстков с различной реализацией алгоритмов управления представлен на рис. 7.

На рис. 7 представлены графики сравнения пропускной способности перекрёстка при классическом и интеллектуальном управлении. Исходя из сравнительной характеристики видно, что при учёте равных условий генерации объектов система с использованием интеллектуального подхода позволяет оптимизировать пропускную способность перекрёстка.



1 – система с классическим регулированием; 2 – система с интеллектуальным управлением

Рис. 7. Графики сравнения пропускной способности перекрёстка при классическом и интеллектуальном управлении

Закключение. Таким образом, настройка нечёткой системы управления под параметры конкретного объекта и использование экспертной системы анализа данных позволяют применять интеллектуальное управление светофорными системами с целью оптимизации трафика и повышения эффективности дорожного движения. Использование интеллектуальных алгоритмов при организации системы управления позволяет адаптировать регулирование светофоров и гибко варьировать трафик на перекрёстках в реальном масштабе времени с учётом актуальных данных о загруженности и потоке пешеходов. Рассмотренная система управления, реализованная на основе нечёткого логического регулятора, способствует более эффективному распределению пропускной способности и снижению загруженности транспортной сети, что может иметь положительное влияние на поток транспорта и безопасность движения.

Предложенный подход в дальнейшем может быть эффективным при разработке распределённой системы управления транспортной сетью города, особенно в местах повышенной плотности трафика. Применение такой системы управления на перекрёстках обеспечит более эффективную организацию движения транспортных потоков, а также увеличит общую пропускную способность дорожной сети. Дальнейшее развитие предложенного подхода может быть направлено на расширение количества смежных перекрёстков под управлением нечётких систем и их интеграцию в единую интеллектуальную систему, построенную по иерархическому принципу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.

2. Xiaokan Wang, Qiong Wang Fuzzy control strategy for a compound energy system for an urban rail train based on the required power // Measurement. 2020. № 163. 107888.
3. Cherny S. P., Savelyev D. O., Savelyeva A. S., Bazhenov R. I., Povkh I. V. Simulation of a discrete event system for process control of robotic casting // Journal of Physics: Conference Series. Сер. «International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021» 2021. p. 012080.
4. Черный, С. П. Разработка интеллектуальной системы управления электроприводом якорной лебёдки / С. П. Черный, А. В. Бузикаева, А. К. Тимофеев // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4-1 (54). – С. 195-200.
5. V. A. Soloviev, N. E. Deryuzhkova, and V. V. Teterin, «Fuzzy control in the control system of positional electric drives of a rod installation», Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region, 2019. № 5. P. 77-80.
6. Стабилизация напряжения статическим тиристорным компенсатором с нечётким регулятором в системе с переменной нагрузкой / А. В. Купова, В. А. Соловьев, А. А. Светлаков, В. А. Челухин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII (55). – С. 48-57.
7. Seyed Mohammad Mehdi Abbasi, Aliakbar Jalali Fuzzy tracking control of fuzzy linear dynamical systems // ISA Transactions 97. 2020. P. 102-115.
8. Popova V. S., Soloviev V. A. Applying computational algorithms to determine the probabilistic range of fuzzy identifier membership functions for the ice prediction module // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. P. 9271189.
9. Jiage Huoa, Felix T.S. Chana, Carman K.M. Leea, Jan Ola Strandhagenb, Ben Niuc Smart control of the assembly process with a fuzzy control system in the context of Industry 4.0 // Advanced Engineering Informatics. 2020. № 43. P. 101031.
10. Исследование особенностей применения метода функциональной декомпозиции при разработке имитационных моделей цифрового двойника роботизированного процесса / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III (59). – С. 27-34.



Носков С. И., Чекалова А. Р.
S. I. Noskov, A. R. Chekalova

МИНИМИЗАЦИЯ РАССТОЯНИЯ МОДУЛЕЙ ОШИБОК АППРОКСИМАЦИИ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДО ИХ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ

MINIMIZATION OF THE DISTANCE OF REGRESSION MODEL APPROXIMATION ERROR MODULES TO THEIR MEAN VALUE

Носков Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); Россия, 664074, ул. Чернышевского, д. 15; тел. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Sergey I. Noskov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Information Systems and Information Protection Department, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk); Russia, 664074, st. Chernyshevsky, 15; tel. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Чекалова Александра Романовна – магистрант Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); Россия, 664074, ул. Чернышевского, д. 15; тел. 8(924)531-25-18. E-mail: chekalova49@gmail.com.

Aleksandra R. Chekalova – Master's Degree Student, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk); Russia, 664074, st. Chernyshevsky, 15; tel. 8(924)531-25-18. E-mail: chekalova49@gmail.com.

Аннотация. В работе описан алгоритмический способ уточнения оценок параметров линейного регрессионного уравнения, идентифицированных с помощью метода наименьших модулей, основанный на выравнивании модулей ошибок аппроксимации по отношению к их среднему значению. Сформулированная задача сводится к задаче линейного программирования приемлемой для практических ситуаций размерности. Разработана модель линейного тренда для описания динамики числа пользователей сети Интернет в мире методами наименьших квадратов и модулей, а также с использованием данного способа. Все три варианта трендовой модели обладают высоким качеством, на что указывают значения используемых критериев адекватности: множественной детерминации, Фишера, суммы модулей ошибок аппроксимации и их среднего значения.

Summary. The paper describes an algorithmic way to refine estimates of the parameters of a linear regression equation identified using the method of least modules, based on the alignment of the modules of approximation errors with respect to their average value. The formulated problem is reduced to a linear programming problem of a dimension acceptable for practical situations. A linear trend model has been developed to describe the dynamics of the number of Internet users in the world using least squares and modules methods, as well as using this method. All three variants of the trend model are of high quality, as indicated by the values of the adequacy criteria used: multiple determination, Fisher, the sum of the modules of approximation errors and their average value.

Ключевые слова: регрессионная модель, методы наименьших квадратов и модулей, ошибки аппроксимации, задача линейного программирования, тренд, число пользователей сети Интернет.

Key words: regression model, least squares and modulus methods, approximation errors, linear programming problem, trend, number of Internet users.

УДК 330.4

Введение. Рассмотрим проблему оценивания неизвестных параметров линейного регрессионного уравнения (модели) [1]:

$$y_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y , x_i – соответственно зависимая и i -я независимая переменные; α_i – i -й определяемый параметр; ε_k – ошибки аппроксимации; k – номер наблюдения; n – число наблюдений. Будем считать все переменные модели (1) детерминированными.

Уравнение (1) можно представить в векторной форме:

$$y = X\alpha + \varepsilon = \hat{y} + \varepsilon,$$

где $y = (y_1, \dots, y_n)^T$; $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)^T$; $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T$; $X = (n \times m)$ – матрица с элементами x_{ki} ; $\hat{y} = X\alpha$ – вектор расчётных значений зависимой переменной.

В регрессионном анализе при идентификации параметров модели (1) широко применяется метод наименьших модулей (МНМ), состоящий в минимизации городского (манхэттенского) расстояния $\rho(y, \hat{y})$ между фактическими (заданными) и расчётными значениями зависимой переменной, сводящийся к решению задачи

$$J(\alpha) = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k| \rightarrow \min. \quad (2)$$

Так, в работе [2] предлагаются средства построения модели нечёткой регрессии и исследуется её эффективность по отношению к определённой мере ошибки. Имитационные исследования и примеры показывают, что оценивание параметров модели с помощью МНМ даёт меньшую ошибку, чем модель нечёткой регрессии, изученная многими авторами, которые используют метод наименьших квадратов, когда данные содержат нечёткие выбросы. В [3] рассматривается задача формирования физических прототипов на основе трёхмерных моделей проектирования с использованием аддитивного процесса со слоями. При этом анализируется эффект лестницы между двумя последовательными слоями, а затем выводится формула прямого расчёта отклонения объёма всей модели. Вводится термин «взвешенная нормаль по площади», чтобы выразить значительное влияние площади фасета на объёмную ошибку, а задача определения оптимальной ориентации преобразуется в задачу построения линейной регрессии на основе применения МНМ. Статья [4] посвящена новому общему подходу к построению модели нечёткой регрессии, когда выходная переменная и параметры модели представляют собой нечёткие числа. При этом вводится новое определение целевой функции, основанное на различных функциях потерь. Применение предложенного подхода изучается с использованием смоделированного набора данных и некоторых реальных наборов при наличии различных типов выбросов, для обработки которых особенно эффективен МНМ. В работе [5] МНМ используется при исследовании вопроса формирования режима подзарядки группы автономных рабочих роботов в их рабочей среде с помощью регрессионных моделей. В [6] разрабатывается единый метод дисперсионного анализа на основе городского расстояния для проверки линейных гипотез. Как и классический дисперсионный анализ, этот метод является бескоординатным в том смысле, что он инвариантен при любом линейном преобразовании ковариат или параметров регрессии. Более того, он допускает использование единственных матриц проектирования и неоднородных ошибок. Предлагается простая аппроксимация с использованием стохастических возмущений для получения пороговых значений результирующей статистики испытаний. В статье [7] изучаются неточные данные с точки зрения не вполне определённых переменных и предлагается новый надёжный подход в соответствии с принципом наименьших модулей для оценки неизвестных параметров в неопределённых регрессионных моделях. Исследование [8] посвящено способам подавления влияния выбросов на параметры модели. Предлагается робастная регрессия опорного вектора на основе применения МНМ. Кроме того, для решения задачи оптимизации представлен эффективный алгоритм, основанный на методе разделения Брегмана. В [9] изучаются асимптотические свойства МНМ-оценок для моделей нелинейной регрессии. Даны простые достаточные условия сильной состоятельности и асимптотической нормальности оценок. Подтверждено, что распространение этих свойств на широкий класс функций регрессии можно установить, наложив некоторое условие на входные значения. Предлагается доверительная область, основанная на МНМ-оценках, и обсуждаются некоторые желательные

асимптотические свойства, включая асимптотическую относительную эффективность для различных распределений ошибок. В работе [10] рассматривается единая МНМ-оценка для стационарных и нестационарных дробно-интегрированных моделей авторегрессии скользящего среднего с условной гетероскедастичностью. Эксперименты подтверждают сделанные выводы, а результаты абсолютной доходности дневной цены закрытия промышленного индекса Доу-Джонса демонстрируют их полезность при моделировании временных рядов, учитывающих особенности долгой памяти, условной гетероскедастичности и тяжёлых хвостов.

Приближение модулей ошибок аппроксимации регрессионной модели к их среднему значению. Задача (2) сводится к следующей задаче линейного программирования (ЛП) (см., например, [11–13]):

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$u_k \geq 0, \quad v_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$J(\alpha) = \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $u_k - v_k = \varepsilon_k$; $u_k + v_k = |\varepsilon_k|$. При этом после решения задачи ЛП (3) – (5) $u_k v_k = 0, k = \overline{1, n}$.

Одной из характеристик адекватности модели (1) является средняя абсолютная ошибка аппроксимации E :

$$E = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k| / n.$$

Важным свойством МНМ является равенство нулю m ошибок аппроксимации (см., например, [14]). Вызывает интерес задача выравнивания их абсолютных значений, «подтягивания» их к среднему значению E без существенного увеличения оптимального значения целевой функции (5). Сформулируем эту задачу формально.

Пусть J^* – оптимальное значение целевой функции в задаче ЛП (3) – (5). Обозначим через $\Delta J > 0$ величину, на которую исследователь может допустить некоторое увеличение значения J^* с тем, чтобы несколько приблизить модули ошибок аппроксимации к их среднему значению.

Сформируем множество $D(\alpha)$:

$$D(\alpha) = \{\alpha \in R^m \mid J(\alpha) \leq J^* + \Delta J\}.$$

Тогда указанная задача примет следующий формальный вид:

$$\min_{\alpha \in D(\alpha)} \sum_{k=1}^n ||\varepsilon_k| - \sum_{j=1}^n |\varepsilon_j| / n|. \quad (6)$$

Задача (6), так же как и (2), может быть сведена к задаче ЛП. Действительно, дополним ограничения (3), (4) следующими:

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \leq J^* + \Delta J, \quad (7)$$

$$u_k + v_k + c_k - d_k = \sum_{j=1}^n \frac{(u_j + v_j)}{n}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$c_k \geq 0, \quad d_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Целевая функция примет вид

$$h \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + \sum_{k=1}^n (c_k + d_k) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где h – малая положительная константа.

Применим данный способ выравнивания ошибок к линейному тренду, описывающему динамику числа пользователей сети Интернет в мире в миллионах человек (зависимая переменная y). В табл. 1 представлена статистика по этому показателю за 2003-2022 гг. [15; 16].

Таблица 1

Исходные данные

Год	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
y	668	784	917	1040	1166	1383	1578	1763	1990	2177
Год	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
y	2431	2692	2916	3282	3640	3950	4212	4418	4758	5385

Таким образом, будем строить линейную регрессионную модель:

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 t + \varepsilon_t, \quad t = \overline{1, 20}. \quad (11)$$

Вначале оценим параметры тренда (11) с помощью метода наименьших квадратов (МНК):

$$y_t = 16 + 242 t + \varepsilon_t, \quad t = \overline{1, 20}, \quad (12)$$

$$R = 0,98, F = 732,9, E = 178,3, J = 3566,48,$$

где R – критерий множественной детерминации, F – критерий Фишера. Значения критериев адекватности указывают на высокое качество модели (12).

Теперь оценим параметры модели (11) с помощью МНМ:

$$y_t = -71 + 247,4 t + \varepsilon_t, \quad t = \overline{1, 20}, \quad (13)$$

где $E = 172,3, J = 3446$.

Значения критериев R и F здесь не приведены, т. к. их использование для МНМ не является корректным.

Сумма ошибок аппроксимации J для модели (13) меньше на 120,48 (т. е. на 3,4 %), чем для модели (12). Поэтому назначим:

$$\Delta J = 120,48.$$

Наконец, оценим параметры модели (11) описанным выше способом путём решения задачи ЛП (3), (4), (7) – (10):

$$y_t = -4 + 241,4 t + \varepsilon_t, \quad t = \overline{1, 20}, \quad (14)$$

$$E = 172,3, J = 3566,48.$$

Вполне ожидаемо, значения E и J моделей (12) и (14) совпадают. Вместе с тем значение свободного члена α_0 в модели (14) меньше, чем для модели (12), но больше, чем для модели (13). А вот значение углового коэффициента α_1 в модели (14) наименьшее из всех трёх моделей.

Окончательное решение по поводу того, какую именно модель из трёх построенных использовать, должен принять исследователь в зависимости от характера решаемой прогнозной и/или аналитической задачи, а также от своих индивидуальных опыта и предпочтений.

Заключение. В работе предложен способ уточнения значений параметров линейной регрессионной модели, вычисленных с помощью метода наименьших модулей, основанный на приближении модулей ошибок аппроксимации к их среднему значению. Соответствующая задача сводится к задаче линейного программирования. Построена модель линейного тренда для описа-



ния динамики числа пользователей сети Интернет в мире методами наименьших квадратов и модулей, а также с использованием данного способа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носков, С. И. Применение многокритериального метода наименьших модулей для моделирования количества дорожно-транспортных происшествий / С. И. Носков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 30-35.
2. Seung Hoe Choi, Buckley J. J. Fuzzy regression using least absolute deviation estimators // Soft Computing. – 2008. – V. 12. – P. 257-263.
3. Nan Luo, Quan Wang. Fast slicing orientation determining and optimizing algorithm for least volumetric error in rapid prototyping // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – V. 83. – P. 1297-1313.
4. Khammar A. H., Arefi M., Akbari M. G. A general approach to fuzzy regression models based on different loss functions // Soft Computing. – 2021. – V. 25. – P. 835-849.
5. Keshmiri S., Payandeh S. Regression Analysis of Multi-Rendezvous Recharging Route in Multi-Robot Environment // International Journal of Social Robotics. – 2012. – V. 4. – P. 15-27.
6. Kani Chen, Zhiliang Ying, Hong Zhang, Lincheng Zhao. Analysis of least absolute deviation // Biometrika. – 2008. – V. 95. – P. 107-122.
7. Zhe Liu, Ying Yang. Least absolute deviations estimation for uncertain regression with imprecise observations // Fuzzy Optimization and Decision Making. – 2020. – V. 19. – P. 33-52.
8. Chen Chuanfa, Li Yanyan, Yan Changqing, Guo Jinyun, Liu Guolin. Least absolute deviation-based robust support vector regression // Knowledge-Based Systems. – 2017. – V. 131. – P. 183-194.
9. Kim Hae Kyung, Park Seung. Hoe Asymptotic Properties of Nonlinear Least Absolute Deviation Estimators // Journal of the Korean Statistical Society. – 1995. – V. 24. – P. 127-139.
10. Guodong Li, Wai Keung Li. Least absolute deviation estimation for fractionally integrated autoregressive moving average time series models with conditional heteroscedasticity // Biometrika. – 2008. – V. 95 – P. 399-414.
11. Носков, С. И. Метод антиробастного оценивания параметров линейной регрессии: число максимальных по модулю ошибок аппроксимации / С. И. Носков // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 1 (29). – С. 51-54.
12. Носков, С. И. L-множество в многокритериальной задаче оценивания параметров регрессионных уравнений / С. И. Носков // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2004. – № 1. – С. 164-171.
13. Носков, С. И. Обобщённый критерий согласованности поведения в регрессионном анализе / С. И. Носков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2018. – № 1 (1). – С. 14-20.
14. Носков, С. И. О кластеризации данных на основе свойств методов идентификации параметров линейной регрессии / С. И. Носков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2022. – № 4 (16). – С. 82-85.
15. Статистика пользователей интернета в мире в 2022 // Seo блог Алексея Файнгора, 2024. – URL: <https://fayngor.ru/blog/statistika-polzovatelej-interneta-v-mire-v-2022/> (дата обращения: 04.11.2023). – Текст: электронный.
16. Мировые пользователи Интернета и статистика населения в 2023 году // Internet World Stats: мировая интернет-статистика, сайт. – URL: <https://www.internetworldstats.com/stats.htm> (дата обращения: 04.11.2023). – Текст: электронный.

Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н.
Ya. Yu. Grigoriev, I. N. Alkhimenko

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

**DATA PREPROCESSING FOR MACHINE LEARNING METHODS IMPLEMENTATION
IN ENVIRONMENTAL CONTROL TASKS**

Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)211-73-00. E-mail: alhimenko12345@inbox.ru.

Yan Yu. Grigoriev – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)211-73-00. E-mail: alhimenko12345@inbox.ru.

Альхименко Игорь Николаевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)211-73-00. E-mail: alhimenko12345@inbox.ru.

Igor N. Alkhimenko – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)211-73-00. E-mail: alhimenko12345@inbox.ru.

Аннотация. В работе рассматриваются проблемы, связанные с формированием набора данных для реализации методов машинного обучения, предлагаются математическая модель предварительной обработки данных и её программная реализация. В исследовании рассматриваются задачи оценки состояния различных видов земной поверхности, базирующиеся на моделях компьютерного зрения. Применение предлагаемых подходов к формированию набора данных позволяет повысить точность моделей машинного обучения и выявить наиболее значимые спектральные характеристики для различных поверхностей в задачах дистанционного зондирования.

Summary. The paper discusses problems associated with the formation of a data set for the implementation of machine learning methods, and offers a mathematical model of data preprocessing and its software implementation. The study considers the tasks of assessing the state of various types of the Earth's surface, based on computer vision models. The application of the proposed approaches to the formation of a data set makes it possible to increase the accuracy of machine learning models and identify the most significant spectral characteristics for various surfaces in remote sensing tasks.

Ключевые слова: данные, предварительная обработка, машинное обучение, экологический контроль, математическая модель, алгоритм, спектральный анализ, дистанционное зондирование.

Key words: data, preprocessing, machine learning, environmental control, mathematical model, algorithm, spectral analysis, remote sensing.

Исследование выполнено за счёт средств гранта Министерства образования и науки Хабаровского края № 41С/2023.

УДК 004.92

Введение. Современное общество сталкивается с рядом экологических проблем, которые оказывают губительное влияние на окружающую среду, здоровье людей и функционирование экономических систем. Возникает необходимость непрерывного мониторинга экологического состояния земной поверхности для своевременного выявления нештатных ситуаций. В настоящее время применяются различные методы мониторинга состояния земной поверхности, к которым относятся геоинформационные системы, методы биомониторинга, химического анализа.

Данные методы имеют ряд существенных недостатков: высокая стоимость применяемого оборудования; необходимость постоянной экспертной оценки высококвалифицированными специалистами обрабатываемой информации; длительное время, требуемое для получения результатов.

Использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) минимизирует вышеперечисленные проблемы. Методы ДЗЗ, основанные на спектральном анализе, имеют широкую область применения и позволяют своевременно определять области с возможными отклонениями от штатного состояния. Указанный подход основан на применении спектральных индексов и не позволяет определять различные состояния поверхностей без постоянной экспертной оценки, а также имеет низкую устойчивость к влиянию атмосферных явлений.

Применение ДЗЗ с использованием технологии машинного обучения не требует определения спектральных индексов, позволяет минимизировать обозначенные проблемы и повысить эффективность применяемого подхода. Ключевой задачей эффективной реализации методов машинного обучения является подготовка набора данных. Качественные данные требуют предварительной обработки, реализация которой основана на разработке и применении отдельных моделей.

Целью данной работы является построение алгоритма предварительной обработки данных. В качестве примера реализации рассматривается задача бинарной классификации нефтяных загрязнений, решаемая с применением методов машинного обучения.

Методы и материалы. Исходные данные, рассматриваемые в работе, содержат информацию о значениях 12 спектральных каналов. Изображения получаются с сенсоров спутника Sentinel-2 L2A. Схема работы с данными каналами приводится на рис. 1.

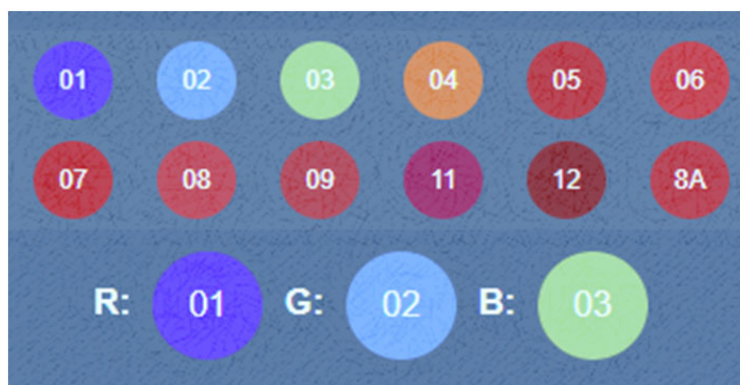


Рис. 1. Двенадцать спектральных каналов спутника Sentinel-2 L2A

Пиксель любого RGB-изображения представляется набором из 3 значений в диапазоне от 0 до 255. Таким образом, стандартный пиксель представляется в виде (x, y, z) , где $x, y, z \in [0, 255]$. Число из указанного диапазона показывает влияние каждого канала на цвет пикселя на снимке. Проводится анализ данных, представленных в виде файла формата csv (см. рис. 2). Осуществляется предварительная обработка отсортированных данных.

Предварительная обработка данных реализуется методами математической статистики на основе корреляционного анализа. Исследование направлено на оценку статистических свойств данных для последующего формирования обучающего набора. Определяются закономерности и связи, обеспечивающие возможность выявления параметров модели. На основе корреляционной матрицы оценивается влияние одного спектрального канала на другой. В исследовании выделяется пять промежутков для определения тесноты связи: $R[0,70; 1]$ – тесная, $R[0,50; 0,69)$ – средняя, $R[0,30; 0,49)$ – умеренная; $R[0,20; 0,29)$ – слабая, $R[0; 0,19)$ – очень слабая.

1	image ▾	class	Aerosol	Blue	Green	Red	IR1	IR2	IR3	IR4	IR5	IR6	IR7	IR8
2	A22	1	8	8	6	7	8	3	10	15	8	20	15	12
3	A22	1	8	8	6	7	8	3	10	15	8	20	15	12
4	A22	1	8	8	6	7	8	3	10	15	8	20	15	12
5	A22	1	8	8	6	7	8	3	11	16	9	19	15	12
6	A22	1	8	8	6	7	8	3	11	16	9	19	15	12
7	A22	1	8	8	6	7	8	3	11	17	7	19	15	12
8	A22	1	8	8	6	7	8	3	11	17	7	19	15	12
9	A22	1	8	8	6	8	7	3	13	16	9	19	16	11
10	A22	1	8	8	6	8	7	3	13	16	9	19	16	11
11	A22	1	8	8	6	7	6	2	13	16	9	19	16	11
12	A22	1	8	8	6	7	6	2	14	17	10	19	16	11
13	A22	1	8	8	6	7	6	2	12	15	8	19	16	11
14	A22	1	8	8	6	8	7	3	9	12	5	19	16	11
15	A22	1	8	8	6	7	6	2	8	10	5	19	16	11

Рис. 2. Представление обрабатываемых данных

Коэффициент корреляции для матрицы Пирсона вычисляется по формуле

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)},$$

где x_i – значения, принимаемые первым спектральным каналом (в нашем случае); y_i – значения, принимаемые вторым спектральным каналом; \bar{x} – среднее значение первого канала; \bar{y} – среднее значение второго канала; σ – стандартное отклонение, определяемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \mu)^2}{N}},$$

здесь t_i – значение элемента в выборке; μ – среднее значение выборки; N – количество элементов в выборке.

Основная часть. При сборе информации в полуавтоматическом режиме возникают проблемы, связанные с формированием набора данных.

Первая проблема заключается в несбалансированности классов, количество пикселей для объектов разных типов поверхности имеет разный объём, что негативно влияет на обучение модели.

Вторая проблема выражается в некорректном присвоении метки значению чужого класса. Сформированный набор данных с такими ошибками не позволяет провести обучение модели.

Третья проблема связана с учётом схожих характеристик при формировании набора данных, дублирование характеристик является критичным для задач машинного обучения.

Для устранения обозначенных проблем используются модели предварительной обработки данных.

Алгоритм оптимизации обучающего набора данных разрабатываемой интеллектуальной системы состоит из следующих этапов (см. рис. 3):

1. Сортировка данных. Первоначально данные, поступающие в неупорядоченном виде, не пригодны для обучения модели. Корректный набор данных описывается множеством X , исследуемые классы поверхностей представляются множеством $D\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, где y_n – конкретный класс данных $D \in X$. Порядок множества D может быть нарушен, т. е. пиксели различных классов поверхности не упорядочены. Проблема решается перебором значений класса принадлежности и их

группировкой, т. е. любой пиксель $P_i \in D$ и соседний пиксель $P_{i+1} \in D$ сравниваются, и в случае если один из пикселей принадлежит первому по счёту классу, то он убирается в начало таблицы, сразу после крайнего пикселя того же класса.

2. Удаление повторяющихся значений. В случае некорректного изображения, сформированного для набора данных при совпадающих значениях соседних компонентов палитры, т. е. дублировании одних и тех же спектральных каналов, соответствующие пиксели удаляются.

Пусть в каком-либо классе $y_i \in D$ находится такой пиксель $P_{l,m,k} \in y_i$, что $l = m \cup m = k$, (l, m, k – значение цветовой RGB-палитры), тогда он удаляется из класса y_i .

3. Нахождение среднего значения. Для дальнейшей работы и подсчёта параметров находятся средние значения для каждого спектрального канала.

В задаче определения нефтяных загрязнений используется 2 класса разметки (y_1 и y_2), каждый класс имеет набор из 12 спектральных характеристик $\{x_1, x_2, \dots, x_{12}\}$, подсчитывается среднее значение для каждой спектральной характеристики по формуле

$$mean_{j1,j2} = \frac{\sum x_i}{n_i},$$

где $mean_{j1,j2}$ – средние значения спектральных характеристик $j1$ и $j2$ для первого и второго класса соответственно; x_i – значение столбца i -го класса m -й строки; n – количество строк i -го класса.

4. Нахождение стандартного отклонения. После загрузки двумерного массива значений спектральных характеристик осуществляется перебор значений для всех столбцов таблицы и вычисляются средние значения для каждого. Подсчитывается стандартное отклонение для каждой спектральной характеристики по формуле $standart_{otklonenie} = \sqrt{\left(\frac{sum}{n}\right)}$, где sum – сумма квадратов отклонений; n – количество элементов в столбце.

5. Фильтрация по стандартному отклонению. Каждый пиксель P_i класса разметки y_i определяется набором спектральных характеристик $x_i, i = \overline{1,12}$. Для каждой спектральной характеристики x_i производится подсчёт стандартных отклонений $standart_{otklonenie_i}$, проверяется условие $x_i - standart_{otklonenie_i} < x_i < x_i + standart_{otklonenie_i}$. Если значения спектральной характеристики $x_i \in P_i$ выходит за допустимый интервал, то пиксель P_i из множества D удаляется.

6. Балансировка значений. Имеется пространство классов $D \{y_1, y_2\}$, где y_1, y_2 – классы данных разметки. Для реализации задачи машинного обучения необходимо сбалансировать количество пикселей каждого класса, т. е. количество пикселей $\sum P_{y_1}$ первого класса разметки y_1 не должно превышать количество пикселей $\sum P_{y_2}$ второго класса разметки y_2 более чем на 10 %. Чтобы обеспечить балансировку в установленной границе, осуществляется подсчёт пикселей каждого класса, пиксели, не входящие в допустимый интервал, удаляются из разметки.

На рис. 3 представляется схема работы алгоритма фильтрации данных.

Общий модуль предварительной обработки данных представлен на рис. 4 и реализуется на языке C#.

Тестирование алгоритма производится на данных, гарантированно содержащих информацию с мест реальных разливов нефти. Тестовая разметка предполагает следующие типы поверхностей: «чистая» вода, нефтяная плёнка. С помощью модуля предварительной обработки осуществляется балансировка и сортировка данных, результаты реализации программного модуля демонстрируются на рис. 5.

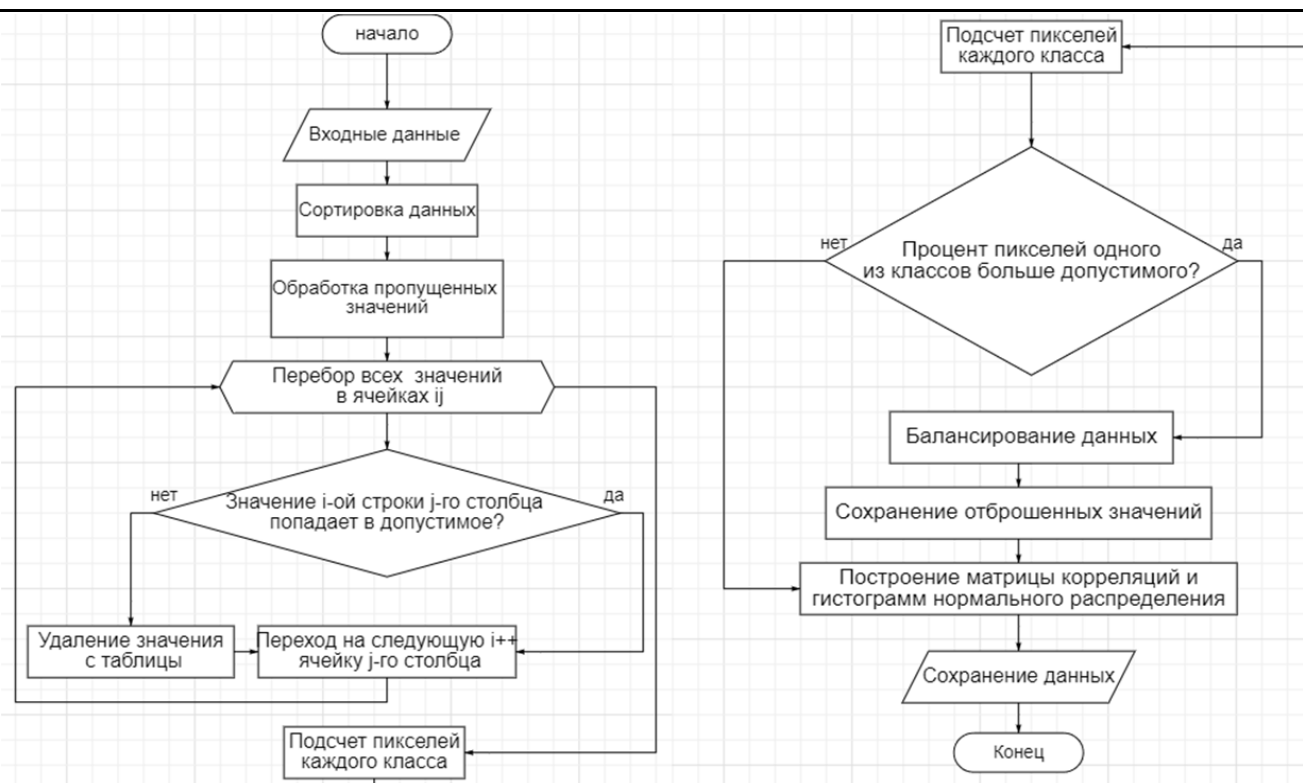


Рис. 3. Блок-схема предварительной обработки данных

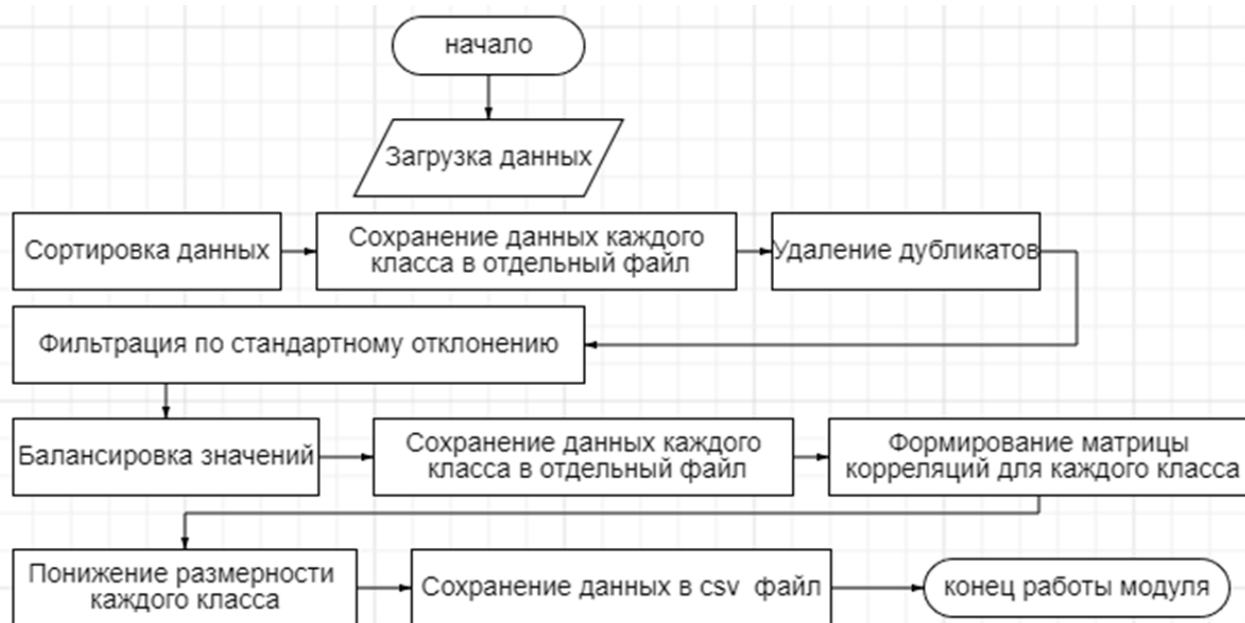


Рис. 4. Общая блок-схема работы модуля

На обработку поступило: 228435 пикселей
Начальное количество пикселей первого класса: 185896
Начальное количество пикселей второго класса: 42539

По итогам проверки по стандартному отклонению :

Удалено пикселей первого класса: 72678 Удалено пикселей второго класса: 16055 Всего удалено пикселей: 88733

Количество пикселей первого класса после обработки (удаления) 110026
Количество пикселей второго класса после обработки (удаления) 25253

Количество пикселей первого класса после обработки (балансирование) 27779
Количество пикселей второго класса после обработки (балансирование) 25253
Всего пикселей в разметке 53032

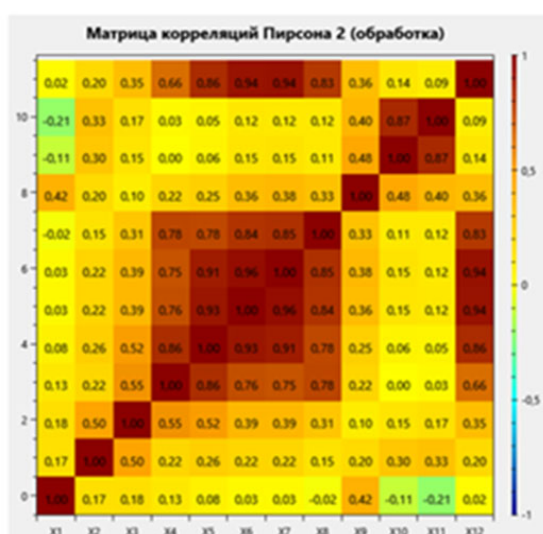
Рис. 5. Предварительная обработка данных

Следующий этап предполагает понижение размерности исходных данных путём исключения набора спектральных характеристик (см. табл. 1), определяемого на основе корреляционных оценок (см. рис. 6).

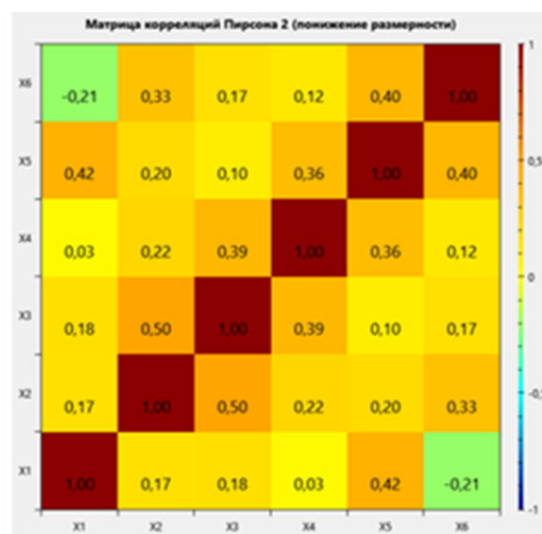
Таблица 1

Условные обозначения спектральных каналов

Название спектрального канала	Условное обозначение	Название спектрального канала	Условное обозначение
Band 1 – Coastal aerosol	X1	Band 7 – Vegetation red edge	X7
Band 2 – Blue	X2	Band 8 – Vegetation red edge	X8
Band 3 – Green	X3	Band 9 – Water vapour	X9
Band 4 – Red	X4	Band 11 –SWIR	X10
Band 5 – Vegetation red edge	X5	Band 12 –SWIR	X11
Band 6 – Vegetation red edge	X6	Band 8A – NIR	X12



Было



Стало

Рис. 6. Матрицы корреляций до и после понижения размерности

Анализ указывает на сильную связь между каналами X4, X5, X6, X7, X8, X12, а также X10, X11. Для понижения размерности исходных данных исключаются каналы X4, X5, X6, X8, X10, X12. Каналы X1, X2, X3, X7, X9, X11 являются базовыми для обучения интеллектуальной системы. Экспертная предметная оценка может влиять на набор оставляемых характеристик, скорректировать выбор.

Заключение. В результате исследования построена модель предварительной обработки данных, разработан и программно реализован алгоритм, апробирующийся на тестовых данных. Результаты работы модуля позволяют понизить размерность первоначального набора данных, формируемого для оценки наличия нефтяных загрязнений водных поверхностей, исключить из рассмотрения 6 спектральных каналов. Полученные данные обеспечивают эффективное обучение реализуемых моделей машинного обучения. Предлагаемый подход применим для оптимизации различных типов данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Детектирование состояния поверхности / Е. П. Жарикова, И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 58-63.
2. Zharikova, E. P. Surface state detection / E. P. Zharikova, J. U. Grigoriev, A. L. Grigoryeva // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – P. 8934205.
3. Zharikova, E. P. Methods of remote sensing in forest fund assessment problems / E. P. Zharikova, J. U. Grigoriev, A. L. Grigoryeva // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. – 2019. – С. 8725343.
4. Жарикова, Е. П. Применение искусственного интеллекта в задачах анализа состояния акваторий / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 129-133.
5. Амосов, О. С. Моделирование обнаружения и распознавания аномального поведения динамических систем / О. С. Амосов, С. Г. Амосова // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020. Труды тринадцатой международной конференции / Под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. – М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2020. – С. 1151-1158.
6. Zharikova, E. P. Applications of computer vision in cross-sectoral tasks / Zharikova E. P., Grigoriev Y. Y., Grigorieva A. L. // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies / Warsaw, 2021. – P. 415-426.
7. Жарикова, Е. П. Применение методов машинного обучения в задачах мониторинга мирового океана и континентальных поверхностных вод / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № VII (63). – С. 33-40.
8. Жбанов, В. А. Проектирование и разработка модели нейронной сети для определения сходства двух образцов неструктурированных данных / В. А. Жбанов, Е. Б. Абарникова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 47-53.
9. Остриков, В. Н. Влияние предварительной обработки данных гиперспектральной съёмки на качество их тематического анализа / В. Н. Остриков, О. В. Плахотников // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 1. – С. 29.



Андрианов И. К., Чепурнова Е. К.

I. K. Andrianov, E. K. Chepurnova

ВАРИАЦИОННАЯ ЗАДАЧА О СУММАРНЫХ ИЗДЕРЖКАХ ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ ПРОДУКЦИИ С ПОДВИЖНОЙ ПРАВОЙ ГРАНИЦЕЙ

VARIATION PROBLEM OF PRODUCTION AND STORAGE TOTAL COSTS OF PRODUCTS WITH A MOVABLE RIGHT BOUNDARY

Андрианов Иван Константинович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Ivan K. Andrianov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Чепурнова Елена Константиновна – лаборант-исследователь Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: el.chep@bk.ru.

Elena K. Chepurnova – Laboratory Assistant-Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: el.chep@bk.ru.

Аннотация. Исследование посвящено проблеме математического описания оптимальной динамики производства. Рассмотрена математическая модель плана производства продукции с целью минимизации издержек производства и хранения. На основании метода вариационного исчисления предложено решение научной задачи о суммарных издержках производства и хранении продукции с подвижной правой границей, т. е. при неизвестном плане производства в конце расчётного периода. Получены условия, накладываемые на функцию производственных издержек, при которых вариационная задача может иметь оптимальное решение. Для исключения проблемы отрицательности начального запаса продукции при поиске оптимального решения вариационной задачи разработана численная методика расчёта на основании метода Ньютона-Рафсона и проведены серии математических экспериментов на примере квадратичной функции производственных издержек и синусоидальной функции потребностей в продукции.

Summary. The research is devoted to the problem of mathematical description of optimal production dynamics. A mathematical model of the production plan is considered in order to minimize production and storage costs. Based on the method of calculus of variations, a solution is proposed to the problem of the total costs of production and storage of products with a movable right boundary, i.e. with an unknown production plan at the end of the billing period. The conditions imposed on the production cost function are obtained, under which the variation problem can have an optimal solution. To solve the problem of the negativity of the initial stock of products in the search for an optimal solution to the variation problem, a numerical calculation method based on the Newton-Raphson method was developed and a series of mathematical experiments were conducted using the example of the quadratic function of production costs and the sinusoidal function of product needs.

Ключевые слова: вариационная задача, динамическое программирование, экономическая динамика, оптимальный план производства, издержки производства и хранения.

Key words: variation problem, dynamic programming, economic dynamics, optimal production plan, production and storage costs.

УДК 657.471.1:517.97

Введение. Современное развитие производственно-экономической деятельности предприятий неразрывно связано с решением научных задач динамического программирования. Одним из важных вопросов сегодня является проблема математического моделирования объёма выпуска продукции для покрытия изменяющихся во времени потребностей. Научная проблема заключается

в том, чтобы выбрать такой план выпуска продукции, при котором издержки производства и хранения продукции были бы минимальны, но при этом покрывались потребности в продукции и сохранился определённый её запас.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в условиях нестабильной экономики приоритетными направлениями являются разработка оптимизационных методов экономико-математического моделирования и применение их для решения практических проблем. Наибольший интерес сегодня представляют задачи экономической динамики, поскольку в ряде таких задач оптимальные показатели зависят не от конкретных значений исследуемых переменных, а от функций. Однако отметим, что, согласно научным исследованиям [1–8], на сегодняшний день большинство подходов в оптимизации динамики производственной деятельности предприятия заключается в разработке оптимальных схем перераспределения ресурсов, обновлении производственных фондов, оценке рисков, прогнозировании деятельности с применением методов теории вероятностей и статистических методов.

В исследовании [9] О. Ланге была предложена постановка задачи динамического программирования объёма выпуска продукции. Автором с целью минимизации суммарных издержек производства и хранения был применён метод вариационного исчисления, суммарные издержки были представлены с помощью функционала вида [9]

$$V[Q(t)] = \int_{t_0}^t [\varphi[q(t)] + c(Q(t) - R(t) + z(t_0))] dt, \quad (1)$$

где t – время; $\varphi[q(t)]$ – функция издержек производства; $q(t)$ – объём выпуска продукции в момент времени t ; $R(t)$ – общая потребность в производимой продукции с начала периода t_0 к моменту времени t ; $Q(t)$ – функция динамики производства, определяемая суммарным объёмом выпуска продукции с начала периода t_0 к моменту времени t ; c – удельные издержки хранения; $z(t_0)$ – начальный запас товаров в момент времени t_0 .

Для функционала (1) известными считаются функции суммарных производственных издержек и потребностей в продукции:

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^t \varphi[q(t)] dt, \quad R(t) = \int_{t_0}^t r(t) dt, \quad (2)$$

где $\Phi(t)$ – общие издержки предприятия на производство всего объёма продукции с начала периода t_0 к моменту времени t ; $r(t)$ – потребность в производимом продукте в момент t .

Искомой функцией, доставляющей минимум функционалу (1), является функция динамики производства:

$$Q(t) = \int_{t_0}^t q(t) dt, \quad q(t) = Q'(t). \quad (3)$$

В работе [9] оптимизационная задача сводится к определению функции динамики производства во времени при известных значениях суммарного производства в начале $Q(0)$ и конце $Q(T)$ временного периода, т. е. решается вариационная задача с неподвижными границами. Однако на практике суммарный объём производства в конце расчётного периода может быть неизвестен, что требует рассмотрения задачи (1) с подвижной правой границей.

Кроме того, согласно работе [9], постановка задачи (1) – (3) дополняется условием неотрицательности запаса продукции:

$$z(t) = Q(t) - R(t) + z(t_0) \geq 0. \quad (4)$$

Автор в работе [9] отмечает важность вопроса о запасе продукции, но ввиду его второстепенной роли считает начальный запас $z(t)|_{t=t_0} = z(t_0)$ известным. Одна из проблем постановки задачи (1) – (4), о которой говорится в труде [9], связана с тем, что при исчерпании запаса продукции в некоторый момент времени t функция потребностей $r(t)$ может превысить функцию плана производства $q(t)$, тем самым приводя к отрицательному запасу продукции, что на практике невозможно. Автор в работе [9] предлагает решать эту проблему путём пересмотра производственной программы на определённых временных шагах и представления решения в дискретном виде. Следует отметить, что предложенная в работе [9] модель была также описана в труде [10] и дополнена с учётом неопределённости и вероятностного подхода в исследовании [11].

В рамках данной работы объектом исследования являются издержки производства и хранения товаров. Отметим, что производственные издержки складываются из постоянных FC и переменных VC издержек. Под постоянными будем понимать издержки, которые не зависят от объёма выпуска, не меняются в краткосрочном периоде, но могут изменяться в долгосрочном периоде. Под переменными будем понимать издержки, зависящие от объёма выпуска. Таким образом, при рассмотрении задачи минимизации издержек производства и хранения продукции (1) нерешёнными остаются вопрос расчёта оптимальной динамики производства при условии, когда план производства на конец периода заранее неизвестен, а также проблема отрицательности запаса продукции в течение всего временного интервала. На основании описанной проблемы были сформулированы задачи исследования:

- решить задачу минимизации суммарных издержек производства и хранения товаров (1) при условии подвижной правой границы;
- предложить ограничения и методику для расчёта начального запаса продукции с целью выполнения условия неотрицательности запаса продукции;
- определить условия применимости построенной математической модели оптимального плана производства;
- провести численный эксперимент расчёта оптимального плана производства на примере задачи с известными функциями потребностей и издержек.

Решение описанных задач проводилось с использованием следующих методов: метод вариационного исчисления для поиска допустимой экстремали функционала, метод Ньютона – Рафсона для решения уравнения Эйлера – Лагранжа при условии трансверсальности.

Новизна исследования обусловлена тем, что предложена уточнённая постановка задачи оптимальной динамики производства с ограничениями, получены новые результаты решаемой вариационной задачи с подвижной границей на основании построенной численной методики, которые могут найти практическое применение в производственной деятельности.

Методика исследования. Построение модели оптимизации суммарных издержек производства и хранения продукции будем проводить при следующих допущениях:

- функция потребностей в продукции от времени, функция издержек производства от объёма выпуска являются гладкими заданными функциями при $t \in [t_0; T]$;
- удельные издержки хранения не меняются с течением времени.

Согласно уравнениям (1) – (4), проблема отрицательности запаса продукции при решении вариационной задачи возникает вследствие того, что из неравенства $Q(t) - R(t) \geq 0$ не следует неравенство $q(t) - r(t) \geq 0$. Поэтому в рамках данного исследования при рассмотрении задачи (1) предлагается наложить дополнительное ограничение вместо условия (4):

$$q(t) - r(t) + z(t) \geq 0. \quad (5)$$

Докажем, что если выполняется условие (5), то неравенство (4) является верным. Если $q(t) - r(t) \leq 0$, то, подставляя функцию запаса товаров (4) в соотношение (5), получим

$$z(t) = Q(t) - R(t) + z(t_0) \geq -(q(t) - r(t)) \geq 0,$$

тогда условие (4) выполняется. Если $q(t) - r(t) \geq 0$, то, учитывая (2) и (3), $Q(t) - R(t) \geq 0$, и при $z(t_0) \geq 0$ условия (4) и (5) выполняются.

Таким образом, согласно постановке задачи исследования требуется найти функцию $Q(t)$, на которой функционал (1) при условии (5) достигает минимума при ограничениях:

$$V[Q(t)] = \int_{t_0}^T F(t, Q(t), Q'(t)) dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$Q(t)|_{t=t_0} = 0, \quad (7)$$

$$q(t) - r(t) + Q(t) - R(t) + z(t_0) \geq 0, \quad (8)$$

$$t_0 = t_0^*, \quad T = T^*,$$

$$z(t)|_{t=t_0} \geq 0, \quad q(t) \geq 0,$$

где $F(t, Q(t), Q'(t))$ – интегрант функционала (6):

$$F(t, Q(t), Q'(t)) = \varphi[Q'(t)] + c(Q(t) - R(t) + z(t_0)). \quad (9)$$

Задача (6) является вариационной задачей с подвижной границей, поскольку левый конец кривой $Q(t)$ неподвижен при $t = t_0^*$, а правый конец может скользить по вертикальной прямой $t = T^*$. Рассмотрим необходимые условия экстремума функционала (6) [12]:

– уравнение Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial F}{\partial Q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F}{\partial Q'} = 0, \quad (10)$$

– уравнение трансверсальности на правой границе исследуемой области:

$$\left. \frac{\partial F}{\partial Q'} \right|_{t=T} = 0, \quad (11)$$

– уравнение Якоби:

$$\left[\frac{\partial^2 F}{\partial Q^2} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial Q \partial Q'} \right) \right] u - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial Q'^2} u' \right) = 0, \quad (12)$$

где $u = u(t)$ – решение уравнения Якоби.

Подставляя соотношение (9) в уравнения (10), (11), перейдем к системе

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi[q(t)]}{\partial q^2} dq &= c dt \\ \left. \frac{\partial \varphi[q(t)]}{\partial q} \right|_{t=T} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Проинтегрируем первое уравнение системы (13) и для нахождения константы интегрирования применим условие трансверсальности, тогда систему (13) можно свести к виду

$$\frac{\partial \varphi[q(t)]}{\partial q} = -c(T - t). \quad (14)$$

Анализ соотношения (14) позволяет прийти к следующим заключениям: равенство (14) имеет смысл, если функция $\varphi = \varphi(q)$ является нелинейной; на полуинтервале $t \in [t_0; T)$ уравнение (14) выполняется только при условии

$$\frac{\partial \varphi[q(t)]}{\partial q} < 0. \quad (15)$$

Соответственно, рассмотрим возможные случаи выполнения условия (15) и их практическое обоснование при $t \in [t_0; T]$:

$$\left. \begin{aligned} &\frac{\partial \varphi}{\partial t} < 0, & \frac{\partial q}{\partial t} > 0 \\ &\frac{\partial \varphi}{\partial t} > 0, & \frac{\partial q}{\partial t} < 0, & \frac{\partial r}{\partial t} < 0 \\ &\frac{\partial \varphi}{\partial t} > 0, & \frac{\partial q}{\partial t} < 0, & \frac{\partial r}{\partial t} > 0, & q(t) + z(t_0) \geq r(t) \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Для первого случая системы (16) функция производственных издержек монотонно убывает с течением времени, а объём выпуска товаров является возрастающей функцией во времени. На практике данный случай возможен при выполнении двух условий: рассматривается долгосрочный период, в течение которого постоянные издержки постоянно уменьшаются, и убывание постоянных издержек происходит быстрее, чем рост переменных издержек: $FC'(t) < -VC'(t)$, $FC'(t) < 0$, $VC'(t) > 0$.

Для второго и третьего случаев системы (16) функция производственных издержек является возрастающей во времени, а объём выпуска продукции – убывающей функцией во времени, что на практике возможно в долгосрочном периоде, когда постоянные издержки растут быстрее, чем уменьшаются переменные издержки: $FC'(t) > -VC'(t)$, $FC'(t) > 0$, $VC'(t) < 0$. Второй случай системы (16) имеет смысл, если потребность в товарах является убывающей функцией, что и обуславливает снижение объёма производства. Третий случай системы (16) имеет смысл, когда начального запаса товаров достаточно для удовлетворения потребностей в товарах при снижающемся объёме выпуска товаров.

Рассмотрим условие (12), уравнение Якоби с учётом (9) сводится к виду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial^2 \varphi[q(t)]}{\partial q^2} u' \right) = 0. \quad (17)$$

Решая уравнение (17) с учётом условия $u(t_0) = 0$, получим

$$u = C_1 \left(\int \left(\frac{\partial^2 \varphi[q(t)]}{\partial q^2} \right)^{-1} dt - \left[\int \left(\frac{\partial^2 \varphi[q(t)]}{\partial q^2} \right)^{-1} dt \right]_{t=t_0} \right), \quad (18)$$

где C_1 – константа интегрирования.

Если учесть, что $C_1 \neq 0$ и $\varphi = \varphi(q)$ – нелинейная функция, уравнение (18) нигде в полуинтервале $t_0 < t \leq T$ в ноль не обращается, следовательно, условие Якоби для допустимой экстремали уравнения (14) выполняется.

Решение уравнения (14) $q = q_*(t)$ позволяет перейти к суммарному плану производства, являющегося допустимой экстремалью функционала (6):

$$Q_*(t) = \int_{t_0}^t q_*(t) dt. \quad (19)$$

Для того чтобы функция (19) являлась минималью функционала (6), требуется выполнение условия Лежандра [12]:

$$\frac{\partial}{\partial Q'} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial Q'^2} \right) = \frac{\partial^2 \varphi[q(t)]}{\partial q^2} \geq 0. \quad (20)$$

Таким образом, учитывая условия (14), (15), (20), постановка вариационной задачи (6) – (9) с подвижной правой границей имеет смысл, если функция производственных издержек $\varphi = \varphi(q)$ представляет собой убывающую по нелинейному закону функцию, кривая которой имеет неотри-

цательную кривизну. Дальнейшее решение уравнения (14) требует задания функции производственных издержек $\varphi = \varphi(q)$.

На втором этапе исследования требовалось определить начальный запас продукции $z(t_0)$ для выполнения условия (8). Представим выражение (8) в виде

$$z(t_0) = z_0 \geq -\xi(t), \quad (21)$$

где $\xi(t) = Q(t) - R(t) + q(t) - r(t)$.

Для удовлетворения условия (21) достаточно выполнения равенства

$$z_0 = -\xi_{\min} \cdot \theta(-\xi_{\min}), \quad (22)$$

где $\xi_{\min} = \min\{\xi(t_0); \xi(t_*); \xi(T)\}$, $\xi(t_*) = \min_{t \in [t_0; T]} \xi(t)$, $\theta(\varepsilon)$ – функция Хевисайда:

$$\theta(\varepsilon) = \begin{cases} 0, & \varepsilon < 0 \\ 1, & \varepsilon \geq 0 \end{cases}$$

Таким образом, для решения оптимизационной задачи

$$\xi(t) = \int_{t_0}^t q(t)dt - \int_{t_0}^t r(t)dt + q(t) - r(t) \rightarrow \min, \quad (23)$$

необходимое условие экстремума функции (23) примет вид

$$\left. \frac{\partial \xi(t)}{\partial t} \right|_{t=t_*} = 0: q(t_*) - r(t_*) + \frac{\partial q(t_*)}{\partial t} - \frac{\partial r(t_*)}{\partial t} = 0. \quad (24)$$

Поскольку уравнение (24) может иметь несколько решений, применим процедуру отделения корней [13]. Построим систему узлов на отрезке $[t_0; T]$:

$$i = 0, 1, \dots, N^{(k)},$$

$$\Delta t^{(k)} = (T - t_0)/N^{(k)},$$

$$t_i^{(k)} = t_0 + i\Delta t^{(k)},$$

где $(N^{(k)} + 1)$ – количество узлов сетки; k – номер итерации.

Сетка узлов перестраивается согласно итерационной схеме:

$$\Delta t^{(k+1)} = \Delta t^{(k)}/2, \quad N^{(k+1)} = 2N^{(k)}.$$

Условие окончания итерационного процесса перестроения сетки

$$\frac{\partial^2 \xi(t_i^{(k+1)})}{\partial t^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi(t_i^{(k+1)} + \Delta t^{(k+1)})}{\partial t^2} \geq 0.$$

Затем определяются отрезки $[t_{i_*}^{(k+1)}; t_{i_*}^{(k+1)} + \Delta t^{(k+1)}]$, на которых может находиться экстремум согласно условию

$$\frac{\partial \xi(t_{i_*}^{(k+1)})}{\partial t} \cdot \frac{\partial \xi(t_{i_*}^{(k+1)} + \Delta t^{(k+1)})}{\partial t} \leq 0, \quad (25)$$

где $i_* = 0, 1, \dots, m$; $(m + 1)$ – количество узлов сетки, для которых выполняется условие (25).

Для численного решения уравнения (24) начальное приближение примет вид

$$t_{i_*}^{[0]} = t_{i_*}^{(k+1)} + \frac{1}{2} \Delta t^{(k+1)}.$$

Применим метод Ньютона – Рафсона [13] для решения уравнения (24), тогда итерационная схема примет вид

$$t_{i_*}^{[j+1]} = t_{i_*}^{[j]} + \gamma \frac{\partial \xi(t_{i_*}^{[j]})}{\partial t} \left[\frac{\partial^2 \xi(t_{i_*}^{[j]})}{\partial t^2} \right]^{-1}, \quad -1 < \gamma < 0, \quad (26)$$

где j – номер итерации.

Условие окончания итерационного процесса (26)

$$(t_{i_*}^{[j+1]} - t_{i_*}^{[j]})/t_{i_*}^{[j+1]} \leq \delta, \quad (27)$$

где δ – заданная точность.

Для поиска минимумов функции (23) применим достаточное условие экстремума:

$$\frac{\partial^2 \xi(t_{i_{**}})}{\partial t^2} > 0, \quad t_{i_{**}} = \{t_{i_*}^{[n]}\}, \quad (28)$$

где i_{**} – узлы сетки, для которых выполняется условие (27); n – номер итерации, для которой выполняется условие (27).

Тогда с учётом (22) примем $\xi(t_{i_*}) = \min\{\xi(t_{i_{**}})\}$ при выполнении условия (28). Таким образом, с учётом описанной численной методики (24) – (28) определяется начальный запас продукции (22) для выполнения условия (8).

В качестве примера функции производственных издержек рассмотрим квадратичную функцию, как и в работах [9; 10]:

$$\varphi[q(t)] = \alpha_0 + \alpha_1 q(t) + \alpha_2 q^2(t). \quad (29)$$

Решая уравнение (14) для функции (29), получим оптимальную функцию объёма выпуска продукции:

$$q_*(t) = \frac{c}{2\alpha_2} t - \frac{cT + \alpha_1}{2\alpha_2}. \quad (30)$$

Согласно условию Лежандра (20), $\alpha_2 \geq 0$. Учитывая, что $q(t) \geq 0$, $\varphi[q(t)] \geq 0$, получим условия для постоянных коэффициентов уравнения (29): $\alpha_1 \leq -cT$, $\alpha_0 \geq \alpha_1^2/4\alpha_2$. Таким образом, условия для коэффициентов полинома (29) отличаются от условий в работах [9; 10] для вариационной задачи с неподвижными границами. Интегрируя соотношение (30) с учётом условия (7), получим минималь функционала (6):

$$Q_*(t) = \frac{c}{4\alpha_2} (t^2 - t_0^2) - \frac{cT + \alpha_1}{2\alpha_2} (t - t_0).$$

Результаты исследования. Применение построенной математической модели расчёта оптимального плана производства рассмотрим в системе Mathcad на примере тестовой задачи. Поиск оптимального плана производства осуществлялся при условиях первого случая системы (16). Численный расчёт проводился для следующих входных данных: $t_0 = 0$, $T = 1$, $c = 1$, $\varphi[q(t)] = 70 - q(t) + 0.005q^2(t)$, $r(t) = 50[1 + \sin(10t - \pi/2)]$. Поскольку интерес представляют не абсолютные значения оптимального плана производства, а его изменение в зависимости от динамики потребностей в продукции, графические результаты (см. рис. 1 – 6) представим с помощью относительных величин, учитывая, что $q_{\max} = r_{\max} = 100$, $\Phi(T) = 35.6$, $z(t_0) = 78.1$, $z(T) = 76.4$, $\varphi[q(t_0)] = 70$, $V[Q(T)]|_{Q(t)=R(t), z(t)=z_0} = 115.3$.

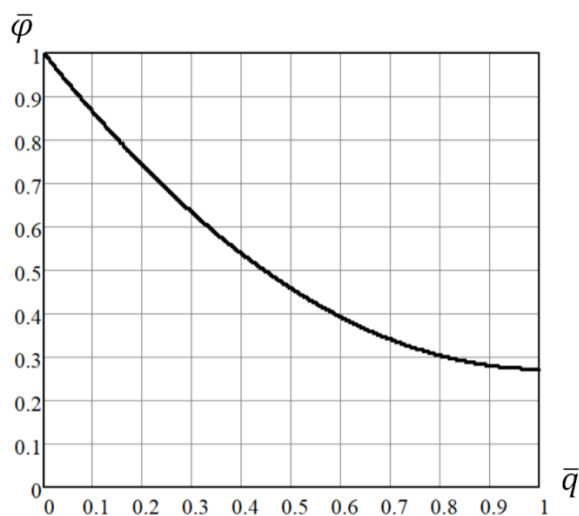


Рис. 1. Зависимость относительных издержек производства продукции $\bar{\varphi} = \varphi[q(t)]/\varphi[q(t_0)]$ от относительного количества товаров $\bar{q} = q(t)/q_{\max}$

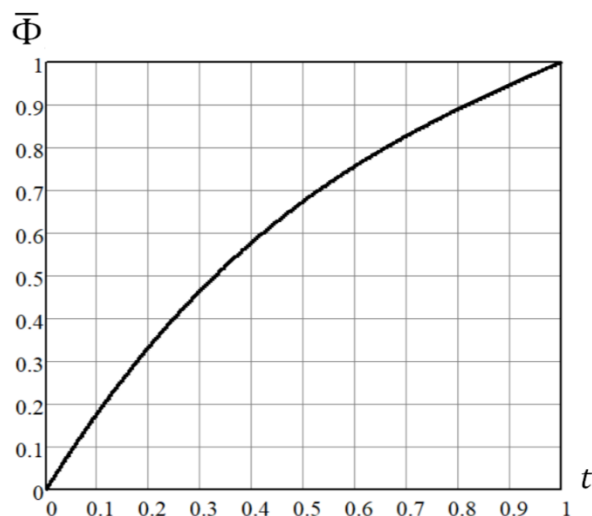


Рис. 2. Изменение относительных суммарных издержек производства продукции $\bar{\Phi} = \Phi(t)/\Phi(T)$ с течением времени

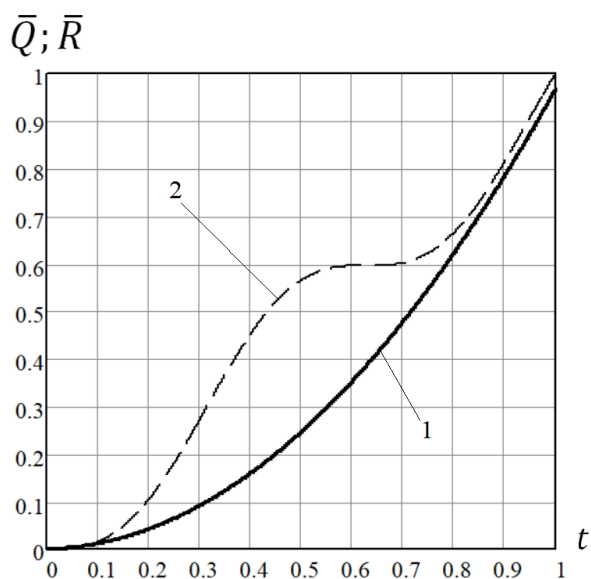


Рис. 3. Изменение относительных величин с течением времени: 1 – оптимального суммарного объёма производства $\bar{Q} = Q_*(t)/R(T)$; 2 – суммарной потребности в товарах $\bar{R} = R(t)/R(T)$

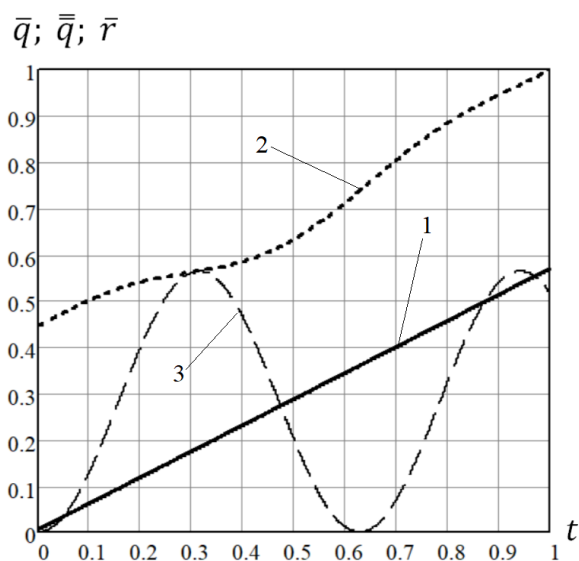


Рис. 4. Изменение относительных величин с течением времени: 1 – оптимального плана производства $\bar{q} = q_*(t)/[q(T) + z(T)]$; 2 – оптимального плана производства с учётом текущего запаса товаров $\bar{q} = [q_*(t) + z(t)]/[q(T) + z(T)]$; 3 – потребностей в продукции $\bar{r} = r(t)/[q(T) + z(T)]$

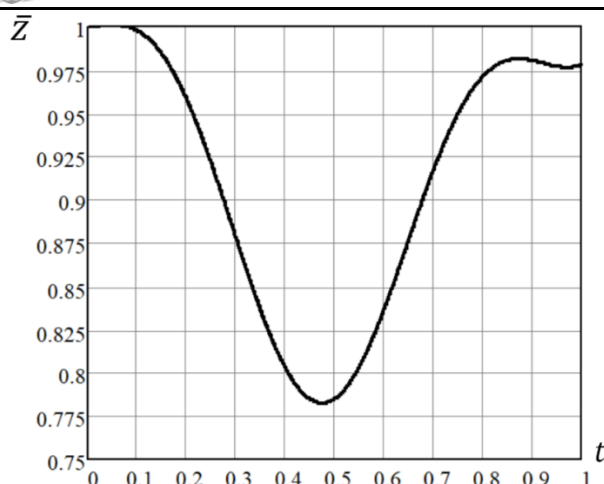


Рис. 5. Изменение относительного запаса товаров $\bar{z} = z(t)/z(t_0)$ с течением времени

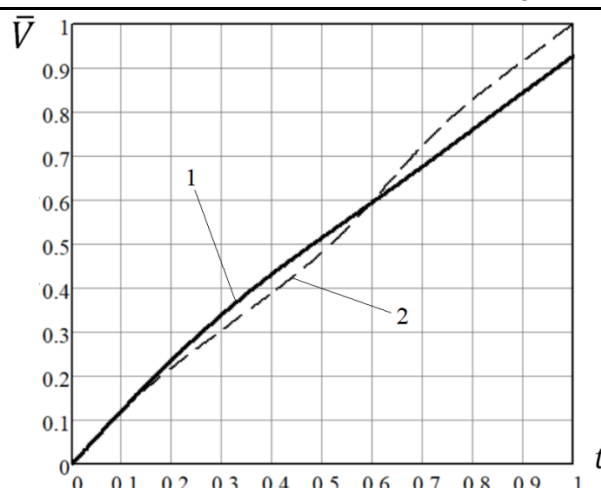


Рис. 6. Изменение относительных суммарных издержек производства и хранения товаров:

$$1 - \bar{V} = V[Q_*(t)]|_{z(t_0)=z_0} / V[Q(T)]|_{\substack{q(t)=r(t); \\ z(t)=z_0}}$$

$$2 - \bar{V} = V[Q(t)]|_{\substack{q(t)=r(t); \\ z(t)=z_0}} / V[Q(T)]|_{\substack{q(t)=r(t); \\ z(t)=z_0}}$$

Обсуждение результатов исследования. Сравним суммарные издержки производства и хранения товаров за период T для плана производства $Q_*(t)$, являющегося экстремалью функционала (6), и для плана производства $q(t) = r(t)$, совпадающего с потребностью в товарах в заданный момент времени при одинаковом начальном запасе товаров $z(t_0) = z_0$. Согласно рис. 6, суммарные издержки за период T в случае оптимального плана производства (кривая 1) на 8,5 % меньше суммарных издержек, когда объём выпуска совпадает с объёмом потребностей (кривая 2). При этом следует отметить, что в случае оптимального плана производства запас товаров к концу периода T уменьшается на 2 % по сравнению с запасом товаров на начало периода (см. рис. 5), а в случае плана производства товаров по схеме $q(t) = r(t)$ запас товаров остаётся в течение всего периода постоянным. Поэтому сравним суммарные издержки оптимального плана производства при начальном запасе товаров $z(t_0) = z_0$ с суммарными издержками плана производства по схеме $q(t) = r(t)$ при запасе товаров $z(t) = z(T) = \text{const}$. Таким образом, для обоих планов производства в конце периода T запас товаров будет одинаковым. В этом случае суммарные издержки за период T при оптимальном плане производства на 6,6 % меньше суммарных издержек, когда объём выпуска совпадает с объёмом потребностей.

Заключение. В рамках исследования рассмотрено решение вариационной задачи о суммарных издержках производства и хранения продукции с подвижной правой границей, предложена математическая модель расчёта оптимального плана производства, при котором достигаются минимальные издержки производства и хранения продукции, предложена методика для решения проблемы отрицательности запаса продукции на рассматриваемом временном периоде, а также определены условия, накладываемые на функцию производственных издержек, при которых решаемая оптимизационная задача имеет смысл. Результаты научного исследования могут найти практическую реализацию с целью повышения эффективности деятельности предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шукуръян, С. И. Выбор оптимального плана производства продукции при постоянных издержках производства (на примере молокозавода) / С. И. Шукуръян, Е. В. Васильева // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2014. – № 4-2. – С. 195-200.

2. Козоногова, Е. В. Расчёт оптимального плана производства в условиях неопределённости в начальных данных / Е. В. Козоногова // Журнал научных и прикладных исследований. – 2015. – № 9. – С. 22-24.
3. Луцик, Л. В. Оптимальные планы производства продукции двух видов с учётом влияния нормы выпуска одного из продуктов / Л. В. Луцик // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – № 1-2. – С. 51-56.
4. Покровский, М. А. Маржинальный анализ оптимального плана производства промышленного предприятия / М. А. Покровский // Контроллинг. – 2013. – № 48. – С. 10-15.
5. Меерсон, А. Ю. Вариационная задача оптимизации потребления модели экономической динамики Харрода-Домара с переменным коэффициентом капиталоемкости прироста дохода / А. Ю. Меерсон, А. П. Черняев // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – Т. 4. – № 3 (21). – С. 77-79.
6. Сурнев, В. Б. О решении некоторых задач динамики экономических систем методом интегральных уравнений / В. Б. Сурнев, В. Б. Пяткова, А. И. Пятков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2006. – № 4. – С. 105-119.
7. Максимов, В. П. Достижимые значения целевых функционалов в задачах экономической динамики / В. П. Максимов // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 4. – С. 124-135.
8. Низова, Л. М. Формирование инновационной среды для управления динамикой развития социально-экономических систем / Л. М. Низова // Инновационное развитие экономики. – 2013. – № 6(17). – С. 47-50.
9. Ланге, О. Оптимальные решения: Основы программирования / О. Ланге. – Москва: Прогресс, 1967. – 287 с.
10. Гончаренко, В. М. Математические методы в экономике и финансах / В. М. Гончаренко, В. Ю. Попова. – М.: КНОРУС, 2016. – 602 с.
11. Киселев, В. В. Частный случай решения задачи оптимальной динамики производства / В. В. Киселев, С. Р. Абдуллин // Дневник науки. – 2022. – № 12 (72). – URL: http://dnevniknauki.ru/images/publications/2022/12/physics/Kiselev_Abdullin.pdf (дата обращения: 06.11.2023). – Текст: электронный.
12. Цлаф, Л. Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения: справочное руководство / Л. Я. Цлаф. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2005. – 192 с.
13. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – М.: Высш. шк., 2005. – 840 с.



Трещев И. А., Монастырская Е. И.
I. A. Treschev, E. I. Monastyrnaya

СОБЫТИЙНАЯ ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ЗЛОУМЫШЛЕННИКА

EVENT-BASED FORMAL MODEL OF MALICIOUS BEHAVIOR

Трещев Иван Андреевич – кандидат технических наук, доцент, декан факультета компьютерных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)175-91-62. E-mail: kalkt@yandex.ru.

Ivan A. Treschev – PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of Computer Technologies Faculty, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)175-91-62. E-mail: kalkt@yandex.ru.

Монастырская Елизавета Игоревна – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)429-71-20. E-mail: liza.monastyrnaya@mail.ru.

Elizaveta I. Monastyrnaya – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)429-71-20. E-mail: liza.monastyrnaya@mail.ru.

Аннотация. Данная работа сосредоточена на модели поведения злоумышленника и его действиях при организации атак на информационную систему. Модель нарушителя служит для анализа различных угроз и позволяет определить время, затрачиваемое на реализацию определённой стратегии. Рассмотрен сценарий, в котором злоумышленник начинает свои действия с внешнего периметра корпоративной сети. В работе такой сценарий представлен в виде ориентированного графа с чётко определёнными выделенными начальными и конечными состояниями, что позволяет проанализировать этапы атаки и исключить обратные переходы.

Summary. This paper focuses on the intruder behavior model and its actions when organizing attacks on an information system. The intruder model is used to analyze various threats and allows us to determine the time it takes to implement a certain strategy. We consider a scenario in which an intruder starts his actions from the outer perimeter of the corporate network. In this paper, such a scenario is represented as a directed graph with clearly defined initial and final states, which allows us to analyze the stages of the attack and exclude reverse transitions.

Ключевые слова: модель нарушителя, оргграф, действия злоумышленника, система переходов, ордеререво, угрозы, вектор атаки, корпоративная сеть.

Key words: intruder model, orgraph, intruder actions, transition system, tree, threats, attack vector, corporate network.

УДК 004.942

Введение. В последнее время информационные системы всё больше подвергаются постоянным препятствиям, мешающим их нормальной работе. Это связано с тем, что технологии, используемые злоумышленниками, постоянно совершенствуются. Поэтому решение вопросов по сохранению защищённости становится первостепенной задачей, требующей постоянного контроля и модернизации. Основным способом решения этих вопросов является применение математических моделей, которые используются для анализа кибератак и прогнозирования действий злоумышленников.

Продолжая анализировать тему, рассмотренную в [1], сфокусируемся на последовательности действий нарушителя и возможности её представления в виде ордеререва.

Такой подход позволяет исследовать процесс атаки, начиная с этапа сбора информации о системе до завершения получения доступа к цели. Действия нарушителя представим в виде оргграфа, вершинами которого являются действия злоумышленника, а рёбрами – переходы между

этими действиями. Ограничения, накладываемые на направления перехода, а также отсутствие циклов помогут рассмотреть ордерово и позволят упростить анализ.

Цель исследования – создать модель поведения нарушителя, которая в дальнейшем может использоваться для того, чтобы улучшить существующие инструменты для обнаружения и предотвращения атак в будущем.

Методы и материалы. Исходные данные, рассматриваемые в работе, содержат информацию об общей форме системы переходов, рассмотренной в [1], где некоторое количество стратегий злоумышленника обозначается как p_n , в которых e_i^j – это события нарушителя (j – номер события, i – номер процесса). При этом события, имеющие одинаковые номера процессов, могут происходить параллельно и взаимодействовать со следующими процессами согласно их порядковому номеру. Помимо этого, время взаимодействия между двумя произвольными событиями есть константа $\tau \geq 0$.

Временной системой переходов называется четвёрка: $LTS (E, t, Q, \tau)$, где $E = \{e_1^1, e_1^2, \dots, e_1^{n_1}, e_2^1, e_2^2, \dots, e_2^{n_2}, \dots, e_l^1, e_l^2, \dots, e_l^{n_m}\}$ – множество событий, с помощью которых злоумышленник будет добиваться цели, при этом рассматривается система, состоящая из l процессов, совершаемых нарушителем, а вектор $\{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ задаёт количество событий в каждом процессе.

При моделировании стратегии атаки злоумышленника с помощью ордерова используется структура орграфа, в которой действия злоумышленника заданы как вершины графа, а переходы между ними – как рёбра.

При описании формул и утверждений используются следующие элементы:

V – множество вершин графа;

A – множество рёбер графа.

Ранее [1] была рассмотрена общая модель поведения злоумышленника, основанная на системе переходов [4], разберём конкретную модель поведения внешнего злоумышленника.

Модель нарушителя представляет собой реализацию той или иной угрозы, которые в свою очередь определены экспертным методом – показателем затрачиваемого времени на действия злоумышленника.

Рассмотрим возможный сценарий, где нарушитель начинается действовать с внешнего периметра. Он преследует несколько целей: кража идентификационных данных с их последующим использованием, кража интеллектуальной собственности, нарушение работы корпоративной сети. Систему взаимодействующих последовательных действий можно описать при помощи соответствующей модели (см. рис. 1).

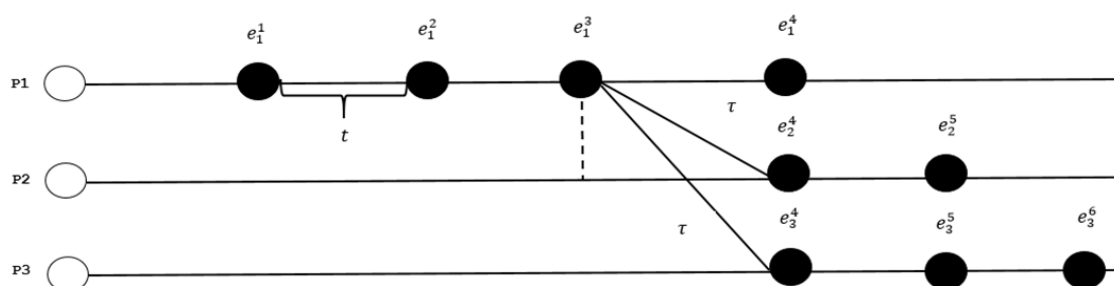


Рис. 1. Математическая модель внешнего нарушителя

Предположим, что есть некоторое количество параллельных сценариев p_n , e_i^j – это событие нарушителя (j – номер события, i – номер процесса). Далее пусть:

e_1^1 = фишинг (злоумышленник создаёт фишинговую компанию, отправляя поддельные электронные письма с вредоносными вложениями или ссылками на сотрудников организации; цель – получить доступ к компьютерам сотрудников);



e_1^2 = установка вредоносного ПО (сотрудник организации случайно открывает вредоносное вложение в фишинговом письме, что приводит к инфицированию его компьютера вредоносным программным обеспечением);

e_1^3 = установка Backdoor (после открытия сотрудником письма с вредоносным ПО устанавливается «задняя дверь» на компьютере сотрудника, предоставляя злоумышленнику удалённый доступ к системе);

e_1^4 = получение данных пользователя (доступ к корпоративным данным и последующая кража конфиденциальных данных, таких как бизнес-планы, патенты, технологические разработки или исследования);

e_2^4 = DDoS-атака (сервер);

e_2^5 = эксплуатация уязвимости (сбой работы сервера и приостановление работы корпоративной сети);

e_3^4 = сканирование портов и устройств (злоумышленник ищет другие устройства и службы внутри сети, сканируя открытые порты и службы);

e_3^5 = перехват сеансов (злоумышленник использует полученные учётные данные для перехвата активных сеансов другими устройствами и службами внутри сети);

e_3^6 = перехват административного доступа (целью может быть кража идентификационных данных сотрудников или клиентов, таких как логины и пароли, для дальнейшего мошенничества).

Пусть происходит событие e_1^3 , взаимодействующее с e_1^4 , e_2^4 и e_3^4 . А события e_2^5 и e_3^5 происходят параллельно. Пусть время взаимодействия между произвольными событиями есть константа $\tau \geq 0$. Такой подход позволяет описать взаимодействующие последовательные сценарии с рядом ограничений, накладываемых на модели.

Предположим, что описана временная система переходов, изображённая на рис. 1, и экспертным методом задано время реализации событий $t(e_1^1) = 5$, $t(e_1^2) = 15$, $t(e_1^3) = 30$, $t(e_3^4) = 50$, $t(e_3^5) = 25$, $t(e_3^6) = 15$.

Тогда найдём время функционирования сценария злоумышленника:

$\text{Max}(t(e_1^1) + \tau, t(e_1^2) + \tau, t(e_1^3) + \tau, t(e_3^4) + \tau, t(e_3^5) + \tau, t(e_3^6) + \tau) = \text{Max}[5 + \tau, 15 + \tau, 30 + \tau, 50 + \tau, 25 + \tau, 15 + \tau] = 50 + \tau$. Из этого следует, что для реализации атаки потребуется не менее 50 единиц времени.

Итак, на основе заданных временных показателей для событий мы определили, что сценарий атаки будет функционировать не менее 50 единиц времени. Это означает, что в течение этого периода злоумышленник будет продолжать свои действия, представленные в модели, включая фишинг, установку вредоносного ПО, установку Backdoor, получение данных пользователя, DDoS-атаку, эксплуатацию уязвимости, сканирование портов и устройств, перехват сеансов и перехват административного доступа.

Такой подход позволяет оценить продолжительность атаки и, следовательно, разработать эффективные методы обнаружения и предотвращения атак. Понимание, что атаки могут продолжаться не менее определённого времени, позволит специалистам по защите информации разработать политику реагирования на инциденты.

Далее рассмотрим, как вышеуказанную модель можно представить в виде орграфа. Для этого введём два события, которые будем именовать как начальный этап атаки злоумышленника (сбор информации о системе) и конечный (конкретная цель, достигаемая злоумышленником). Действия злоумышленника на орграфе будут представлять собой вершины, а переходы между ними – рёбра.

Пусть v^* – начальный этап атаки, v^{**} – конечная цель злоумышленника. Тогда v_1^1 , v_2^1 , v_1^2 , v_2^2 , v_3^3 – последовательные действия злоумышленника. При этом зададим рёбра так, что откат назад, к предыдущему действию, невозможен (см. рис. 2).

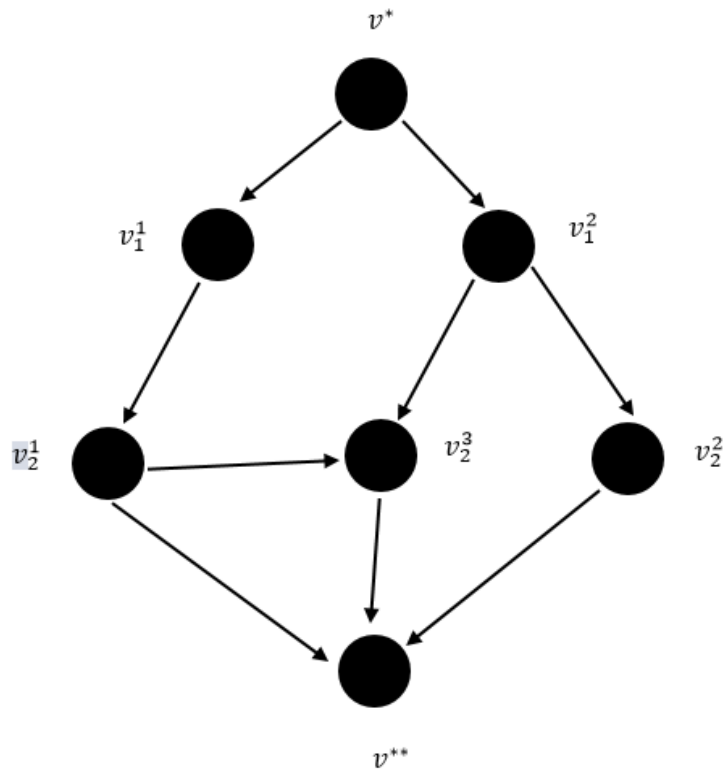


Рис. 2. Ордерево событий атаки злоумышленника

В случае, когда орграф можно интерпретировать как ордерево с выделенными вершинами v^* , v^{**} , справедливы следующие утверждения:

$$\{\exists! v^* \in V | \nexists a \in A \text{cod}(a) = v^*\}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} u \in V | \nexists a \in A \text{cod}(a) = u \\ v \in V | \nexists a \in A \text{cod}(a) = v \end{cases} \Rightarrow u = v. \quad (2)$$

Для v^{**} аналогично справедливы утверждения

$$\{\exists! v^{**} \in V | \nexists a \in A \text{dom}(a) = v^{**}\}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} u \in V | \nexists a \in A \text{dom}(a) = u \\ v \in V | \nexists a \in A \text{dom}(a) = v \end{cases} \Rightarrow u = v. \quad (4)$$

Выражение (1) означает, что для вершины v^* из множества вершин V не существует такого ребра a из множества рёбер A , которое бы входило в эту вершину. Аналогичные условия заданы в (3) для конечной цели.

Выражение (2) описывает, что если существуют две вершины u, v из множества вершин V , для которых гарантировано отсутствие входящих в них рёбер, то эти две вершины являются одной и той же вершиной дерева.

Дополнительно (4) означает, что если существуют две вершины u, v из множества вершин V , для которых гарантировано отсутствие выходящих из них рёбер, то эти две вершины являются одной и той же вершиной дерева.

Анализ ордерева позволяет нам более глубоко понять структуру последовательных действий в рамках модели атаки, а также определить ключевые этапы. Заданные ограничения являются определяющими для анализа сценариев.

Заключение. Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть применены для разработки методов по обнаружению и устранению неблагоприятных воздействий кибератак, а

также для проведения анализа различных видов уязвимостей в распределённых информационных системах и создания системы по реагированию на инциденты информационной безопасности.

Имея полное представление о структурах атаки и времени их выполнения, специалисты по защите информации получают возможность улучшить стратегию по защите информационных ресурсов.

Дальнейшие исследования следует связать с переходом в категорию сетей Петри, анализа достижимости и других характеристик моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трещев, И. А. Математическая модель распределённых вычислений на основе последовательных событий / И. А. Трещев, А. С. Ватолина // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных. Т. 1 / Редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. – С. 416-418.
2. Аверченков, В. И. Аудит информационной безопасности органов исполнительной власти: учеб. пособие / В. И. Аверченков. – М.: Флинта, 2020. – 297 с.
3. Аверченков, В. И. Аудит информационной безопасности: учеб. пособие / В. И. Аверченков. – М.: Флинта, 2021. – 679 с.
4. Козлов, А. А. Моделирование угроз безопасности информации на основе систем переходов состояний / А. А. Козлов, Ю. Ю. Ходяков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19. – Вып. 4. – С. 682-687.
5. Афанасьев, А. А. Аутентификация. Теория и практика обеспечения безопасного доступа к информационным ресурсам: учеб. пособие для вузов / А. А. Афанасьев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 438 с.
6. Глинская, Е. В. Информационная безопасность конструкций ЭВМ и систем: учеб. пособие / Е. В. Глинская, Н. В. Чичварин. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 118 с.
7. Гордеев, А. В. Моделирование атак на информационную систему с использованием матрицы связей уязвимостей / А. В. Гордеев, Н. В. Жукова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Информатика и вычислительная техника. – 2018. – № 2. – С. 107-116.
8. Грачев, М. В. Моделирование кибератак на информационные системы на основе теории графов / М. В. Грачев, А. В. Переверзев // Системы и средства информатики. – 2019. – Т. 29. – Вып. 2. – С. 43-59.
9. Девянин, П. Н. Анализ безопасности управления доступом и информационными потоками в компьютерных системах / П. Н. Девянин. – М.: Радио и связь, 2018. – 176 с.
10. Долгов, А. С. Моделирование угроз кибербезопасности информационных систем на основе теории системных динамических переходов / А. С. Долгов, Н. А. Соколова, С. А. Кабанов // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – № 5. – С. 54-59.
11. Дударев, А. В. Использование теории систем переходов при моделировании кибератак / А. В. Дударев, А. В. Герус // Проблемы безопасности информационных технологий. – 2019. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 43-49.

Дружинин В. А., Азимов Х. Х., Андрианов И. К., Колесник М. Б., Иванов С. Н.
V. A. Druzhinin, Kh. Kh. Azimov, I. K. Andrianov, M. B. Kolesnik, S. N. Ivanov

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

DEVELOPMENT OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH HIGHLY VARIABLE LOAD

Дружинин Владимир Александрович – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: drujinin.volodya@mail.ru.

Vladimir A. Druzhinin – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: drujinin.volodya@mail.ru.

Азимов Хурсандмурод Хакимович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Khursandmurod Kh. Azimov – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Андрианов Иван Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Ivan K. Andrianov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Колесник Максим Борисович – аспирант кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Maxim B. Kolesnik – Postgraduate Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Аннотация. Рассмотрены актуальность разработки электромеханической системы льдоудаления и её преимущества перед существующими способами уборки наледи с крыши. Приведены структура системы и её принцип действия. Предложена методика расчёта надёжности нагружаемого элемента системы. Рассмотрен принцип распознавания появления критического состояния и принятия решения о его устранении. Приведена методика выбора типа и мощности электродвигателя, а также оценки основного силового элемента системы.

Summary. The relevance of the development of an electromechanical ice removal system and its advantages over existing methods for removing ice from the roof are considered. The structure of the system and its principle of operation are given. A method for calculating the reliability of a loaded system element is proposed. The principle of recognizing the appearance of a critical condition and making a decision to eliminate it is considered. A methodology is given for selecting the type and power of the electric motor, as well as evaluating the main power element of the system.



Ключевые слова: электромеханическая система, автоматизация, система распознавания, расчёт на надёжность.

Key words: electromechanical system, automation, recognition system, calculation of reliability.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00089, <https://rscf.ru/project/24-29-00089/>.

УДК 621.313

Введение. Проектирование эффективных приводов для объектов различного целевого назначения требует учёта особенностей реализуемых с их использованием технологических процессов. Задача проектирования усложняется, когда создаются техническая система или комплекс, предназначенные для недетерминированных и/или резко изменяющихся условий эксплуатации. Определение количества и диапазонов варьирования проектных параметров может быть сделано на основе методов анализа процессных явлений, учитывающих энергетические преобразования в системе, включающей в общем случае приводной, передаточный, исполнительный, информационный и управляющий блоки. Алгоритм проектирования включает формальное описание технологического процесса (вектор выходных величин – перемещение объекта, изменение формы и т. п.), определение номенклатуры проектных параметров (вектор состояния, зависящий от типа блока, для приводного блока – сопротивления, напряжения, размерные соотношения, физические свойства материалов и т. д.), обоснование способа управления (вектор управления – напряжение, частота), учёт внешних и внутренних факторов (вектор возмущений – температура, вибрации и т. п.).

В настоящее время существуют различные способы борьбы с наледью:

- *Ручная уборка* является самым распространённым из всех способов. Такой способ связан с некоторыми рисками, например, такими как получение травмы или повреждение крыши инструментами.

- *Сбивание сосулек пневматическим оружием.* Этот способ уборки наледи применяется не так часто, как первый, т. к. считается опасным и для его использования требуется оцеплять территорию, чтобы не травмировать проходящих мимо людей.

- *Воздействие паром.* Заключается в удалении сосулек с помощью шланга и баллона, наполненного паром под давлением. Пар подтаивает сосульку, и она падает с крыши.

- *Установка антиобледенительных систем.* Данный способ набирает популярность, однако является достаточно дорогим. Основан на использовании греющего кабеля на крыше, который с помощью системы управления и датчиков регулирует свою температуру и тем самым нагревает снег, не позволяя сосулькам образоваться. В Даляньском технологическом университете разработана система удаления льда, основанная на использовании медных нанопроволок, которые получают энергию из солнечного света и не требуют питания от искусственного источника тока. Эффективно поглощая свет, они равномерно распределяют тепло по всему массиву. Опытным путём было установлено, что максимальный эффект достигается при размещении нанопроволок с зазором не более 2-3 мкм. При этом обеспечивается поглощение не менее 95 % падающего на поверхность света.

- *Специальные способы.* Более редко из-за своей стоимости встречаются способы удаления сосулек с помощью ультразвука, лазера или электрического импульса.

Перечисленные методы уборки наледи являются либо неудобными, т. к. требуют присутствия человека, либо несут некоторые риски, такие как получение травмы или повреждение крыши, а существующие автоматические системы, не имеющие этих недостатков, являются очень дорогими, поэтому предлагается электромеханическая система льдоудаления. Рассматриваемая электромеханическая система (ЭМС) позволяет обеспечить не только полную автоматизацию процесса льдоудаления и безопасность для инфраструктуры за счёт интеграции в комплексную систему безопасности, но и решает задачу энергосбережения. В статье рассматривается пример

разработки ЭМС с резкопеременной нагрузкой, образованной совокупностью элементов льдообразования, что характерно для большинства зданий и сооружений. Одной из наиболее актуальных проблем, постоянно привлекающих внимание различных исследователей, которая на первый взгляд может показаться незначительной, является образование сосулек на карнизах и водостоках крыш.

Структурная схема электромеханической системы. ЭМС обеспечивает удаление сосулек механическим способом с помощью элементов, которые перемещаются в реверсивном режиме вдоль крыши и разрушают образующуюся наледь.

Структурная схема ЭМС состоит из непосредственного электропривода возвратно-поступательного движения, информационно-измерительного блока, интегрированного в систему управления, и исполнительного механизма.

Для обоснованного выбора ЭМС нужно иметь представление о конкретных технологических требованиях, предъявляемых к механизму, который она будет приводить в действие. Установив эти требования, можно синтезировать субоптимальную ЭМС – ту, которая не только соответствует критериям производительности механизма, но и делает это наиболее экономичным и простым способом. Такой подход обеспечивает баланс между соблюдением производительности и эксплуатационной эффективностью проектируемой ЭМС.

Моделирование технологического процесса. Особенностью рассматриваемого процесса является предварительное обоснование размерных соотношений удаляемого объекта. В работе [1] показано, что безопасная сила удара для человека может быть принята на уровне до 160 Н, т. е. удар сосульки массой 0,1 кг, упавшей с высоты 10 м считается безопасным. Расчётная зависимость безопасной массы сосульки от высоты приведена на рис. 1.

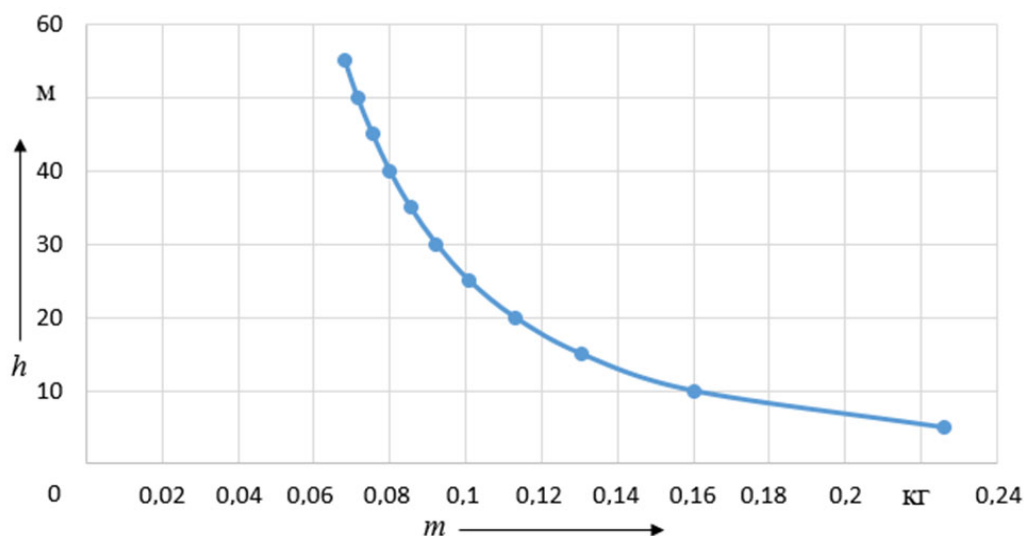


Рис. 1. Зависимость безопасной массы от высоты

В соответствии с приведённым выше алгоритмом для определения мощности приводного двигателя необходимо исследовать процесс удаления при вариации места приложения внешнего усилия.

На рис. 2 показана геометрическая модель единичного элемента, построенная с учётом рекомендации [1].

На рис. 3 показано интерактивное окно, в котором задаются свойства модели (материал – лёд). При моделировании варьируются величина и точка приложения силы. Результаты моделирования в пакете T-FLEX приведены ниже.

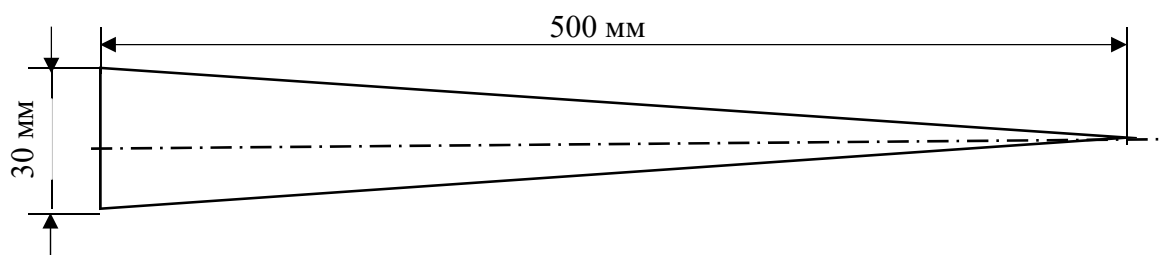


Рис. 2. Геометрическая модель

На рис. 4 к вершине единичного элемента приложена сосредоточенная сила, равная 3 Н.

На рис. 5 показаны значения коэффициента запаса по эквивалентным напряжениям. Коэффициент запаса прочности менее 1,0 соответствует разрушению материала.

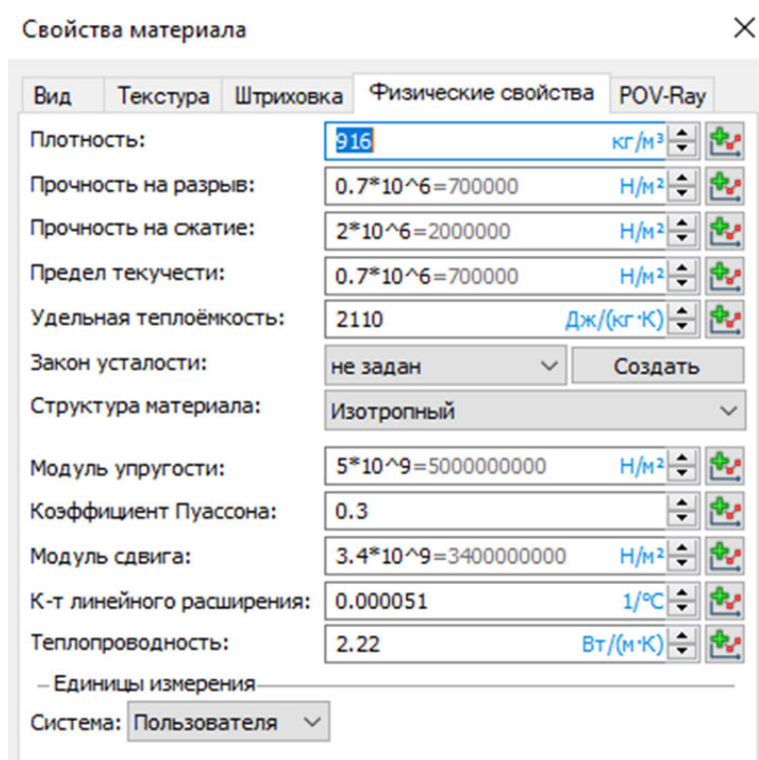


Рис. 3. Свойства модели

По результатам моделирования видно, что коэффициент запаса находится в диапазоне 0,7...1,26. Дальнейший анализ напряжённо-деформированного состояния показывает, что приложение силы к вершине позволяет удалить примерно только половину элемента, для удаления всего массива необходимо точку приложения усилия сместить к основанию. На рис. 6 приведены результаты моделирования при воздействии внешней силы величиной 20 Н, приложенной ниже основания единичного элемента.

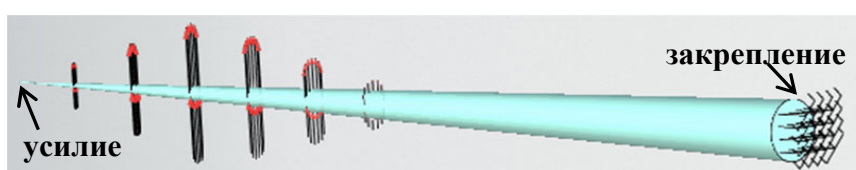


Рис. 4. Распределение напряжений при внешней силе 3 Н

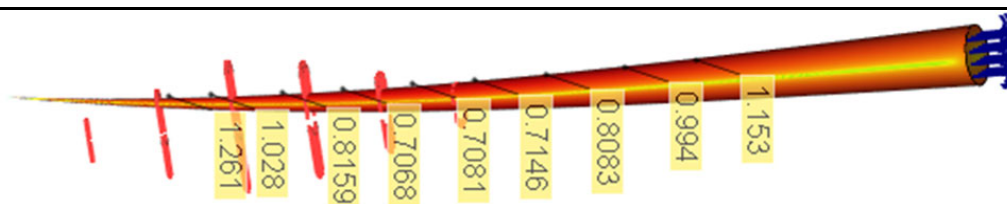


Рис. 5. Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям при внешней силе 3 Н

На следующем этапе моделирования решается вариационная задача обеспечения равномерности распределения нагрузки на исполнительный механизм, для чего определяются места расположения и, соответственно, количество двигателей, образующих ЭМС. В качестве исполнительного механизма выбирается пустотелый прямоугольник длиной 5 м (приближённое одностороннее расстояние между двумя смежными подъездами).

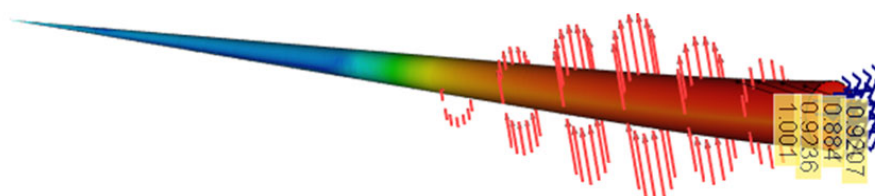


Рис. 6. Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям при внешней силе 20 Н

В качестве материала используется композитный материал с техническими характеристиками, приведёнными на рис. 7.

Для требуемого усилия 0,5 кН количество точек приложения варьируется от 3 до 7. В качестве примера на рис. 8 показаны величины напряжений для одного из вариантов.

Вид	Текстура	Штриховка	Физические свойства	POV-Ray
Плотность:			950	кг/м³
Прочность на разрыв:			20	Н/мм²
Прочность на сжатие:			20	Н/мм²
Предел текучести:			13	Н/мм²
Удельная теплоёмкость:			0	Дж/(кг·К)
Закон усталости:			не задан	Создать
Структура материала:			Изотропный	
Модуль упругости:			900	Н/мм²
Коэффициент Пуассона:			0.39	
Модуль сдвига:			320	Н/мм²
К-т линейного расширения:			0.00015	1/°C
Теплопроводность:			0.00021	Вт/(мм·К)
— Единицы измерения				
Система:	Пользователя			

Рис.7. Параметры материала исполнительного механизма

Задача_1 [Экспресс-расчет]
Напряжения эквивалентные, МПа

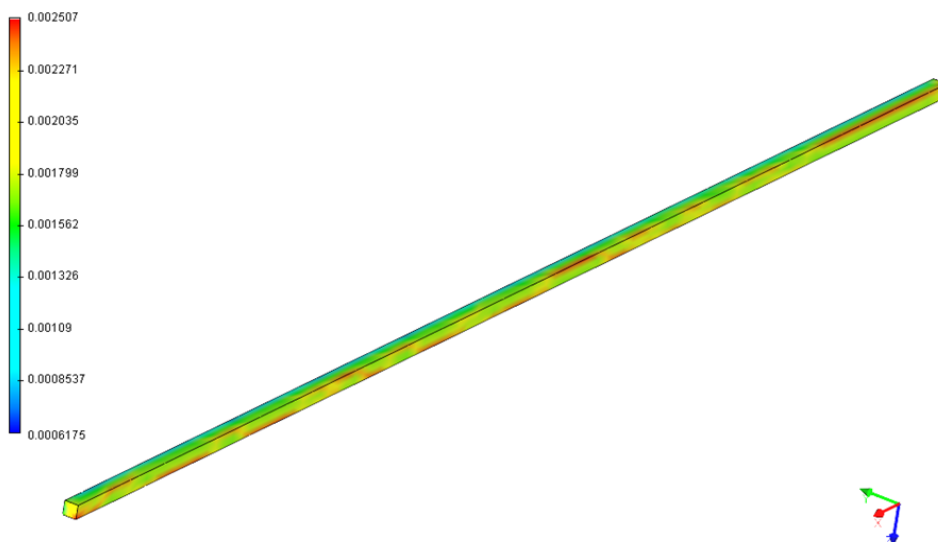


Рис. 8. Распределение напряжений при максимальном количестве точек приложения силы

Выбор мощности привода. Результаты моделирования позволяют определить необходимые усилие, количество и мощность электродвигателей, создающих усилие на исполнительном механизме, а также размерные соотношения электромеханической системы. Использование в качестве приводного устройства асинхронного электродвигателя связано с его надёжностью и технологичностью интеграции передачи «винт-гайка» в ротор двигателя. При выборе мощности двигателя учитывается вероятностный характер нагрузки, предположительно распределённой по нормальному закону, поэтому в качестве проектной величины задаётся среднее значение между усилием, необходимым для удаления сразу всех элементов льдообразования, и усилием, достаточным для удаления одиночного элемента.

Инновационный подход к оптимизации использования энергии и экономии ресурсов предполагает использование многофункционального привода. Благодаря интеграции нескольких основных функций эти устройства обеспечивают большую гибкость и эффективность в достижении целевых показателей производительности. При этом они соответствуют современным стандартам технологичности, электробезопасности, надёжности и экологичности.

Опираясь на выходные данные асинхронных электродвигателей серии 7AVE, можно объективно изучить их технические характеристики для подтверждения целесообразности применения такого типа привода. В табл. 1 представлены данные типовых двигателей, по мощности $P_{2н}$ которых могут быть выбраны параметры исполнительного механизма (усилие F_p и линейная скорость v_l).

Таблица 1

Расчётные характеристики комбинированного привода

F_p , кН	v_l , м/с	$P_{2н}$, кВт	F_p , кН	v_l , м/с	$P_{2н}$, кВт	F_p , кН	v_l , м/с	$P_{2н}$, кВт
2p = 6			2p = 4			2p = 2		
42,6	0,04	4	400	0,02	8	220	0,02	4
132,53	0,083	11	210	0,06	12,5	150	0,08	12
239,13	0,092	22	160	0,1375	22	88	0,25	22
326,1	0,092	30	218,2	0,1375	30	120	0,25	30
370	0,1	37	269,1	0,1375	37	134,54	0,275	37
450	0,1	45	327,3	0,1375	45	163,64	0,275	45

Использование линейного электропривода позволяет эффективно решить две задачи:

1. обеспечить экономичный, надёжный и автоматизированный контроль тяги в широком диапазоне скоростей;

2. без изменения мощности и массы повысить использование приводной системы.

Основной целью исследования является определение тяговых характеристик привода с учётом числа полюсов и номинальной мощности базового асинхронного электродвигателя, т. к. способ решения первой задачи уже был предложен в [2–5].

Для решения поставленной задачи было применено выражение, связывающее активную мощность P , силу F_p (момент $M_{вр}$) и линейную v_l (угловую ω) скорость:

$$P = F_p \cdot v_l = M_{вр} \cdot \omega.$$

Уникальность предлагаемого метода основана на использовании возможности электроме- ханического преобразователя самостоятельно переводить крутящий момент в силу тяги, обеспе- чивая линейное перемещение исполнительного механизма.

Функциональная схема непосредственного электропривода электроме- ханической системы приведена в [5]. В данном механизме конструктивно объединены электропривод и исполни- тельный механизм, поэтому нет необходимости в использовании дополнительного передаточного устройства, благодаря чему уменьшаются габариты и вес, а также увеличивается надёжность за счёт упрощения конструкции. Принцип действия основан на электроме- ханическом преобразова- нии энергии, как в обычном асинхронном двигателе, за исключением того, что на внутренней ча- сти короткозамкнутой вторичной обмотки имеется винтовая резьба, благодаря которой при вра- щении двигателя вал будет совершать линейные перемещения в зависимости от направления вра- щения двигателя.

Для исследования данного электропривода за основу взята модель обобщённого электроме- ханического преобразователя [6], дополненная для учёта особенностей привода модифицирован- ным уравнением тяговой характеристики, полученной на основе [7]:

$$M_{вр} = 0,5F_p d_2 \left(\frac{D_{ср}}{d_2} f + \operatorname{tg}(\vartheta + \varphi) \right), \quad (1)$$

где $M_{вр}$ – вращающий момент на валу; d_2 – диаметр резьбовой части вала; $D_{ср}$ – средний диаметр нарезанной части вращающегося ротора; f – коэффициент трения в резьбовом соединении; ϑ – угол подъёма резьбы; $\varphi = \operatorname{arctg} f_{пр}$, здесь $f_{пр}$ – приведённый коэффициент трения с учётом уг- ла профиля передачи.

При заданных параметрах двигателя уравнение (1) позволяет определить тяговую характе- ристику электропривода.

На рис. 9 приведена структурная схема электроме- ханической системы льдоудаления с ин- тегрированным блоком измерения и обработки информации, реализующая принципы, предложен- ные в [8].

Используемый метод идентификации обеспечивает формирование управляющего сигнала ЭМС, на первом этапе анализируются видеоданные, поступающие из контролируемой зоны. Этот метод основан на выделении кадра из видеопотока блоком получения кадра и параметров сцены 1. После обработки кадр передаётся подсистеме обработки кадров 2, которая выдаёт текстовое опи- сание присутствующих на нём объектов вместе с их расположением. Далее полученная инфор- мация поступает в модуль нечёткой корректировки изображения 3 и на основе правил из корректи- рующей базы знаний 4, содержащей нечёткие правила реагирования на параметры сцены, генери- рует параметры для фильтра модуля предварительной обработки 5. Затем модуль предварительной обработки 5 использует блок бинаризации 6 для преобразования изображения в чёрно-белое. Блок повышения контраста 7 обеспечивает контрастность изображения, блок шумоподавления 8, ис- пользующий адаптивные фильтры, убирает шумы, блок 9 переводит изображение в разные оттен-

ки серого. Далее обработанное изображение передаётся модулю обобщённой сегментации 10, где оно будет разделено на классы на основе семантических свойств.

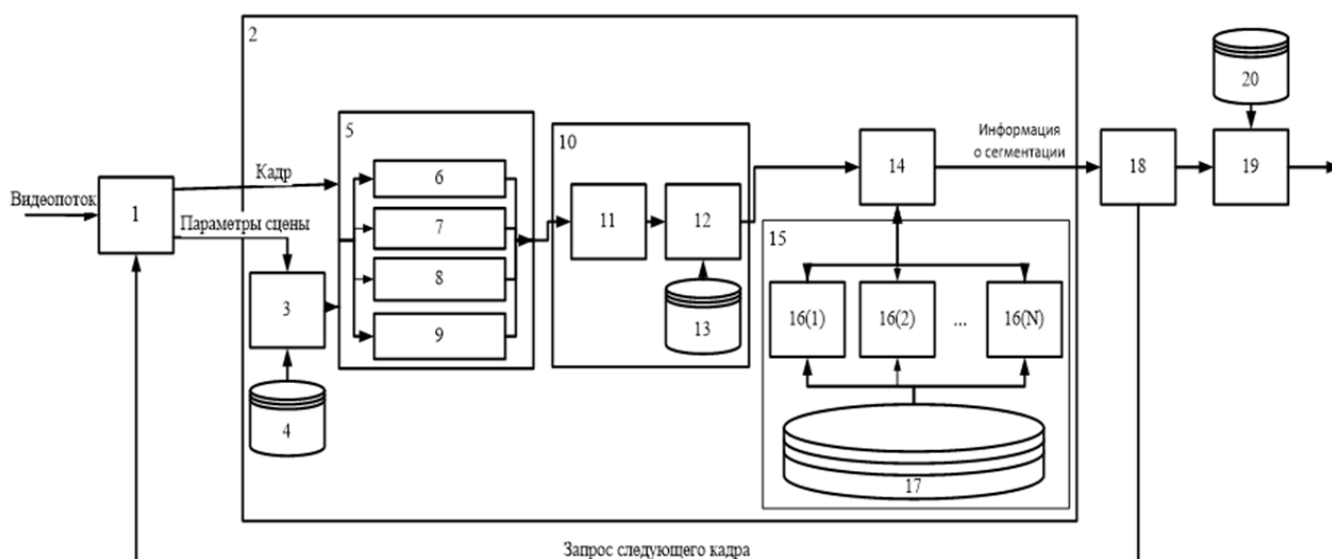


Рис. 9. Структурная схема системы управления

Модуль обобщённой сегментации использует сеть обобщённой сегментации 11 для проведения классификации путём сегментации изображения на дискретные группы пикселей или области, каждая из которых соответствует одному элементу. Сеть обобщённой классификации может быть создана с использованием свёрточных нейронных сетей или сетей классификаторов, которые обучены на множестве различных классов или используют метод сканирующего окна. Блок нечёткого обобщения 12 обобщает классы в более полные семантические группы. Обобщающая база знаний 13 содержит правила по созданию семантических группировок.

Сегментированное изображение подаётся в блок принятия решений о частной классификации 14, который принимает решение относительно передачи конкретных сегментов изображения в модуль частной классификации для улучшения результатов распознавания. Модуль частной классификации 15, включающий в себя множество конкретных алгоритмов-классификаторов, служит для уточнения результатов распознавания. Используя алгоритмы-классификаторы, модуль частной классификации через сеть частной классификации 16(1)...16(N) запрашивает из базы данных частной классификации 17 информацию для специальных алгоритмов-классификаторов.

На следующем этапе подсистеме агрегирования описаний кадров 18 предоставляются координаты и текстовое описание включённых в текущий кадр элементов. После обработки нескольких кадров, чтобы получить данные о том, что происходит в видеопотоке, собранные данные преобразуются в описание события.

Блок формирования команд управления 19, опираясь на базу данных команд управления 20 и предоставленное блоком 18 описание происходящего в видеопотоке, создаёт команду для электромеханической системы.

Более сложный вариант системы распознавания использован в субоптимальной энергетической системе [3]. На рис. 10 представлена структурная схема системы распознавания.

С учётом анализа существующих технических решений для рассматриваемой ЭМС предлагается структурная схема, приведённая на рис. 11.

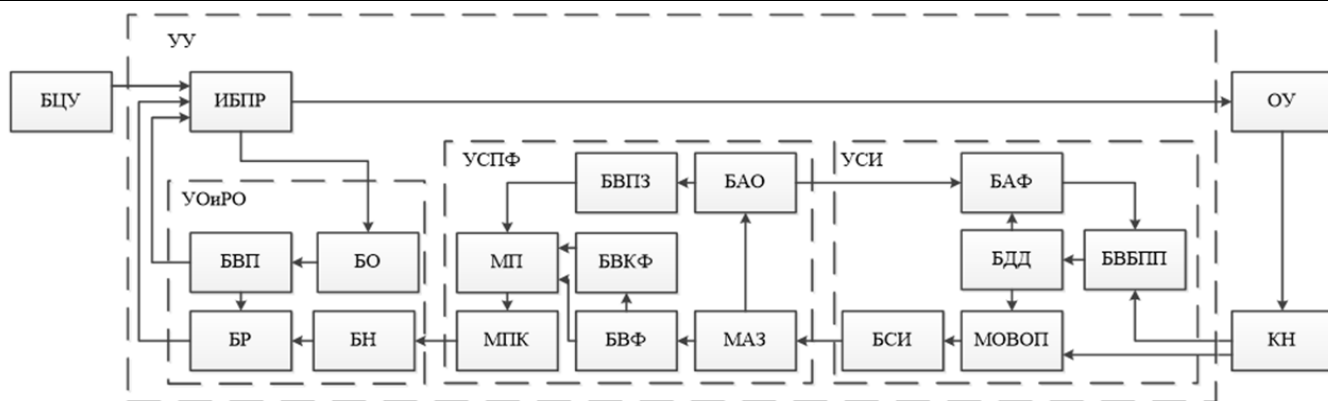


Рис. 10. Структурная схема системы распознавания

Для активации всей системы предполагается использовать комплексную систему охранного телевидения (СОТ), которая состоит из камер наблюдения (КН), а также может включать в себя датчики освещённости и другие. Данные с КН отправляются на устройство распознавания образов, которое состоит из блока нормализации (БН) и блока выбора признаков (БВП). Для анализа используется подсистема идентификации состояний объекта управления (ПИСОУ). Признаки, поступающие от БВП, классифицируются в блоке идентификации (БИ) путём сравнения с эталонами блока выбора эталонов (БВЭ). На интеллектуальный блок принятия решений (ИБПР) поступают данные от БВП и БИ, также учитывается целевое управление (ЦУ). При необходимости ИБПР может внести изменения в БВЭ, используя блок обучения (БО). ИБПР оказывает управляющее воздействие на ПЧ, который в свою очередь регулирует направление вращения электродвигателя. КН, входящая в СОТ, является источником информации для управления системой и занимается передачей видео с нужного нам участка крыши. Если в наблюдаемой сцене КН обнаружит налесь, то ИБПР передаст управляющий сигнал на ЭП.

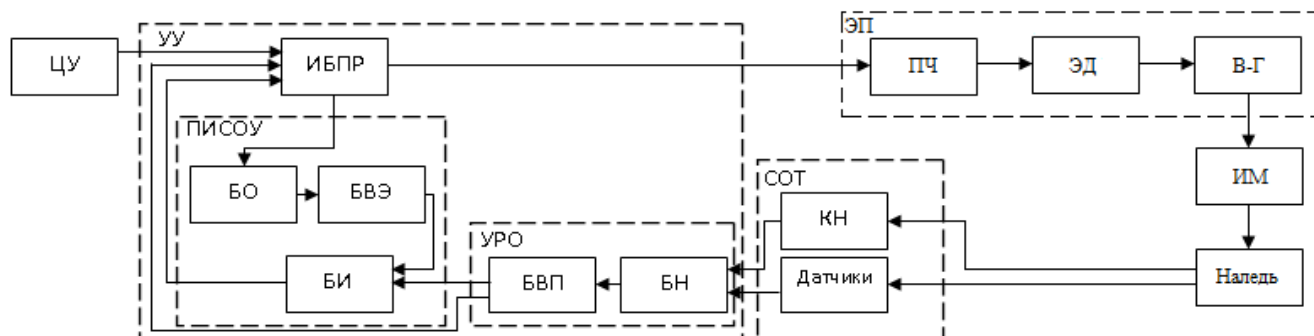


Рис. 11. Структурная схема электромеханической системы льдоудаления

Исполнительный механизм работает в режиме возвратно-поступательного перемещения. Поскольку нагрузка, прикладываемая к исполнительному механизму, приложена к валу двигателя, то вал принимается в качестве основного силового звена и рассчитывается на прочность.

Прочностной расчёт ведётся с учётом того, что, кроме основной знакопеременной нагрузки (осевой), действуют силы одностороннего магнитного тяжения, а также возмущения, вызванные нарушением балансировки и крутильными колебаниями [9; 10].

Пример расчёта на надёжность приведён для вала двигателя с учётом двух опасных сечений. Эти сечения имеют наименьший диаметр, а значит, и наименьший момент сопротивления при изгибе и кручении. В сечении «А» присутствует шпоночное соединение для передачи крутящего момента пропеллеру. В сечении «Б» выточена канавка для посадки подшипника на вал (см. рис. 12).

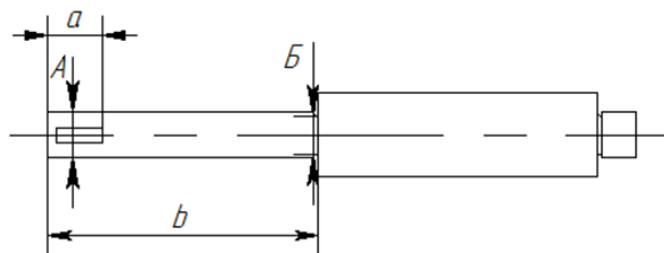


Рис. 12. Эскиз вала

Исходными данными для расчёта являются номинальный крутящий момент M_2 , диаметры сечений d_A и d_B , масса подвижной части m_p .

Масса ротора $m_p = 0,35$ кг.

Значение силы тяжести G_p определяется по формуле

$$G_p = 9,81 \cdot m_p.$$

Момент инерции вала J в сечениях «А», «Б»

$$J_A = \frac{\pi \cdot d_A^4}{64}, \quad J_B = \frac{\pi \cdot d_B^4}{64}.$$

Момент сопротивления при кручении в сечении «А»

$$W_{крА} = \frac{\pi d_A^3}{16} - \frac{bt(d_A - t)^2}{2d_A}.$$

Напряжение кручения для сечения «А», МПа,

$$\tau_a = k \frac{M_2}{W_{крА}},$$

где k – коэффициент перегрузки, $k = 2 \dots 2,5$.

Момент сопротивления при кручении в сечении «Б»

$$W_{крБ} = \frac{\pi d_B^3}{16}.$$

Напряжение кручения для сечения «Б»

$$\tau_B = k \frac{M_2}{W_{крБ}}.$$

Изгибающий момент в сечении «А»

$$M_{иА} = G_p \cdot a.$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении «А»

$$W_{иА} = \frac{\pi d_A^3}{32} - \frac{bt(d_A - t)^2}{2d_A}.$$

Напряжение изгиба в сечении «А»

$$\sigma_A = \frac{M_{иА}}{W_{иА}}.$$

Изгибающий момент в сечении «Б»

$$M_{иБ} = G_p \cdot b.$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении «Б»

$$W_{иБ} = \frac{\pi d_B^3}{32}.$$

Напряжение изгиба в сечении «Б»

$$\sigma_B = \frac{M_{иБ}}{W_{иБ}}.$$

Совместное действие изгиба и кручения в сечении «А»

$$\sigma_{прА} = \sqrt{\sigma_A^2 + 4(\alpha \cdot \tau_A)^2},$$

где $\alpha = 0,8$ – коэффициент для возвратно-поступательного режима работы.

Совместное действие изгиба и кручения в сечении «Б»

$$\sigma_{прБ} = \sqrt{\sigma_B^2 + 4(\alpha \cdot \tau_B)^2}.$$

Напряжения изгиба и кручения позволяют определить коэффициент запаса – величину, указывающую на способность тяги выдерживать нагрузки, превышающие расчётные. Коэффициент запаса рассчитывается как отношение максимально допустимого напряжения к предельному напряжению, возникающему в критических сечениях. Допустимое значение напряжения не должно превышать 0,7 предела текучести материала, из которого изготовлены элементы исполнительного механизма.

Коэффициент запаса прочности в сечениях «А» и «Б»

$$k_{запА} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{прА}}, \quad k_{запБ} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{прБ}}.$$

Запасы прочности сравниваются с нормативным коэффициентом запаса $n = 2,5$:

$$k_{запА} > n, \quad k_{запБ} > n.$$

Если фактические коэффициенты запаса прочности в опасных сечениях больше нормативного, конструкция исполнительного механизма эксплуатируется без появления остаточных деформаций.

Заключение. Электромеханическая система льдоудаления, рассмотренная в статье, состоящая из информационно-управляющей системы, включающей в себя системы охранного телевидения и управляющее устройство, электропривод и исполнительный механизм, расширяет и дополняет существующие исследования в данной области [11–16]. Она позволяет создавать эффективные автоматические устройства для различных отраслей промышленности, сельского хозяйства и жилищно-коммунального сектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапов, П. И. Анализ результатов численного моделирования черепно-мозговой травмы / П. И. Агапов // Процессы и методы обработки информации: сборник статей. – М.: МФТИ, 2005. – С. 186-193.
2. Патент № 2651531 С1 Российская Федерация, МПК7 В61L 29/04. Автоматизированная пропускная система: № 2017113804: заявлено 20.07.2017: опубликовано 19.04.2018 / Амосов О. С., Баена С. Г., Иванов Ю. С., Иванов С. Н.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – 2 с.
3. Патент № 2626798 С1 Российская Федерация, МПК7 В61D 27/00, G05B 13/00, F24H 9/20, H04N 5/225, H04N 5/243. Субоптимальная энергетическая система: № 2016117431: заявлено 04.05.2016: опубликовано 01.08.2017 / Амосов О. С., Иванов С. Н., Иванов Ю. С., Баена С. Г., Со Хтайк; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – 2 с.



4. Kulichenko, G. V. Assessment of efficiency of electric drive of stop valves / G. V. Kulichenko [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – P. 36-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174203.
5. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 44-50.
6. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.
7. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – М.: Высш. шк., 2008. – 408 с.
8. Ivanov, S. Automatic access to the premises of increased danger using intelligent electric drive / O. S. Amosov; S. G. Amosova, S. N. Ivanov // *4th IEEE International Conference on Applied System Invention (IEEE ICASI); Tokyo, JAPAN / APR 13-17, 2018 PROCEEDINGS OF 4TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SYSTEM INNOVATION 2018 (IEEE ICASI 2018)* P. 532-535. DOI: 10.1109/ICASI.2018.8394306.
9. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
10. Ким, К. К. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / К. К. Ким, М. Б. Колесник, С. Н. Иванов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.
11. Farzaneh, M. Atmospheric Icing of Power Networks / M. Farzaneh. – Canada: Springer, 2008. – 381 p.
12. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
13. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты / Н. П. Шакина, И. А. Хоменко, А. Р. Иванова, Е. Н. Скриптунова // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2012. – № 348. – С. 1-27.
14. Бучинский, В. Е. Атлас обледенения проводов / В. Е. Бучинский; под ред. А. Д. Заморского. – 2-е изд., доп. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. – 116 с.
15. Алексеенко, С. В. Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчётов / С. В. Алексеенко, А. А. Приходько // *Учёные записки ЦАГИ*. – 2013. – № 6 (XLIV). – С. 25-57.
16. Mishchenko, L. Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets / L. Mishchenko, B. Hatton, V. Bahadur et al. // *American Chemical Society*. – 2010. – 4 (12). – P. 7699-7707. DOI: 10.1021/nn102557p.

Дмитриев Э. А., Карпенко В. А., Одинокое В. И., Евстигнеев А. И.
E. A. Dmitriev, V. A. Karpenko, V. I. Odinokov, A. I. Evstigneev

**ЭВОЛЮЦИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА
В КРИСТАЛЛИЗАТОР И ЕГО ПЕРЕМЕШИВАНИЕ**

**EVOLUTION OF DOMESTIC STUDIES OF MATHEMATICAL MODELING
OF THE PROCESSES OF LIQUID METAL FEEDING INTO THE CRYSTALLIZER
AND ITS STIRRING**

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Eduard A. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Карпенко Владимир Анатольевич – соискатель Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: volodya.karpenko.89@mail.ru.

Vladimir A. Karpenko – Degree Candidate, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: volodya.karpenko.89@mail.ru.

Одинокое Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Valeriy I. Odinokov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

Aleksey I. Evstigneev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Аннотация. В статье подведены некоторые итоги и обобщены результаты многолетних исследований математического моделирования процессов течения жидкого металла в кристаллизаторе УНРС при различных конструкциях устройств подачи и перемешивания расплава. Результатом исследований стали поля температур и скоростей течения расплава в различных сечениях кристаллизатора. Установлены особенности и характер движения потоков расплава металла в объёме кристаллизатора.

Summary. The article summarizes some results of long-term studies of mathematical modeling of the liquid metal flow in the UNRS crystallizer with various designs of melt feeding and mixing devices. The results of the research were the fields of temperatures and flow rates of the melt in various sections of the crystallizer. The features and nature of the movement of metal melt flows in the crystallizer volume are established.

Ключевые слова: установка непрерывной разливки стали, кристаллизатор, глуходонный стакан, расплав, перемешивание, поля температур и скоростей.

Key words: installation of continuous casting of steel, crystallizer, gluhodon glass, melt, mixing, temperature and velocity fields.

УДК 621.74.043

Процесс разливки металла в установке непрерывной разливки стали (УНРС) заключается в подаче из промежуточного ковша жидкого металла через погружной керамический стакан и выходные отверстия (окна) в нём в водоохлаждаемый кристаллизатор прямоугольного сечения, а



также в его дальнейшем течении в объёме кристаллизатора. Течение потоков металла в кристаллизаторе оказывает влияние на температурное поле внутри кристаллизующейся заготовки, а значит, на макро- и микроструктуру конечного продукта. Вместе с этим кинематика потока расплава оказывает влияние на перемешивание жидкой фазы металла в кристаллизаторе УНРС.

Поэтому повышение качества готовой продукции за счёт технологичности процессов и совершенствования комплекса оборудования с целью увеличения его надёжности, устойчивости и производительности является и будет являться на ближайшую перспективу основополагающим направлением теоретических, экспериментальных исследований и производственных испытаний.

В задачах, где требуется исследование течения металла внутри кристаллизатора УНРС, поведение расплава необходимо описывать уравнениями Навье – Стокса и уравнением теплопроводности с учётом переноса тепла, что говорит о сложности решения подобных задач. Пока основным инструментом её исследования и оптимизации параметров разлива является эксперимент. Математическое моделирование применяется нечасто, в основном для решения задач, связанных с формированием затвердевающей корочки металла.

Во всех работах авторов настоящей статьи при определённых допущениях строится математическая модель, описывающая гидродинамические процессы в УНРС при моделировании новых разработанных способов подачи жидкого металла в кристаллизатор и его перемешивания в нём с целью обоснования их эффективности.

Математическая модель основывается на фундаментальных уравнениях сплошных сред, уравнениях математической физики, апробированном численном методе и специально разработанных программных комплексах.

Прикладное математическое моделирование процесса позволит значительно сократить продолжительность проверки и экспертизы того или иного технического решения и сэкономить существенные средства по экспериментальной проверке и отработке технического или технологического проекта.

Объединяющим началом всех публикаций авторов статьи по данному направлению исследований является то, что исследования проводятся по единой методологии построения математической модели и решения поставленных задач. Разница только в инженерной постановке задач (расчётные схемы), поставленных ограничениях в виде граничных условий. Такая методология построения математической модели использована при моделировании в различных областях для схожих технологических задач в процессах обработки металлов давлением [1; 2; 3] и напряжённо-деформированного состояния оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям [4; 5; 6]. Конечным результатом всех работ является построение полей температур жидкого металла и скоростей течения его потоков при подаче и перемешивании в различных зонах объёма кристаллизатора, поля температур и эпюры напряжений в оболочковых формах, поля температур и эпюры напряжений, скорости металла в деформируемой заготовке.

Учитывая, что построение математической модели, описывающей гидродинамические процессы в кристаллизаторе, уже полностью отражено в опубликованных работах [7–14] с использованием программного комплекса [15], авторы сочли правомерным не приводить их в настоящей работе, а порекомендовать читателям ознакомиться с ними в первоисточниках, что позволяет значительно сократить объём настоящей работы.

Все вычислительные расчёты проводятся с использованием широко апробированного численного метода. Его особенность заключается в том, что базисными неизвестными считаются средние характеристики величин напряжений, скоростей (перемещений) на гранях элементов, образованных системой ортогональных поверхностей, а не значения этих величин в узлах сетки. Полученные уравнения записываются в единообразной форме, не зависящей от вида ортогональных систем координат. При этом упрощается запись граничных условий задачи.

В последних работах авторов настоящей статьи заложены предпосылки и методология концептуального подхода по математическому моделированию процессов подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе, на базе которых продолжают развиваться разработки и исследования по моделированию новых разрабатываемых процессов.

Методология построения математической модели имеет свою строгую последовательность. На первом этапе обозначаются схема исследуемого процесса и устройства для его осуществления с описанием технологий и особенностей конструкции устройства.

На таком этапе инженерной постановки задачи в целях упрощения решения задачи принимаются различные ограничения по геометрии погружных стаканов и допущения, на основе которых строится формализованная расчётная схема процесса. Накладываются ограничения, с учётом которых записывается система дифференциальных уравнений в декартовой системе координат.

Для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) и стационарного течения ($\partial v / \partial t = 0$) имеем систему уравнений гидродинамики в виде закона количества движения и уравнения теплопроводности. Уравнения гидродинамики переписываются в систему уравнений течения ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости. Это нужно, чтобы использовать апробированный численный метод.

Далее накладываются начальные и граничные условия решения задачи.

Решение сформулированной системы уравнений осуществляется разработанными численными методами в соответствии с численными схемами и алгоритмами.

Задаются требуемые геометрические параметры кристаллизатора.

Из равенства секундных объёмов определяется скорость выхода потока металла из погружного стакана.

Тепловые потоки по стенкам кристаллизатора определяются аппроксимацией экспериментальных данных, взятых из работ авторов [7–14].

Далее проводятся вычисления, результаты которых представляются в виде полей скоростей течения жидкого металла в различных плоскостях.

При осесимметричном расположении выходных окон в погружном стакане имеют место относительно спокойные течение и заполнение объёма кристаллизатора жидким металлом, и его перемешивание.

При эксцентричных окнах в глухонном стакане отмечается уже более интенсивное перемешивание потоков жидкого металла в объёме кристаллизатора.

Дополнительным источником повышения интенсивности перемешивания жидкого металла в объёме кристаллизатора является свободное вращение самого глухонного стакана различного конструктивного исполнения за счёт реактивных сил выхода металла.

На этом возможности свободного вращения погружного стакана по повышению интенсивности перемешивания исчерпываются.

Поэтому было решено с целью дальнейшего повышения интенсивности использовать принудительное вращение глухонного стакана в разных вариантах.

Первоисходным основополагающим решением авторов по совершенствованию устройства подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС является работа [16], в которой предложена конструкция устройства, позволяющая совместить процессы подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе. Это решение послужило первоосновой будущих разработок по технологии процесса, а также оборудования для его осуществления.

Первые работы по исследованию в данном направлении проводились в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре) в середине нулевых годов, по результатам которых А. И. Горнаковым была защищена кандидатская диссертация по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» [17].

Затем в Комсомольском-на-Амуре государственном университете более 10 лет активно продолжались исследования как в теоретическом, так и конструкторско-технологическом плане [7; 8].

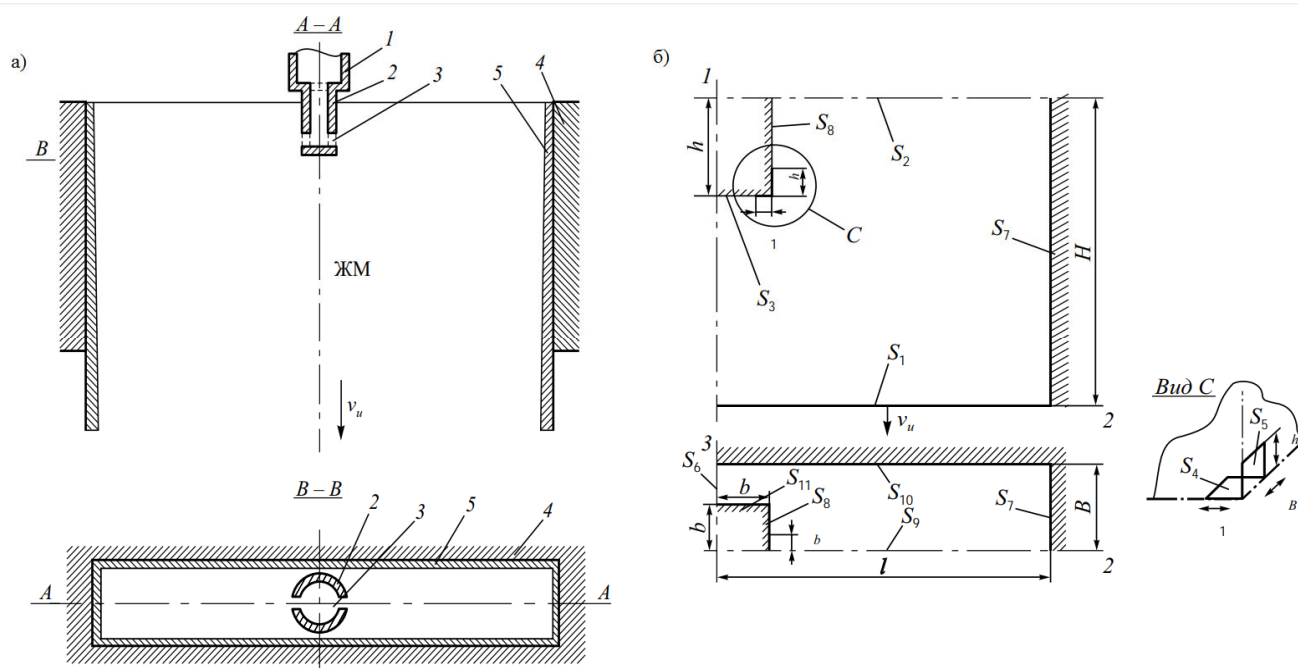
В теоретическом плане особое внимание сосредоточено на направлении исследований, связанном главным образом с прогнозным (предсказательным) имитационным математическим моделированием разрабатываемых процессов.

Анализ отечественной патентной и научно-технической литературы свидетельствует о том, что в настоящее время подобных исследований и разработок других исследователей в этом

направлении практически не отмечается, что подтверждает приоритетность исследований и разработок авторов.

Так, в первых опубликованных работах авторов [7; 8] были заложены основы численного моделирования подачи жидкого металла в кристаллизатор прямоугольного сечения из погружного стакана двумя симметричными струями и особенности его свободного течения в объёме кристаллизатора с использованием численного метода, предложенного в работе [18] и программного продукта [15], а в работе [14] – принудительного течения.

Для схемы установки (см. рис. 1, а) представлена формализованная и расчётная схемы исследуемого процесса (см. рис. 1, б), построены математическая модель, численная схема, алгоритм и программное обеспечение процесса. В результате вычислительных экспериментов по исследованию процесса построены поля температур (см. рис. 2, а) и скоростей потоков жидкого металла в кристаллизаторе (см. рис. 2, б, в).



1 – промежуточный ковш; 2 – погружной стакан; 3 – выходные отверстия погружного стакана; 4 – кристаллизатор; 5 – закристаллизовавшаяся корочка металла

Рис. 1. Схема исследуемой установки (а) и формализованная расчётная схема процесса (б)

В работе [9] и последующих с использованием вышеописанной методологии построения математической модели выполнены численные моделирования течения металла в кристаллизаторе при его истечении из погружного стакана уже с эксцентричными отверстиями вместо симметричных, а в работе [10] – при его подаче на отражатель по схеме [16].

Для вышеотмеченных работ характерно свободное истечение жидкого металла из погружного стакана в кристаллизатор и его течение в нём без использования эффекта вращения частей устройства. Приведены поля скоростей и температур металла в зоне кристаллизатора в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также зависимости длины вектора от скорости потока. Подтверждено предположение о более интенсивном перемешивании жидкой фазы при использовании стакана с эксцентрично расположенными выходными отверстиями.

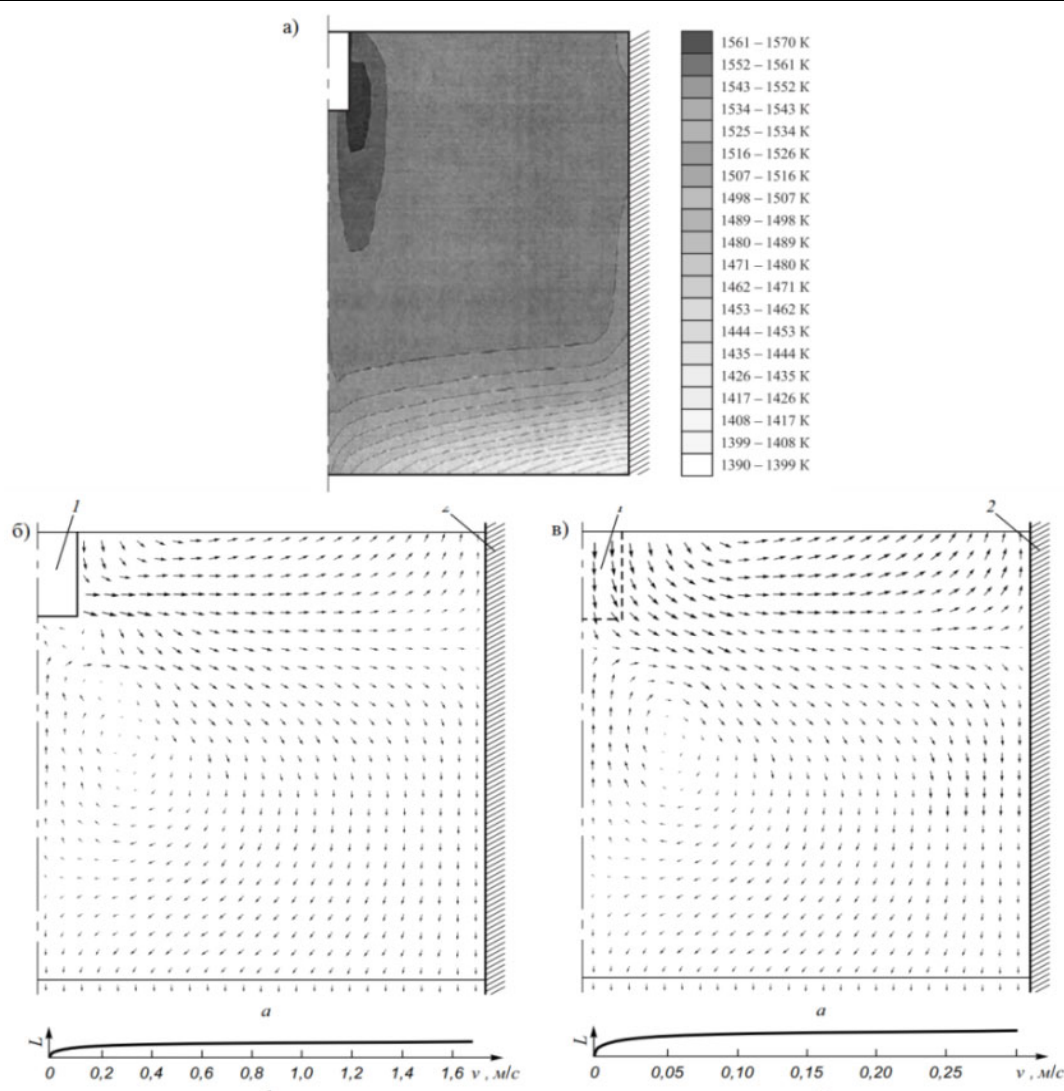


Рис. 2. Поле температур на границе S_9 (а), схема движения потоков металла на границе S_9 (б) и S_{10} (в) и зависимость длины вектора от скорости потока

В работах [11; 12] промоделирован процесс уже заполнения жидким металлом кристаллизатора УНРС при свободно вращающемся погружном стакане и эксцентричных выходных окнах [19]. Приведённые в работах потоки жидкого металла в объёме кристаллизатора указывают на эффективность предположенного технологического процесса заполнения кристаллизатора за счёт реактивных сил истечения металла из выходных окон. Интенсивным перемешиванием охвачен весь объём жидкого металла в кристаллизаторе.

В работе [13] представлена математическая модель нового процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС при принудительно вращающейся рубашке с вертикальными рёбрами и эксцентричными выходными окнами [20]. Показано, что при принудительном перемешивании жидкого металла в прямоугольном кристаллизаторе в продольном вертикальном сечении (см. рис. 3) и поперечном вертикальном сечении (см. рис. 4) отмечается интенсивное омывание стенок кристаллизатора, способствующее интенсивному отводу тепла от жидкого металла к стенкам кристаллизатора. В верхней части кристаллизатора наблюдается ускоренное движение потоков жидкого металла. На узких стенках кристаллизатора имеет место заброс жидкости металла (даже при $n = 30$ об/мин) в область шлаковой рубашки.

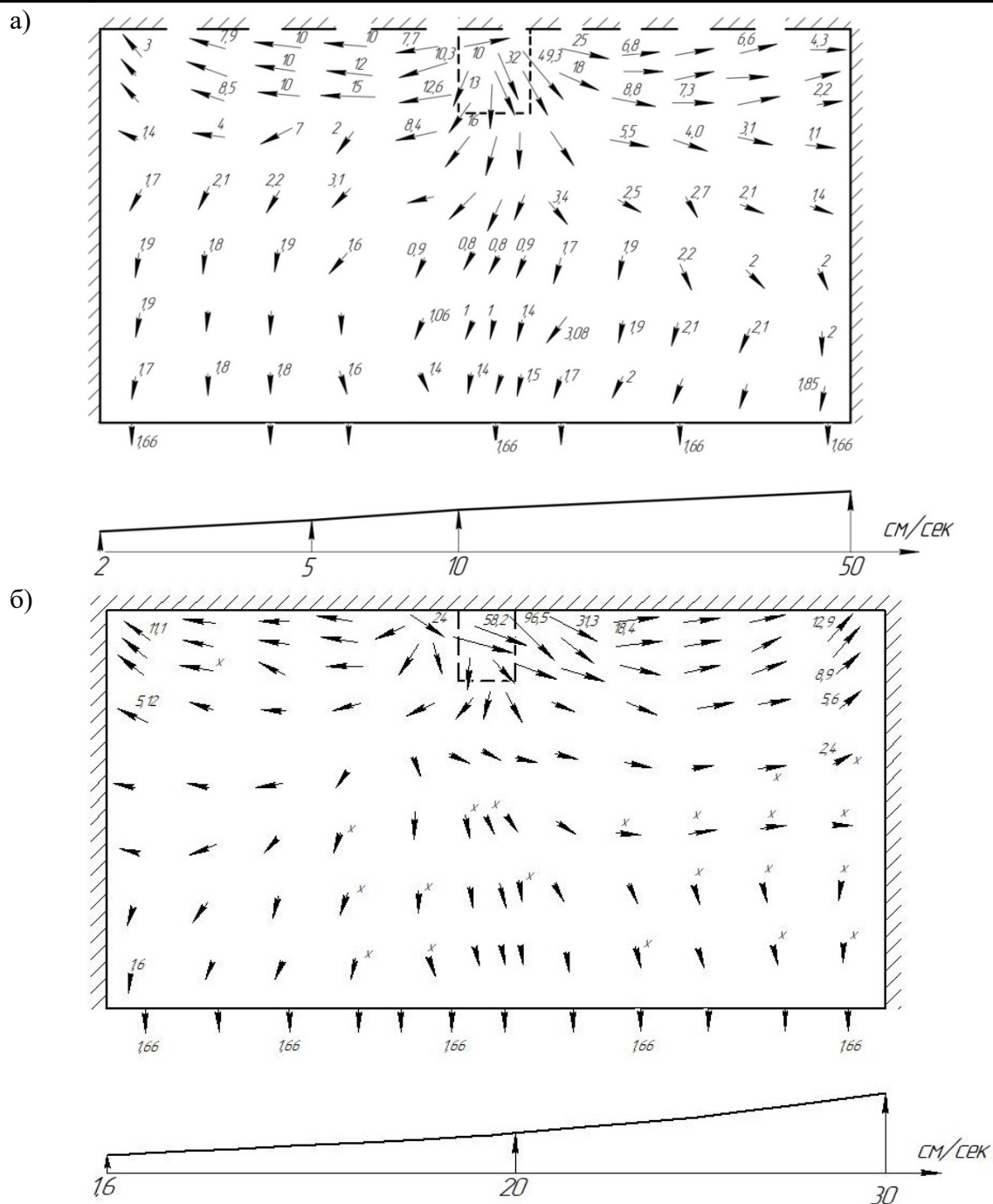


Рис. 3. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в продольном пристеночном вертикальном сечении: а – при $n = 30$ об/мин; б – при $n = 50$ об/мин

В работе [14] наиболее полно представлены результаты математического моделирования процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС при принудительном вращении рубашки с вертикальными рёбрами. Представлены вектора потоков жидкого металла в других различных сечениях кристаллизатора (в дополнение к сечениям [20]) при различных числах оборотов рубашки с вертикальными рёбрами. Выявлены области различной турбулентности. Оптимальный режим перемешивания происходит при $n = 30$ об/мин. При $n = 50$ об/мин и выше наблюдается выброс жидкого металла в шлаковую ванную.

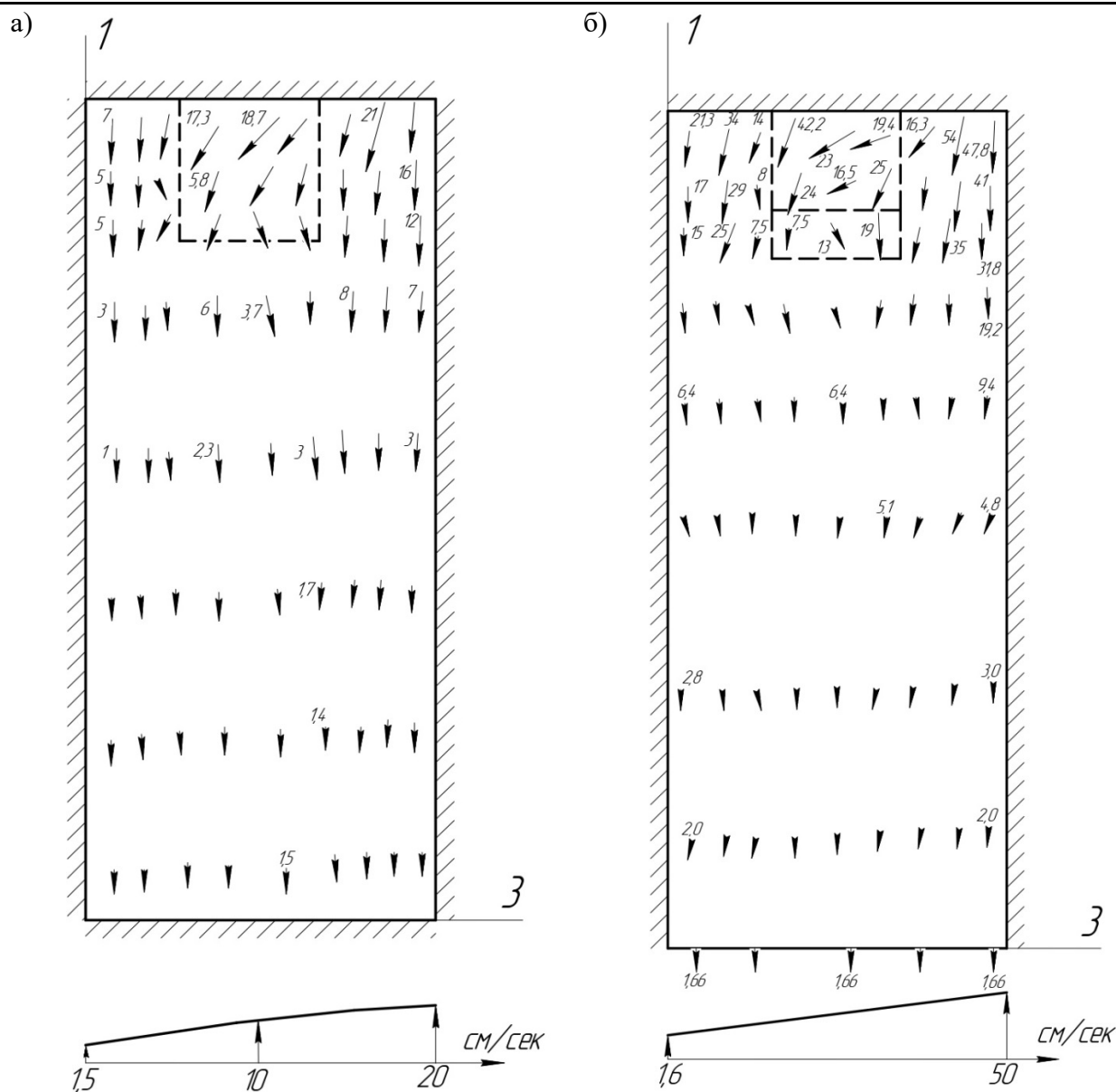


Рис. 4. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в поперечном центральном вертикальном сечении: а – при $n = 30$ об/мин; б – при $n = 50$ об/мин

Для устранения данного недостатка разработаны новые конструктивные решения устройств [21; 22].

А в работе [23] дан сравнительный анализ некоторых результатов математического моделирования свободного и принудительного перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС. Отмечены закономерности движения потоков жидкого металла в кристаллизаторе, характерные как для свободного, так и для принудительного перемешивания.

Так, для свободного перемешивания отмечается повышение интенсивности перемешивания при замене симметричных выходных окон на эксцентричные.

Интенсивность перемешивания значительно увеличивается при применении принудительного перемешивания и эксцентричных окон в глухонном стакане. Пороговым значением числа оборотов при таком процессе является 50 об/мин, при превышении которого отмечается заброс жидкого металла в область шлаковой рубашки. Замена эксцентричных окон при таком процессе на симметричные убирает вероятность таких забросов.



В перспективе следует ожидать новые подходы к разработке технологий подачи жидкого металла в кристаллизаторы УНРС и машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и характеров его течения и перемешивания в его объёме на основе новых конструктивных решений устройств подачи и перемешивания жидкого металла, которые будут также математически промоделированы.

Выводы:

1. Разработанные математические модели процесса подачи и течения жидкого металла в кристаллизаторах УНРС и МНЛЗ, численный алгоритм и программы расчёта могут быть использованы при проектировании опытных (экспериментальных) процессов и устройств для имитационного их моделирования.

2. Использованные подходы и методы расчёта могут быть полезны также при исследовании схожих процессов в металлургии и литейном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одинок, В. И. Моделирование процесса деформации металла на литейно-ковочном модуле / В. И. Одинок, Н. С. Ловизин, С. Ю. Скляр // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 22. – № 9. – С. 129-145.
2. Моделирование поля температур при получении металлоизделий на литейно-ковочном модуле с односторонним воздействием бокового бойка и неподвижной плитой / Э. А. Дмитриев, Д. А. Потянихин, В. И. Одинок, А. И. Евстигнеев, А. Е. Квашнин // Математическое моделирование и численные методы. – 2022. – № 2. – С. 63-77.
3. Математическое моделирование процесса деформации металла на литейно-ковочном модуле с изменённым приводом боковых бойков / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, Д. А. Потянихин, А. Е. Квашнин // Математическое моделирование и численные методы. – 2021. – № 3. – С. 3-23.
4. Влияние внешнего теплового воздействия на напряжённое состояние оболочковых форм по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, Е. П. Иванкова, А. В. Свиридов // Математическое моделирование. – 2021. – Т. 33. – № 1. – С. 63-76.
5. Моделирование внешнего силового воздействия на стойкость оболочковой формы при заливке в неё стали / А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев, В. И. Одинок, Д. В. Чернышова, А. А. Евстигнеева, Е. П. Иванкова // Математическое моделирование. – 2022. – Т. 34. – № 5. – С. 61-72.
6. Одинок, В. И. Эволюция напряжённого состояния керамической формы при нестационарном внешнем тепловом воздействии / В. И. Одинок, Г. М. Севастьянов, И. Г. Сапченко // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 22. – № 11. – С. 97-108.
7. Одинок, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 493-499.
8. Евстигнеев, А. И. Моделирование заполнения жидким металлом кристаллизатора установки непрерывной разливки стали и машины непрерывного литья заготовок / А. И. Евстигнеев, В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев. – 2018 International Boot Market Service Ltd., member of Omniscryptum Publishing Group. – 56 с.
9. Одинок, В. И. Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 606-612.
10. Одинок, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора с отражателем УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 747-755.
11. Моделирование нового способа подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, С. Ю. Александров // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 3. – С. 237-243.
12. Математическое моделирование процесса заполнения жидким металлом кристаллизатора УНРС при свободно вращающемся погружном стакане / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, С. Ю. Александров // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 302-310.
13. Одинок, В. И. Моделирование нового процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2023. – Т. 66. – № 6. – С. 733-742.

14. Одинокое, В. И. Математическое моделирование процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали / В. И. Одинокое, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Математическое моделирование и численные методы. – 2023. – № 3. – С. 18-41.
15. Математическое моделирование гидродинамики расплава в машине непрерывного литья заготовок. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614547 / Одинокое В. И., Горнаков А. И. – № 2022614547: заявлено 30.03.2012; опубликовано 22.05.2012.
16. Патент № 196254 Российская Федерация, МПК В22D 11/10(2006.01). Устройство для подачи жидкого металла в вертикальный кристаллизатор установки непрерывной разливки стали через погружной прямой стакан: № 2019128247: заявлено 12.03.2018; опубликовано 21.02.2020 / Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – Бюл. 15.
17. Горнаков, А. И. Моделирование процесса движения жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывного литья стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Горнаков Антон Игоревич. – Комсомольск-на-Амуре, 2013. – 16 с.
18. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокое, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков [и др.]. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
19. Патент № 2741611 Российская Федерация, МПК В22D 11/114 (2006.01), В22D 41/62 (2006.01). Устройство подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: № 2020108729: заявлено 27.02.2020; опубликовано 27.01.2021 / Одинокое В. И., Дмитриев Э. А., Евстигнеев А. И., Александров С. Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 7 с.
20. Патент № 2764446 Российская Федерация, МПК В22D 11/114 (2006.01), В22D 41/62 (2006.01). Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: № 2021114411: заявлено 20.05.2021; опубликовано 17.01.2022 / Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Александров С. Ю., Карпенко В. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 7 с.
21. Патент № 2814101 Российская Федерация, МПК В22D 11/114 (2006.01). Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: № 2023112363: заявлено 11.05.2023; опубликовано 22.02.2024 / Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Карпенко В. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – Бюл. 6.
22. Моделирование принудительного процесса перемешивания металла в кристаллизаторе УНРС при симметричных окнах в глухонном стакане / В. И. Одинокое, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев, В. А. Карпенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 15-22.
23. Патент № 2813189 Российская Федерация, МПК В22D 11/114 (2006.01), В22D 41/62 (2006.01). Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: № 2023112365: заявлено 11.02.2023; опубликовано 10.02.2024 / Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Карпенко В. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – Бюл. 4.
24. Одинокое, В. И. Анализ результатов численного моделирования эффективности свободного и принудительного перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС / В. И. Одинокое, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Металлург. – 2024. – № 2. – С. 76-81.



Дзюба В. А., Арсентьева К. А., Журавлева Е. В.
V. A. Dzyuba, K. A. Arsenteva, E. V. Zhuravleva

ПАРАМЕТРЫ ДИАГРАММ «МОМЕНТ-КРИВИЗНА» ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С АРМАТУРОЙ А500 НА СТАДИИ БЛИЗКОЙ К РАЗРУШЕНИЮ

PARAMETERS OF «MOMENT-CURVATURE» DIAGRAMS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH A500 REINFORCEMENT AT THE STAGE CLOSE TO DESTRUCTION

Дзюба Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: dzyuba456@mail.ru.

Viktor A. Dzyuba – PhD in Engineering, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin St., 27. E-mail: dzyuba456@mail.ru.

Арсентьева Ксения Александровна – студент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: dika44512@gmail.com.

Ksenia A. Arsenteva – Student, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin St., 27. E-mail: dika44512@gmail.com.

Журавлева Екатерина Викторовна – аспирант кафедры «Авиационное строительство» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: minskaya_ekaterina@mail.ru.

Ekaterina V. Zhuravleva – Graduate Student, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin St., 27. E-mail: minskaya_ekaterina@mail.ru.

Аннотация. Приведены результаты исследований пластических деформаций железобетонных конструкций на стадии близкой к разрушению с использованием диаграмм «момент-кривизна». Установлены значения деформаций бетона и арматуры, соответствующие началу и концу пластической стадии на диаграмме «момент-кривизна», и параметры ниспадающего участка этих диаграмм для разных величин относительной высоты сжатой зоны и классов бетона. Определена протяжённость пластического участка железобетонного элемента при различных процентах армирования и классах бетона, влияющая на перераспределение усилий. Для исследуемых элементов предложены кусочно-линейные диаграммы «момент-кривизна».

Summary. The results of studies of plastic deformations of reinforced concrete structures at the stage close to failure using «moment-curvature» diagrams are presented. The values of concrete and reinforcement deformations corresponding to the beginning and the end of the plastic stage on the «moment-curvature» diagram and the parameters of the descending section of these diagrams for different values of the relative height of the compressed zone and concrete classes have been determined. The extent of the plastic section of a reinforced concrete element at different percentages of reinforcement and concrete classes, influencing the redistribution of forces, is determined. Piecewise linear diagrams «moment-curvature» are proposed for the investigated elements.

Ключевые слова: арматура, текучесть, предельная деформация, изгибная жёсткость, физическая нелинейность, кривизна, нисходящая ветвь.

Key words: reinforcement, fluidity, ultimate deformation, bending stiffness, physical nonlinearity, curvature, descending branch.

Исследование выполнено за счёт гранта Министерства образования и науки Хабаровского края № 42С/2023.

УДК 624.94.012.45

Введение. Учёт пластических свойств железобетона позволяет выявить резервы прочности конструктивной системы и повысить технико-экономическую эффективность проектных решений [1; 2; 13]. Поэтому исследования, направленные на совершенствование методов проектирования зданий с учётом неупругих свойств железобетона, являются актуальными [7; 12; 14]. Деформационные свойства сечения при изгибе определяются зависимостью между изгибающим моментом и кривизной. Расчёт несущей системы с учётом физической нелинейности основан на применении таких зависимостей с описанием для них параметров пластичности, предельной кривизны и ниспадающего участка на диаграмме «момент-кривизна».

Постановка задачи исследования. Характер диаграммы деформирования зависит от степени армирования, класса бетона и других факторов. Особое значение для диаграммы «М- κ » имеет поведение продольной арматуры, поэтому в данной работе экспериментально изучались деформационные свойства арматурной стали класса А500. Автоматизированный расчёт диаграмм при изгибе выполнялся по деформационной расчётной модели [3; 9; 10; 11]. При этом зависимости для сжатого и растянутого бетона принимались согласно [4] с учётом работ [6; 8].

Выполнение исследований. Программа исследований включала в себя изучение поведения железобетонных элементов с размерами поперечного сечения 60×20 см и арматурой класса А500 на стадии близкой к разрушению и оценку их пластических свойств. В процессе машинных экспериментов варьировались те параметры, которые влияют на пластические свойства железобетонных элементов при изгибе: класс бетона, относительная высота сжатой зоны и процентное содержание продольной арматуры. Поперечное армирование при определённых условиях тоже может существенно изменить поведение железобетонного элемента в стадии псевдопластического деформирования, влияя на работу сжатого бетона, что мы наблюдали в проведённых ранее экспериментах [5]. Диаграмма состояния растянутой арматуры принималась по результатам испытаний на машине INSTRON арматурной стали класса А500 диаметром 12 мм, изготовленной Комсомольским-на-Амуре металлургическим предприятием ООО «Амурсталь». Средние по образцам деформации в начале и в конце площадки текучести составили соответственно $2,9 \times 10^{-3}$ и $19,8 \times 10^{-3}$ при значении предела текучести 555 МПа.

На первом этапе оценивалось влияние класса бетона. Были построены полные диаграммы «момент-кривизна» для разных классов бетона при трёх значениях относительной высоты сжатой зоны:

1. $\xi = 0,1$. Характер зависимостей был сохранён для всех классов бетона. Все графики имели восходящий участок, пластическую стадию и ниспадающий участок. Программный комплекс позволил оценивать изменение напряжённо-деформированного состояния сечения на всех этапах расчёта. Для восходящего участка отмечались незначительное снижение жёсткости за счёт нелинейной работы растянутого бетона до образования трещин и изменение угла наклона графика «М- κ » после появления трещин. Ключевой точкой на диаграмме является точка, при которой начинается пластическая стадия. Деформации бетона на крайнем сжатом волокне и растянутой арматуры в этот момент обозначены $\varepsilon_{b1,pl}$ и $\varepsilon_{s1,pl}$ соответственно, а кривизна – $\kappa_{1,pl}$. Расчёты показали, что для всех классов бетона величина $\varepsilon_{b1,pl}$ практически не изменялась (см. табл. 1) и может рассматриваться как фиксированный параметр. В вычислениях для изгибаемых элементов при других размерах сечений (45×15 см и 90×30 см) с такими же классами бетона и значением $\xi = 0,1$ деформация $\varepsilon_{b1,pl}$ осталась без изменений. Деформации растянутой арматуры в момент начала пластической стадии сечения $\varepsilon_{s1,pl}$ равны деформациям в начале площадки текучести на диаграмме растяжения арматуры и всегда считаются известными при диаграммном методе расчёта.

Деформации бетона на крайнем сжатом волокне и в растянутой арматуре в момент, соответствующий окончанию пластической стадии на диаграмме «М- κ », обозначены $\varepsilon_{b2,pl}$, $\varepsilon_{s2,pl}$, а кривизна – $\kappa_{2,pl}$. Как показали машинные эксперименты, деформация $\varepsilon_{b2,pl}$ также является фиксированной величиной (см. табл. 1) при $\xi = 0,1$ независимо от размеров сечения. Деформация растяну-



той арматуры при кривизне $\varepsilon_{2,pl}$ соответствует значению деформации в конце площадки текучести экспериментальной диаграммы растяжения арматуры.

Таблица 1

Деформации параметрических точек «момент-кривизна»

Класс бетона	Деформации параметрических точек ($\varepsilon \cdot 10^3$)					$\Delta M, \%$
	$\varepsilon_{b1,pl}$	$\varepsilon_{b2,pl}$	ε_{b1}	ε_{b2}	ε_{s2}	
B20	0,8	2,6	1,6	7,8	13,1	9,40
B40	0,9	2,7	1,7	6,2	10,4	8,07
B60	1,0	2,8	1,8	5,2	8,71	6,67

В расчётах железобетонных элементов при малых значениях $\xi = 0,1$ после достижения в растянутой арматуре деформаций $\varepsilon_{s2,pl}$ фиксировалась стадия так называемой псевдопластичности, что соответствует ранее проведённым испытаниям сжато-изогнутых элементов [8]. Результаты расчётов показали, что арматура после текучести переходит работать в зону упрочнения. Высота сжатой зоны бетона, которая уменьшалась при текучести арматуры, начинает расти и уравнивает увеличение усилия в арматуре. Это приводит к незначительному росту изгибающего момента, образуя стадию псевдопластичности. На дальнейших этапах расчёта суммарное усилие в сжатом бетоне за счёт разрушения краевых волокон начинает снижаться, точка приложения этого усилия смещается к растянутой грани элемента, а в растянутой арматуре начинается разгрузка. Этот процесс определяет ниспадающую ветвь на диаграмме «момент-кривизна» при разрушении сечения (см. рис. 1, а).

Предельную кривизну в конце стадии псевдопластичности обозначим ε_3 и введём параметр k_{ε} как коэффициент, учитывающий стадию псевдопластического деформирования. Тогда кривизна $\varepsilon_3 = \varepsilon_{2,pl} \cdot k_{\varepsilon}$, где значения k_{ε} равны 2,7; 2,1; 1,8 соответственно для бетонов класса B20, B40 и B60 по результатам проведённых машинных экспериментов. Таким образом, суммарная протяжённость пластического участка при бетоне B20 на 21 % больше, чем при бетоне B40, и на 32 % больше, чем при бетоне B60, что определяется непосредственно диаграммами сжатия бетона. Предельные деформации бетона с увеличением его класса снижаются, а ниспадающая ветвь становится более крутой, что и приводит к уменьшению предельной кривизны железобетонных элементов для более прочных бетонов.

2. $\xi = 0,25$. В этом машинном эксперименте рассматривались железобетонные элементы с такой же диаграммой рабочей арматуры, размерами сечения и классами бетона. Относительная высота сжатой зоны принималась меньше граничной. Аналогично элементам с $\xi = 0,1$, полученные диаграммы имели три основных участка: восходящий, пластический и ниспадающий. На восходящем участке сохранялась практически линейная зависимость до момента образования трещин, а также и после образования трещин, но уже с пониженной жёсткостью. Кривизны в начале и в конце пластического участка обозначены $\varepsilon_{1,pl}$ и $\varepsilon_{2,pl}$. Поведение этой группы образцов в пластической стадии отличалось от образцов, рассчитанных при $\xi = 0,1$, т. к. увеличилось количество арматуры. Поэтому к началу пластической стадии ($\varepsilon_{1,pl}$) деформации сжатого бетона и высота сжатой зоны были более значительными, чем в первых расчётах. Как и в первой серии, деформация на крайнем сжатом волокне ε_{b1} для элементов с различными размерами поперечного сечения имела фиксированное значение, практически не зависящее от класса бетона (см. табл. 1). Деформации растянутой арматуры в сечении при вычислении $\varepsilon_{1,pl}$ равны деформациям ε_s в начале площадки текучести диаграммы « $\sigma_s - \varepsilon_s$ ». В пластической стадии работы элемента усилие в арматуре оставалось постоянным, соответствующим пределу текучести. Однако изгибающий момент при этом начинал снижаться на 7-9 % к концу пластической стадии (см. табл. 1), т. к. уменьшался момент сжатой зоны. Это связано с более равномерным напряжением волокон сжатой зоны и меньшей способностью их к перераспределению в пределах сечения при высоком значении ξ . За окончание пластической стадии предложено принимать кривизну $\varepsilon_{2,pl}$. При этой кривизне начинается разгрузка растянутой

арматуры (см. рис. 1, б). Деформации арматуры ε_{s2} и соответствующие им деформации бетона на крайнем сжатом волокне ε_{b2} приведены в табл. 1. Значения ε_{b2} в этом случае не остаются постоянными, как при $\xi = 0,1$, а зависят от класса бетона, т. к. арматура не успевает пройти полностью площадку текучести и начало разгрузки арматуры определяется неупругими свойствами сжатого бетона. Поэтому величины ε_{b2} и ε_{s2} снижаются с повышением класса бетона. На этапе ниспадающей ветви происходит дальнейшая разгрузка арматуры, напряжения в краевых волокнах сжатого бетона равны нулю и нейтральная ось перемещается к растянутой арматуре.

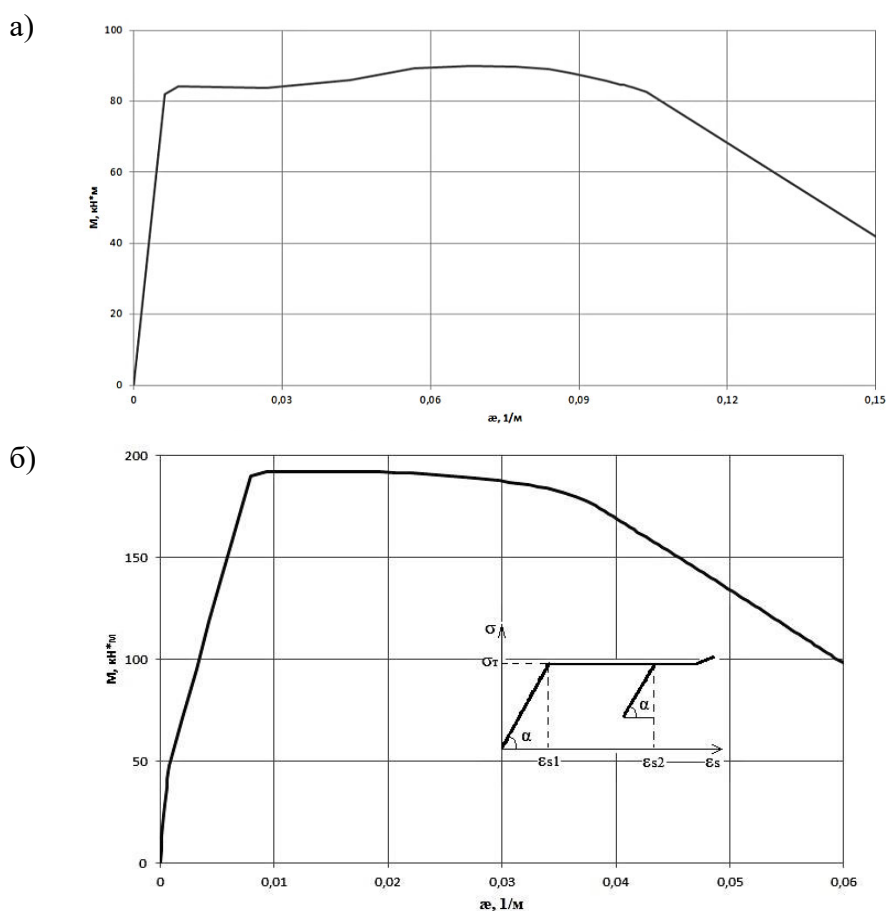


Рис. 1. Полные диаграммы «момент-кривизна» для железобетонных элементов с арматурой А500: а – при $\xi = 0,1$; б – при $\xi = 0,25$

3. $\xi = 0,5$. Расчёт железобетонных элементов показал, что их поведение полностью соответствует работе переармированных сечений. Арматура работала в упругой стадии, за исключением расчёта при бетоне класса В20, где она смогла достигнуть начала текучести. Пластичность сечений в этом случае отсутствовала, и характер диаграммы «момент-кривизна» полностью определялся деформативностью сжатого бетона.

Для оценки пластических свойств на стадии близкой к разрушению проведены машинные эксперименты образцов с процентами армирования 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0; 2,5 и тремя классами бетона В20, В40 и В60. В результате расчёта двадцати одного элемента с размерами поперечного сечения 60×20 см построены полные (с ниспадающим участком) диаграммы «момент-кривизна», выполнен анализ деформационных параметров в пластической стадии. Для каждого элемента определена протяжённость пластического участка L_{pl} .

Элементы при низком классе бетона имели ограниченную пластическую зону, и уже при μ более 1 % арматура работала только в упругой стадии. Для бетонов высокой прочности пластическая зона сохранялась и при больших процентах армирования, но имея естественную тенденцию к

снижению с увеличением μ . Определяющим параметром в поведении сечения, достижении максимальных деформаций и пластичности является, как известно, относительная высота сжатой зоны, которая в совокупности учитывает и влияние армирования, т. к. $\xi = R_s \cdot \mu / R_b$. При неоднородном напряжённом состоянии по высоте сечения появляется возможность перераспределения усилий между волокнами сжатой зоны, что способствует реализации пластических свойств арматуры А500. Пластичность каждого элемента оценивали параметром L_{pl} , который вычислялся как разность кривизны в конце и в начале пластического участка. Дополнительно также определялись значения $\Delta \sum \epsilon$ – разность суммы деформаций крайнего сжатого волокна и растянутой арматуры в конце и в начале пластического участка без учёта рабочей высоты сечения.

Для элементов из бетона класса В20 наибольшая пластичность наблюдалась при низком проценте армирования (0,5 %). При большем проценте начинало расти значение ξ и снижалась пластичность сечения. При проценте армирования равном 1 длина пластического участка на диаграмме «момент-кривизна» для образца из бетона В20 была соответственно в четыре и три раза меньше, чем для бетонов В60 и В40. В образцах с более высокой прочностью бетона рост ξ замедлялся, сохраняя протяжённый пластический участок с увеличением процента армирования. Наличие такого участка очень важно для расчёта несущих систем с учётом физической нелинейности и перераспределения усилий. У элементов из бетона В40 и В60 хорошие показатели пластичности сохранялись до 1,5 % (см. рис. 2). Таким образом, бетон В40, В60 с высокими показателями прочности позволяет арматуре А500 реализовать свои пластические свойства, делая конструкцию прочной и пластичной. Следует учитывать, что дополнительное поперечное армирование сжатой зоны может являться фактором, увеличивающим пластичность бетона и конструкции в целом.

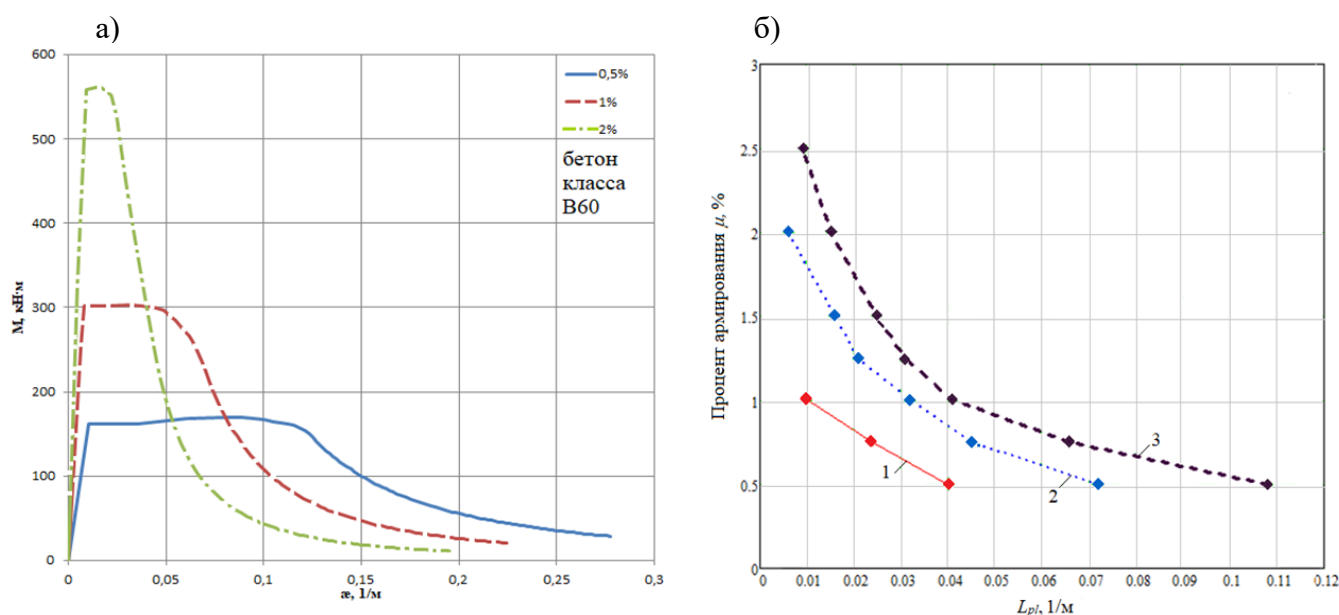


Рис. 2. Влияние процента армирования: а – на полные диаграммы «момент-кривизна»; б – на длину пластического участка; 1 – для бетона В20; 2 – для бетона В40; 3 – для бетона В60

Трансформируем нелинейные диаграммы «момент-кривизна» с пластическими участками в кусочно-линейную модель. Восходящая ветвь диаграммы состоит из двух линейных функций. Первая функция описывает зависимость «М– ϵ » до образования трещин. Начальная расчётная изгибная жёсткость соответствовала жёсткости приведённого сечения, вычисленной по требованиям норм. Момент образования трещин M_{crc} определяли при деформации на крайнем растянутом волокне, равном $1,5 \cdot 10^{-4}$. А кривизна в этой точке ϵ_{crc} вычислялась как отношение M_{crc}/B_o , где B_o – начальная изгибная жёсткость приведённого сечения. Вторая функция восходящего участка определяется координатами (M_{crc} , ϵ_{crc} ; M_{pl} , $\epsilon_{1,pl}$). Пластический участок при $\xi = 0,1$ имеет три характерные кривизны $\epsilon_{1,pl}$, $\epsilon_{2,pl}$ и ϵ_3 , которые вычисляются по формулам

$$\alpha_{1,pl} = (\varepsilon_{b1,pl} + \varepsilon_{s1,pl}) / h_o; \quad \alpha_{2,pl} = (\varepsilon_{b2,pl} + \varepsilon_{s2,pl}) / h_o; \quad \alpha_3 = \alpha_{2,pl} \cdot k_{\alpha},$$

где $\varepsilon_{s1,pl}$, $\varepsilon_{s2,pl}$ – деформации арматуры, соответствующие началу и концу площадки текучести на диаграмме « σ_s – ε_s »; $\varepsilon_{b1,pl}$, $\varepsilon_{b2,pl}$ – деформации бетона на крайнем сжатом волокне, принимаемые на основе проведенных машинных экспериментов по табл. 1; k_{α} – коэффициент, учитывающий псевдопластичность сечения и принимаемый в зависимости от класса бетона по данным выполненных машинных экспериментов; приращение изгибающего момента на этой стадии не учитывается в запас прочности (см. рис. 3, а).

Кусочно-линейная модель диаграммы «момент-кривизна» при $\xi = 0,25$ на пластическом участке имеет две характерные кривизны $\alpha_{1,pl}$ и $\alpha_{2,pl}$, вычисляемые по формулам

$$\alpha_{1,pl} = (\varepsilon_{b1} + \varepsilon_{s1,pl}) / h_o; \quad \alpha_{2,pl} = (\varepsilon_{b2} + \varepsilon_{s2}) / h_o,$$

где $\varepsilon_{s1,pl}$ – деформация арматуры, соответствующая началу площадки текучести на диаграмме « σ_s – ε_s »; ε_{s2} – деформация в арматуре в момент начала разгрузки (см. рис. 1, б), принимаемая по табл. 1; ε_{b1} и ε_{b2} – деформации бетона на крайнем сжатом волокне, принимаемые на основе проведенных машинных экспериментов по табл. 1.

На пластическом участке учитывается снижение изгибающего момента (см. рис. 3, б). Процент уменьшения момента M_{pl} до значения M_2 при кривизне $\alpha_{2,pl}$ приведен в табл. 1. Значения коэффициента $k_{0,5}$ для вычисления кривизны $\alpha_{0,5} = k_{0,5} \cdot \alpha_{2,pl}$ при изгибающем моменте $0,5M_{pl}$ приведены в табл. 2.

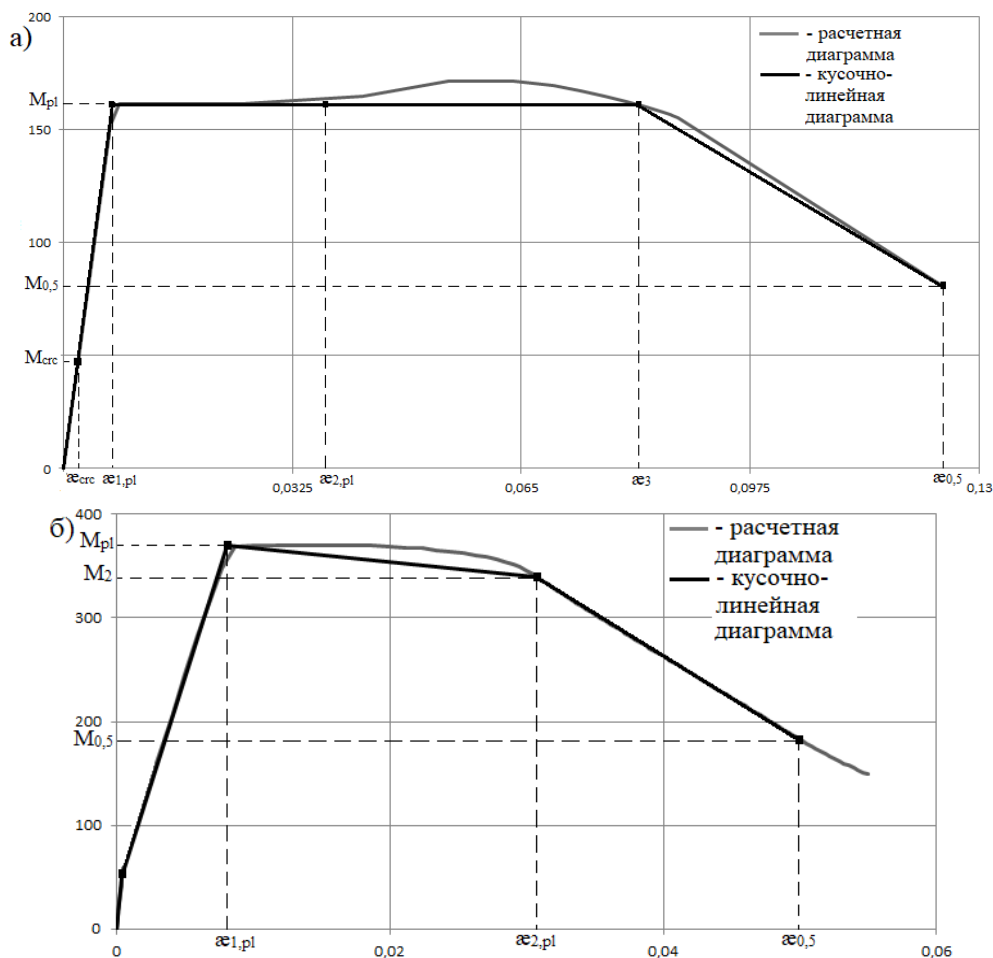


Рис. 3. Кусочно-линейные диаграммы «момент-кривизна»
а – при $\xi = 0,1$; б – при $\xi = 0,25$



Значения коэффициента $k_{0,5}$

Класс бетона	При $\xi = 0,1$	При $\xi = 0,25$
B20	4,03	1,55
B40	3,34	1,596
B60	2,87	1,67

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко, В. М. Расчётные модели силового сопротивления железобетона / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 472 с.
2. Дзюба, В. А. Исследование пластических свойств арматурных сталей / В. А. Дзюба, Е. В. Журавлева // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 143-145.
3. Дзюба, В. А. Исследование предельных деформаций железобетонных элементов с муфтовыми соединениями арматуры / В. А. Дзюба, И. В. Погорельских, О. А. Сайдамирова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 88-92.
4. Дзюба, В. А. Применение составной функции диаграммы сжатого бетона для деформационной оценки конструкций / В. А. Дзюба, Ю. С. Глушакова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № II-1 (18). – С. 109-114.
5. Дзюба, В. А. Экспериментальные исследования предельных деформаций гибких сжато-изогнутых колонн / В. А. Дзюба // Проблемы индустриализации строительства общественных зданий: сборник научных трудов. – М.: ЦНИИП реконструкции городов, 1989. – С. 44-56.
6. Дроздов, П. Ф. Прочность каркасных диафрагм / П. Ф. Дроздов, В. А. Дзюба, Л. Л. Паньшин // Бетон и железобетон. – 1985. – № 2. – С. 23-24.
7. Карпенко, Н. И. К построению общей методики расчёта статически неопределимых стержневых железобетонных конструкций на основе метода конечных элементов / Н. И. Карпенко, Т. А. Мухамедиев, М. А. Сапожников // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1990. – № 2. – С. 195.
8. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
9. Кодыш, Э. Н. Влияние параметров идеализированных диаграмм деформирования бетона на расчётные значения прочности, трещиностойкости и деформаций изгибаемых и внецентренно сжатых элементов / Э. Н. Кодыш, Н. Н. Трекин, Д. Н. Трекин // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону. В 7 т. Т. 1. – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2014. – С. 69-75.
10. Мурашкин, Г. В. Применение диаграмм деформирования для расчёта несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов / Г. В. Мурашкин, С. С. Мордовский // Жилищное строительство. – 2013. – № 3. – С. 38-40.
11. Радайкин, О. В. К построению диаграмм деформирования бетона при одноосном кратковременном растяжении/сжатии с применением деформационного критерия повреждаемости / О. В. Радайкин // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 6 (65). – С. 71-78.
12. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003: свод правил: издание официальное: исполнитель – АО «НИЦ «Строительство» – НИИЖБ имени А. А. Гвоздева / утверждён Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр. – М.: Стандартинформ, 2019. – 118 с.
13. Тамразян, А. Г. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках / А. Г. Тамразян, Б. Т. Рашидов // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 6 (80). – С. 14-21.
14. Травуш, В. И. Расчёт параметра живучести рамно-стержневых конструктивных систем / В. И. Травуш, Н. В. Федорова // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 1 (45). – С. 21-28.

Маслов В. И., Куделько А. Р.

РАЗРАБОТКА НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЫ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ

Маслов В. И., Куделько А. Р.

V. I. Maslov, A. R. Kudelko

**РАЗРАБОТКА НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ
СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЫ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ**

**DEVELOPMENT OF DIRECTIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF INNOVATION
ACTIVITIES IN ENERGY SUPPLY OF Khabarovsk Region Social Sphere**

Маслов Владислав Игоревич – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Vladislav I. Maslov – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Куделько Анатолий Романович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Anatoly R. Kudelko – PhD in Engineering, Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы, связанные с решением проблемы нерационального расхода энергетических ресурсов, обусловленного неконтролируемой подачей тепла в многоквартирные дома. Предлагаемая инновационная автоматизированная система распределения энергоресурсов позволяет значительно снизить издержки потребителей за счёт оптимизации расхода тепловых ресурсов внутри дома. Рассмотрены мероприятия, ориентированные на оборудование (переоборудование) многоквартирных домов системой с автоматическим регулированием подачи тепловой энергии [1], а также на оборудование домов «умными» приборами учёта для автоматического сбора и передачи информации о потреблённых ресурсах в расчётные и расчётно-кассовые центры. В результате достигаются значительное упрощение процесса сбора и учёта информации по потреблённым ресурсам, снижение оплаты за энергоресурсы, а именно за тепловую энергию и содержание общедомового имущества. Вместе с этим обеспечивается достоверность переданных данных и проверка адекватности работы системы распределения энергоресурсов.

Summary. The paper discusses issues related to solving the problem of irrational consumption of energy resources caused by the uncontrolled supply of heat to apartment buildings. The proposed innovative automated system for distributing energy resources can significantly reduce consumer costs by optimizing the consumption of thermal resources inside the house. Measures focused on equipping (re-equipping) apartment buildings with a system with automatic control of the supply of thermal energy, as well as equipping houses with “smart” metering devices for automatically collecting and transmitting information about consumed resources to settlement and cash settlement centers are considered. As a result, a significant simplification of the process of collecting and recording information on consumed resources is achieved, reducing payments for energy resources, namely for thermal energy and the maintenance of common property. At the same time, the reliability of the transmitted data and verification of the adequacy of the operation of the energy distribution system is ensured.

Ключевые слова: интеллектуальные приборы учёта, автоматизированный тепловой пункт, технология передачи данных, технология учёта потребления энергоресурсов, моделирование.

Key words: intelligent metering devices, automated heating point, data transmission technology, energy consumption metering technology, modeling.

УДК 64-52

Введение. Рассматриваемая проблема соответствует приоритетным направлениям развития техники и технологий в Российской Федерации исходя из Указа Президента РФ от 07 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ».



Вместе с этим в силу вступило Постановление Правительства РФ от 3 февраля 2022 г. № 92 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам предоставления коммунальных услуг и содержания общего имущества в многоквартирном доме». В текущих условиях развития технологий, в перспективе, это необходимое нововведение для потребителей тепловой и электрической энергии. В настоящее время всё больше продуктов как бытового, так и общего пользования входят в так называемый «Интернет вещей». И со временем неизбежно будет происходить автоматизация в этой сфере, т. к. в этом заинтересованы как производители и поставщики ресурсов, так и их потребители.

Целью работы является формирование отдельных направлений повышения эффективности инновационной деятельности по энергетическому обеспечению социальной сферы Хабаровского края. Одним из таких направлений является переоборудование многоквартирных домов (МКД) на систему автоматизированного распределения энергетических ресурсов [2], таких как тепловая энергия и горячее водоснабжение, а также оборудование МКД интеллектуальными инновационными приборами учёта потреблённых ресурсов, включая холодное водоснабжение.

Анализ состояния дел в сфере обеспечения промышленных, социальных и других объектов электрической энергией и тепловыми энергетическими ресурсами. Исследована структура корпоративной инновационной системы и инновационной деятельности АО «ДГК» – филиала предприятия ПАО «РусГидро» в Хабаровском крае. Инновационная система ПАО «РусГидро» представлена как часть региональной инновационной системы, взаимодействующей с правительством Хабаровского края и являющейся, по сути, отраслью энергетики в регионе.

Основными функциональными подсистемами инновационной системы являются кадровый отдел, научно-технический совет и отдел развития. Кадровый отдел позволяет обеспечивать инновационную деятельность хозяйствующего субъекта необходимыми кадрами. Научно-технический совет определяет необходимость нововведений и технико-экономические характеристики инновационных проектов. Также научно-технический совет проводит апробацию элементов и результатов инновационной деятельности. Отдел развития определяет вектор нововведений и цели инновационной деятельности хозяйствующего субъекта.

Основные компоненты обеспечивающей инфраструктуры реализуют инновационную деятельность управления необходимыми ресурсами и средствами. Генеральный директор утверждает инновационную политику организации, а также определяет главную цель инновационной деятельности хозяйствующего субъекта. Кадровый резерв АО «ДГК» напрямую зависит от компонентов внешней среды, а именно от сторонних компаний, влияющих на инновационную деятельность, таких как ISERV. ПАО «РусГидро» в данном случае выступает на правах учредителя и обеспечивает высший уровень управления инновационной деятельностью.

Также важным компонентом структуры инновационной системы является внешняя среда. Сторонние организации, выступающие в роли инициаторов инновационной деятельности, могут перенаправлять свои инициативы в инновационную деятельность рассматриваемого хозяйствующего субъекта. Портал инвестиций и Министерство экономического развития Хабаровского края являются вспомогательными (обеспечивающими) компонентами рассматриваемой инновационной системы и позволяют привлекать (способствуют привлечению) инвесторов к своей инновационной деятельности, а также определяют её приоритетные направления посредством утверждения инвестиционных программ.

Государственные структуры содействия инновациям выступают в роли регулятора региональной инновационной деятельности и определяют её направления вплоть до национальной инновационной системы. Также данные структуры обеспечивают инновационный климат путём проведения всевозможных конкурсов и мероприятий.

Исследование проблем учёта и передачи данных о потреблённых ресурсах. На сегодняшний день существует явная проблема достоверного учёта данных о потреблённых коммунальных ресурсах. Одной из важнейших проблем в сфере жилищно-коммунального хозяйства является высокая степень износа основных фондов, инженерных систем и сетей. Вместе с этим увеличивается количественный показатель аварийного жилья. Ввиду низкой степени интеграции ин-

новаций в регионе существует проблема низкой энергоэффективности в сфере обеспечения жилищно-коммунального и социально-культурного секторов энергетическими ресурсами. Это связано как с несанкционированными подключениями, так и с устареванием систем учёта потреблённых коммунальных ресурсов. Таким образом, при снятии показаний с общедомовых приборов учёта ресурсоснабжающие организации получают огромную разницу между индивидуальным и общедомовым потреблением. Кроме того, в связи изменением нормативно-методических требований по обеспечению потребителей энергоресурсами управляющие организации теперь обязаны выставлять эту разницу потребителям пропорционально занимаемым ими жилым площадям в платёжных документах. В Хабаровском крае весомая часть жилого фонда попросту не оборудована общедомовыми приборами учёта.

Степень интеграции и основные проблемы инновационной системы, возможные пути решения. Степень интеграции системы управления с другими системами менеджмента оценивается как низкая. Связано это прежде всего с крайне низким уровнем инновационного климата, и при всех благоприятных условиях бизнес неохотно внедряет новую технику и технологии в своё производство. Несмотря на значительное число научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также опытных образцов, до внедрения в массовое производство доходят лишь единичные инновационные проекты.

Основная проблема инновационной системы заключается в низкой степени интеграции системы управления инновационной деятельностью на этапах внедрения в массовое производство инновационных решений и/или продуктов. Как сказано выше, теоретически множество проблем уже проработано и исследовано. Со стороны государства предоставляется множество программ по направлениям повышения энергоэффективности и снижения затрат. Формируется, заявляется и в определённой степени осуществляется множество инвестиционных проектов, но реализуется лишь малая часть инновационных проектов и решений.

Возможным путём для решения данной проблемы считается перевод и/или переоборудование социально-жилищного и производственно-технического секторов на использование автоматизированного оборудования учёта потреблённой энергии с возможностью удалённой передачи данных о потреблённых ресурсах. Современные приборы учёта избавляют ресурсоснабжающие и управляющие организации от недостоверных данных учёта, что, в свою очередь, избавляет от необходимости усложнившегося взаимодействия между участниками отрасли энергетики и жилищно-коммунального хозяйства. Регуляторы автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов позволяют избавиться от «перетоков» в отопительный период, что значительно повысит экономические показатели от инновационной деятельности. Приоритетным считается полное переоборудование многоквартирного дома на автоматизированный тепловой пункт и автоматические приборы учёта. Также приоритетным считается оборудование новых многоквартирных домов предложенным оборудованием. В настоящее время оснащение новых домов современным оборудованием считается нормой, а степень интеграции инновационного продукта в новых домах считается целесообразной и оценивается достаточно высоко.

Перечисленные мероприятия позволяют избавиться от устаревшего оборудования и потерь энергоресурсов, а также значительно упростить учёт потреблённых ресурсов и со временем окупить затраты на инновации в связи с сокращением расходов на обслуживание устаревшего оборудования [3].

Обоснование, выбор и характеристика инновационного продукта. В работе в качестве инновационного продукта с соответствующей инновационной технологией рассматривается продукт, исследованный в научной статье [4]. Вместе с этим в этой же статье проанализированы основные отличия продукта от ближайших аналогов и отражены его основные функциональные возможности. Проверка поведения системы отражает адекватность её поведения при заданных условиях. Также в работе [4] определены основные элементы теплового пункта (ТП).

Одним из основных преимуществ рассматриваемой системы над аналогами является то, что предлагается комплексное решение по установке автоматизированных тепловых пунктов совместно с интеллектуальными внутриквартирными приборами индивидуального учёта, снабжёнными

автоматической передачей данных о потреблённых ресурсах. Также работа подразумевает разработку модуля формирования QR-кода для удалённой оплаты потреблённых коммунальных ресурсов. Вместе с этим приборы учёта оборудованы датчиками магнитов для идентификации фактов наличия несанкционированного потребления энергоресурсов, что исключает несанкционированные подключения, а автоматическая передача данных исключает разницу в показаниях между управляющими и ресурсоснабжающими организациями.

Структура разрабатываемой системы распределения тепловых энергоресурсов и проверка адекватности поведения предлагаемого решения. В ходе исследования в среде MATLAB проведены обучение, корректировка и тестирование нечётких систем.

Приведя систему в визуально воспринимаемый вид, можно протестировать её с помощью тестовой выборки и получить результаты, представленные на рис. 1. Инструмент *anfisedit* позволяет тестировать ранее синтезированные нейро-нечёткие системы. Необходимость тестирования обусловлена методологией синтеза нейро-нечётких систем.

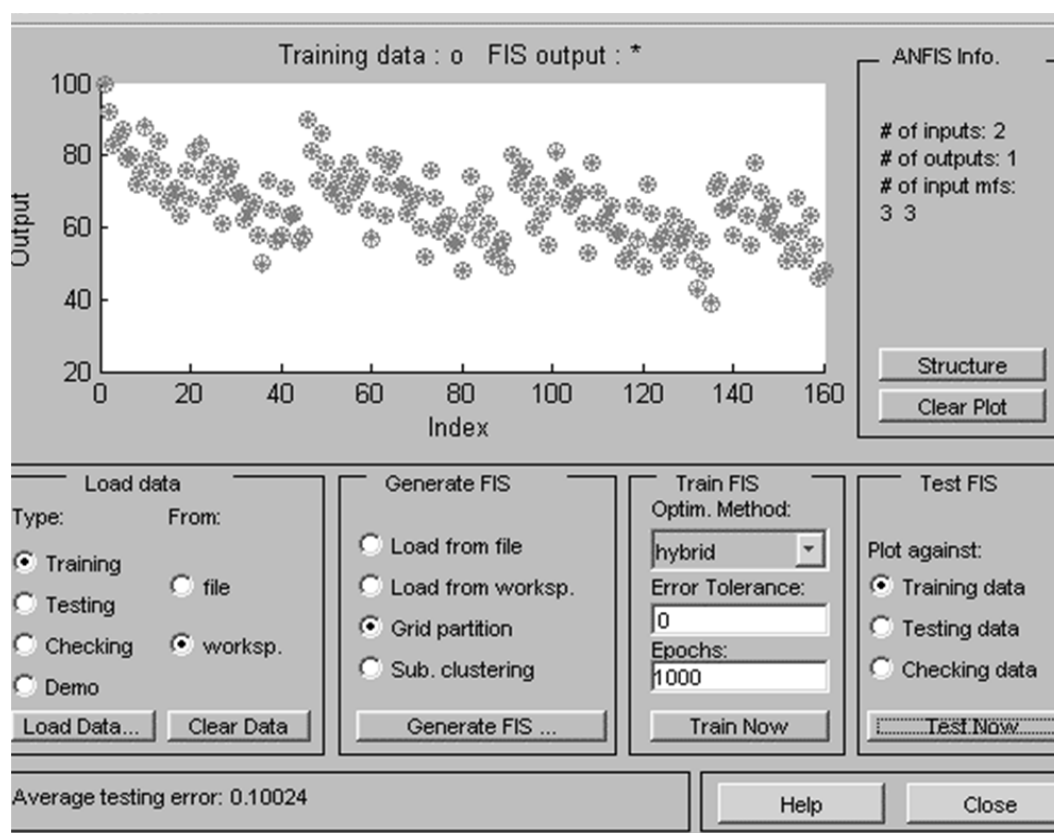


Рис. 1. Результат тестирования нечёткой системы с помощью тестовой выборки

Проведено моделирование структуры системы для оценки работы автоматизированной системы распределения тепловых энергоресурсов (см. рис. 2).

Как следует из рис. 2, в структуре системы имеется 6 входящих лингвистических переменных первого уровня, которые имеют выход в две промежуточные переменные, которые формируют одну выходную переменную, формирующую оценку температуры в помещении.

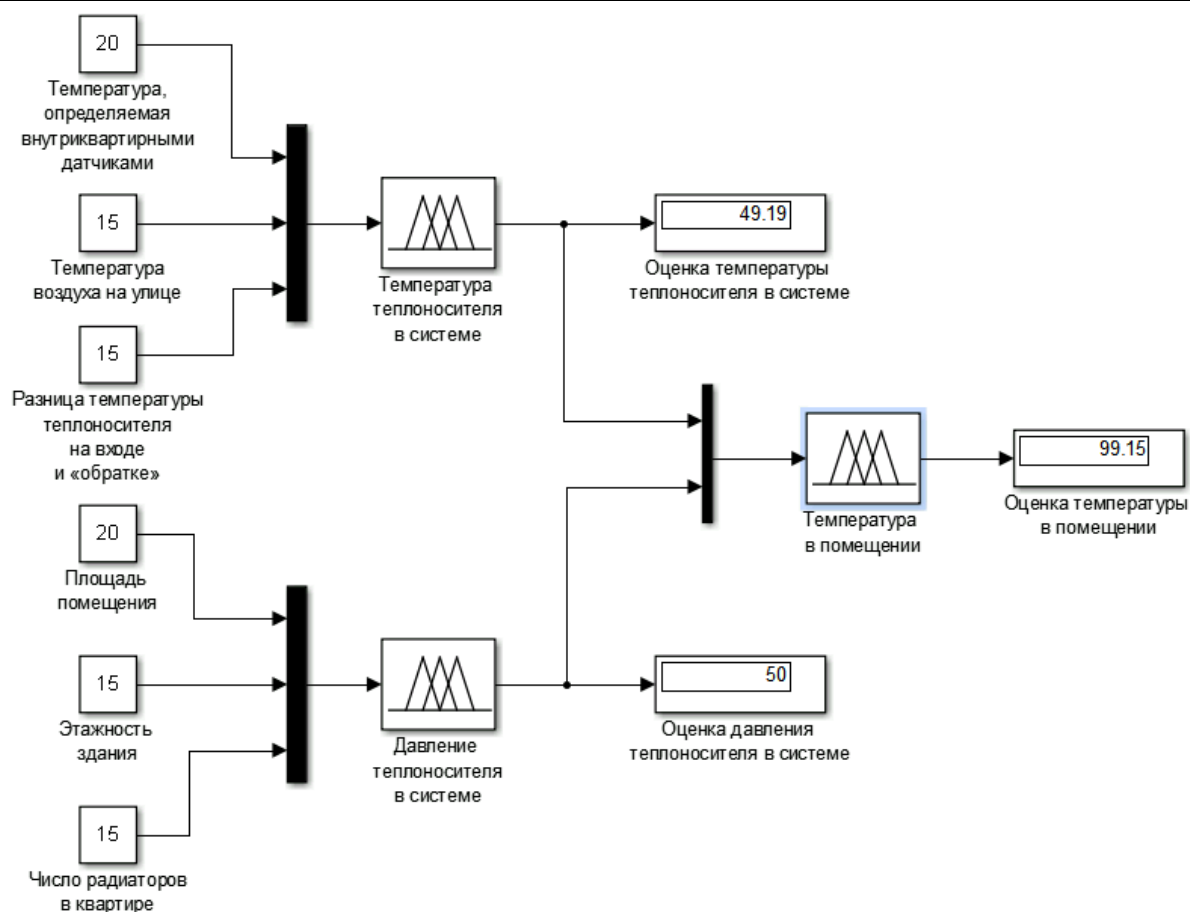


Рис. 2. Структура системы для оценки работы автоматизированной системы

Используя результаты исследований модели системы нечёткого выбора, построенной на примере интеллектуальной системы отопления помещения, описания и декомпозиции процесса отопления, проверки поведения системы при различных входящих условиях, визуализации поведения системы, а также структуру характеризующих систему показателей [4], можно утверждать, что поведение системы является адекватным при разных вариантах развития событий. При помощи заданных правил система даёт адекватную оценку входящим параметрам и правильно распределяет энергоресурсы. На рис. 3 изображена визуализация результатов моделирования системы.

С целью рассмотрения и планирования процесса производства инновационного продукта разработана процессная модель производства продукта, контекстная модель которой представлена на рис. 4. Исследована типовая процедура по установке автоматизированной системы распределения энергетических ресурсов в многоквартирном доме [5].

Декомпозиция процесса определяет необходимость выделения ряда ключевых этапов или процессов, основными из которых являются:

- определение целей и задач системы распределения энергетических ресурсов;
- анализ потребностей пользователей и законодательных требований;
- определение основных функций системы распределения энергетических ресурсов;
- разработка алгоритмов и моделей для эффективного распределения энергетических ресурсов;
- разработка интерфейсов и взаимодействия между компонентами системы;
- разработка программного обеспечения и аппаратных компонентов системы;
- интеграция компонентов системы и тестирование их работоспособности;
- установка и запуск системы в многоквартирных домах.

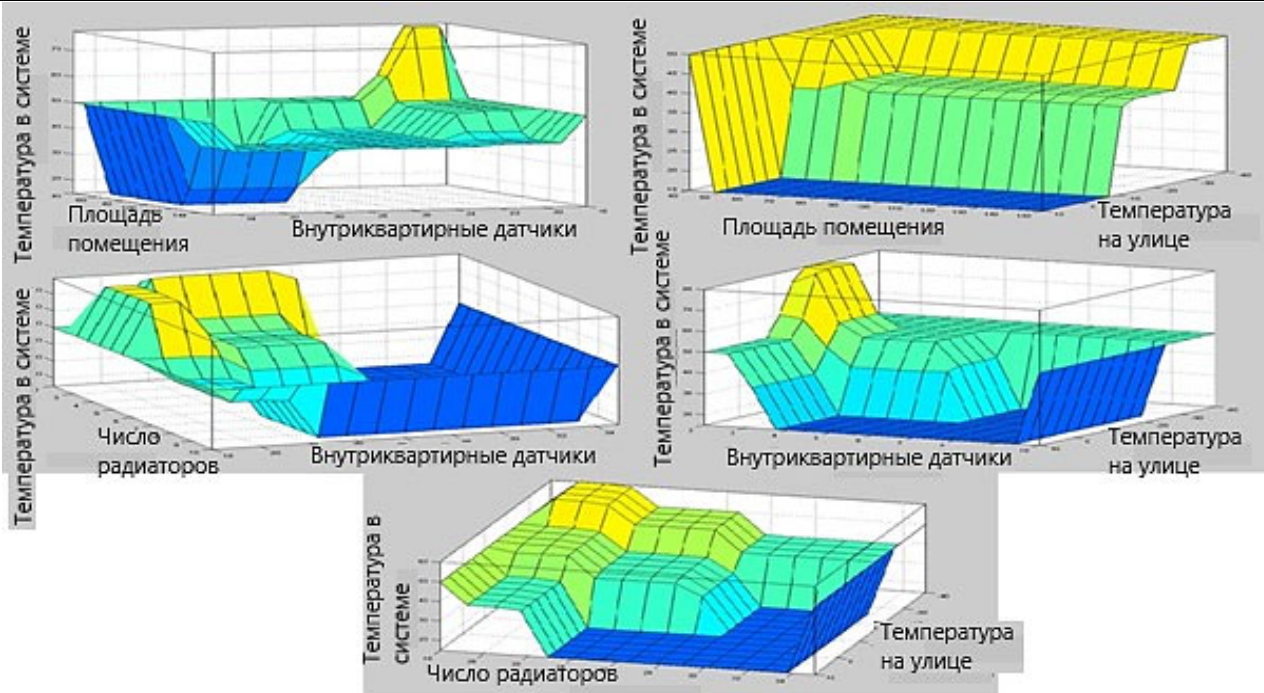


Рис. 3. Визуализация результатов моделирования системы

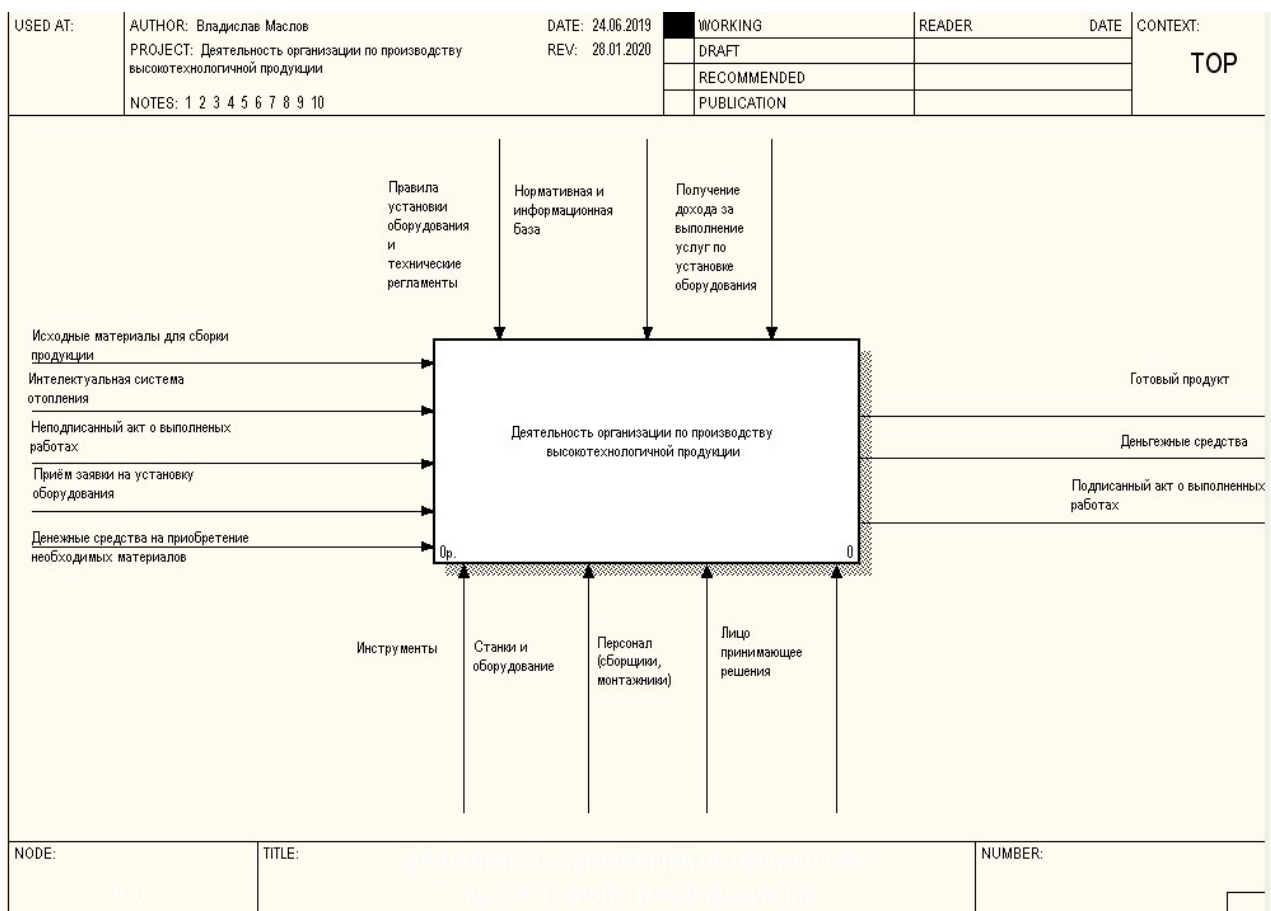


Рис. 4. Контекстная модель производства инновационного продукта

Заключение. В ходе работы осуществлён комплексный анализ и оценка текущего состояния и тенденций изменения средств автоматизации и мониторинга процессов потребления тепловой и электрической энергии.

Исследована проблематика учёта данных о потреблённых коммунальных ресурсах в жилищном секторе. Представлены обоснование, структура и характеристика инновационного продукта, а также возможность реализации рассматриваемого продукта. Возможные решения и соответствующие корректирующие сигналы управления, формируемые автоматизированной системой распределения тепловых энергетических ресурсов, смоделированы с помощью программы MATLAB.

Проведено исследование процессной модели производства инновационного продукта. Результаты исследования могут быть использованы при определении и формировании совокупности процессов производства, а также их организационно-управленческого и технико-технологического обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированное управление процессом централизованного теплоснабжения распределённого комплекса зданий с учётом моделирования этих процессов / А. Н. Потапенко, Е. А. Потапенко, А. С. Солдатенков, А. О. Яковлев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2007. – № 7-8. – С. 120-134.
2. Алимкулова, С. Р. Автоматизация индивидуальных тепловых пунктов / С. Р. Алимкулова, Э. Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – 78 с.
3. Ищенко, А. С. Повышение энергоэффективности тепловых пунктов / А. С. Ищенко, Н. Е. Сафонов, Н. В. Колосова // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2021. – № 3 (24). – С. 6-10.
4. Куделько, А. Р. Инновационная автоматизированная система распределения энергоресурсов с подсистемой регистрации данных по потреблённым коммунальным ресурсам / А. Р. Куделько, В. И. Маслов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI международной научно-практической конференции молодых учёных. В 2 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 369-373.
5. Маслов, В. И. Разработка и освоение производства инновационного продукта для учёта и передачи данных о потреблённых энергетических ресурсах / В. И. Маслов, А. Р. Куделько // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 415-418.



Ворощенко В. Д., Горькавый М. А.
V. D. Voroshchenko, M. A. Gorkavyu

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В РОБОТИЗИРОВАННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

MODELING OF MOVING OBJECT COLLISIONS IN ROBOTIC TECHNOLOGICAL PROCESS

Ворощенко Василий Данилович – студент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: v.voroshchenko@yandex.ru.

Vasilii D. Voroshchenko – Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: v.voroshchenko@yandex.ru.

Горькавый Михаил Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Mikhail A. Gorkavyu – PhD in Engineering, Head of Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Аннотация. В представленной работе ставится актуальный вопрос разработки имитационной модели роботизированного техпроцесса. Основным требованием к модели является имитация столкновений. Для реализации столкновений необходимо обеспечить идентификацию коллизий между движущимися объектами и формирование управляющих сигналов остановки имитации движений. Для решения первой задачи был выбран подход аппроксимации робота и человека набором примитивов. Были представлены визуализация положения в пространстве ключевых узлов человека и робота, а также применяемый подход наложения сфер между узлами для создания имитации физической оболочки. Был предложен алгоритм идентификации коллизий между звеньями, принадлежащими разным объектам, и формирования управляющих сигналов остановки. Управляющие сигналы осуществляют остановку имитации движений столкнувшихся звеньев. Работоспособность представленного подхода и алгоритмов также была продемонстрирована.

Summary. The presented work raises the actual question of developing a simulation model of a robotic process. The main requirement for the model is the simulation of collisions. For realization of collisions it is necessary to provide their identification between moving objects and formation of control signals for stopping simulation of movements. To solve the first problem we chose the approach of approximation of robot and human by a set of primitives. The visualization of the position in space of the key nodes of the human and robot was presented, as well as the approach of overlapping spheres between the nodes to create a simulation of the physical shell. An algorithm for identifying collisions between links belonging to different objects and generating stop control signals was proposed. The control signals stop the simulation of colliding links' movements. The performance of the presented approach and algorithms was also demonstrated.

Ключевые слова: идентификация коллизий, имитация столкновений, коллаборативная робототехника, автоматизация, имитационное моделирование.

Key words: collision identification, collision simulation, collaborative robotics, automation, simulation modeling.

Исследование выполнено в рамках научного проекта, финансируемого за счёт средств Российского научного фонда (проект № 22-71-10093).

УДК 681.5.017

Введение. Один из самых распространённых методов повышения эффективности предприятия – автоматизация посредством роботизации производства. Но для повышения эффективности контроля и регулирования производственных процессов следует внедрять коллаборативные робо-

тизированные ячейки, позволяющие человеку непосредственно влиять на выполняющиеся роботизированные процессы. Коллаборативные процессы предполагают под собой работу человека и робота в паре для того, чтобы использовать сильные стороны друг друга и нивелировать недостатки.

На существующий момент потенциал эффективного взаимодействия робота с человеком полностью не раскрыт [1]. Представляются актуальными вопросы разработки методов взаимодействия человека с роботом, способов непосредственного управления роботом для увеличения эффективности сотрудничества [2]. Современные решения коллаборативного взаимодействия включают технологии дополненной реальности [3; 4; 5], цифровых двойников для мониторинга параметров состояния субъектов управления и формирования управляющих воздействий [5; 6], оптимизацию и планирование траекторных перемещений [7; 8], мультимодальные системы управления [9; 10; 11], снижение времени исполнения технологических операций [12].

На данный момент научное сообщество занимается разработкой интеллектуальных алгоритмов управления коллаборативным роботом (коботом), основанных на физическом воздействии человека как при прямом контакте, так и при различных положениях (жестикуляции), тем не менее область полностью не раскрыта. Для исследования возможностей физического влияния предлагается прибегнуть к моделированию таких взаимодействий. В связи с этим появляется необходимость в разработке имитационной модели, которая обеспечит возможность проведения адекватного моделирования технологических процессов (техпроцессов) для принятия решений в реальном времени в рамках одновременного исполнения техпроцесса и непрерывной симуляции [12; 13].

Помимо функционала управления положениями моделируемых объектов с графическим отображением (см. рис. 1, а) и функционала математического расчёта кинематики и геометрии, модель должна регистрировать коллизии человека и робота. В связи с этим ставится цель: разработать функционал идентификации коллизий и моделирования столкновений.

Задачи для достижения цели:

- определить целесообразный подход идентификации коллизий между объектами;
- адаптировать алгоритмы идентификации коллизий;
- реализовать использование данных о наличии коллизий в сигналы остановки имитации движений.

Методология. В качестве метода расчёта кинематики человека был использован метод Денавита – Хартенберга (ДХ). Метод позволил рассчитать необходимые координаты положения сочленений в пространстве для реализации алгоритмов. Целесообразно использовать этот метод для унификации расчёта кинематики. Это упростит в дальнейшем вопросы интеграции алгоритмов поиска коллизий, расчёта динамики и т. д.

При проведении анализа подходов к определению коллизий в модели роботизированного техпроцесса был выявлен наиболее распространённый: подход представления человека и робота примитивами [14; 15; 16]. Подход заключается в аппроксимации сложных объектов (робот, человеческая рука) до набора точек с последовательно наложенными сферами. В результате формируется поверхность с низкой степенью кривизны, идентичная поверхности звеньев человека. Определение коллизии происходит за счёт сравнения положения в пространстве сфер одного объекта со сферами другого.

Поскольку текущие исследования в области моделирования роботизированных процессов для формирования интеллектуальных систем управления основаны на объектно-ориентированном подходе [12; 17], было принято решение использовать для реализации алгоритмов высокоуровневые языки программирования C++/Matlab/Python. Автоматизацию расчёта кинематики предлагается осуществлять на базе Matlab, предоставляющей возможность визуализации как результатов математических моделей в 2D- и 3D-формате, так и 3D-модели человека с помощью заданной структуры 3D-примитивов (Simscape Multibody).

Симуляция модели в статичном состоянии была выполнена с помощью дискретного решателя; в динамике, при имитации движений – с помощью решателя нежёстких систем дифференциальных уравнений (ДУ) среднего порядка точности. Полученная модель также пригодна и для решателя жёстких систем ДУ.

Основная часть. Для создания функционала идентификации коллизий необходимо в режиме реального времени отслеживать положение каждого сочленения человека и робота в пространстве. Под сочленением понимается соединение двух звеньев. Расположение в пространстве этого соединения и необходимо учитывать.

В данном случае положение определяется в декартовой системе координат. Совокупность положений таких соединений образует собой конструкцию, состоящую из суставов, применительно как к роботу, так и к человеку (см. рис. 1, б).

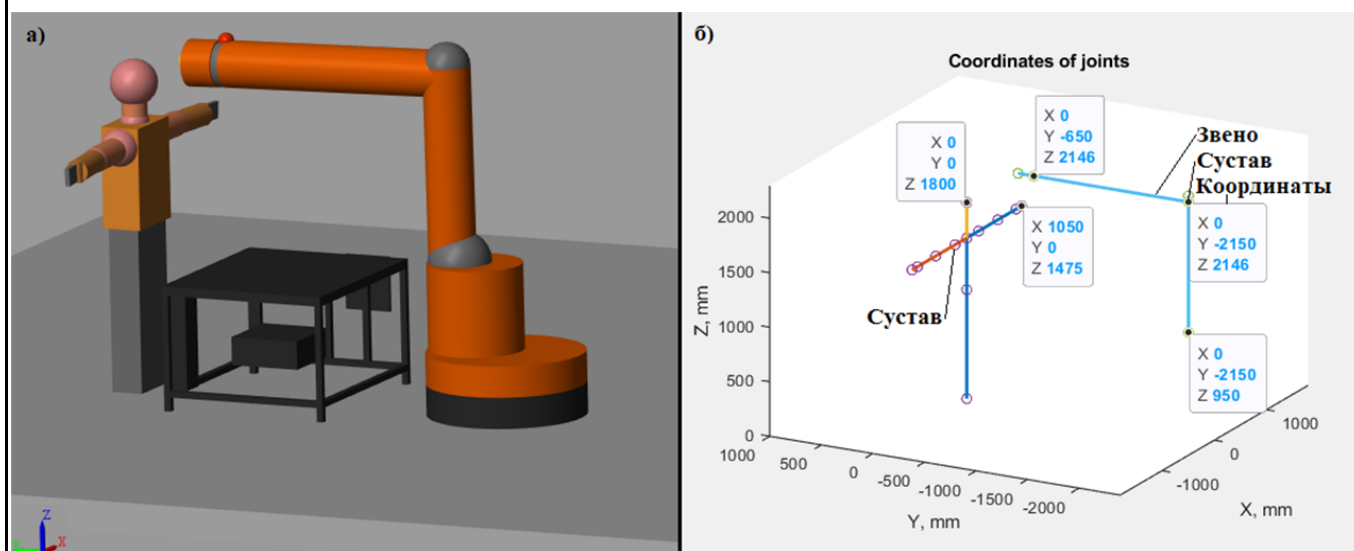


Рис. 1. Отображение модели: а – визуализация моделируемых объектов; б – отображение положения суставов модели человека и робота

Используя координаты этих суставов, необходимо отложить между смежными суставами промежуточные точки в пространстве, равномерно расположенные на линии соединения. Каждая линия соединения принадлежит отдельному звену. Таким образом, для каждого звена существует свой набор точек.

Эти точки являются центрами сфер, внутри которых осуществляется поиск сфер других звеньев, например, в радиусе сфер, принадлежащих звеньям модели человека, осуществляется поиск сфер, принадлежащих звеньям модели робота. Так создаётся имитация поверхности объектов сложной конфигурации (см. рис. 2). Поверхность из сфер имеют модель робота, руки, шея и голова модели человека, а тело аппроксимировано фигурой параллелепипеда.

Далее для определения коллизии одного объекта с другим необходимо проверить условие для центра каждой сферы:

$$r_{l,i}^o + r_{l',i}^o \geq \sqrt{(x_{l,i}^o - x_{l',i}^o)^2 + (y_{l,i}^o - y_{l',i}^o)^2 + (z_{l,i}^o - z_{l',i}^o)^2},$$

где $r_{l,i}^o$ – радиус сферы, относительно которой определяется коллизия; $r_{l',i}^o$ – радиус сферы другого звена, с которым осуществляется поиск коллизии; o – номер, определяющий объект (модель человека или робота); l – порядковый номер звена, относительно которого определяется коллизия; l' – порядковый номер звена, с которым осуществляется поиск коллизии; i – порядковый номер сферы; x, y, z – координаты центра первой сферы.

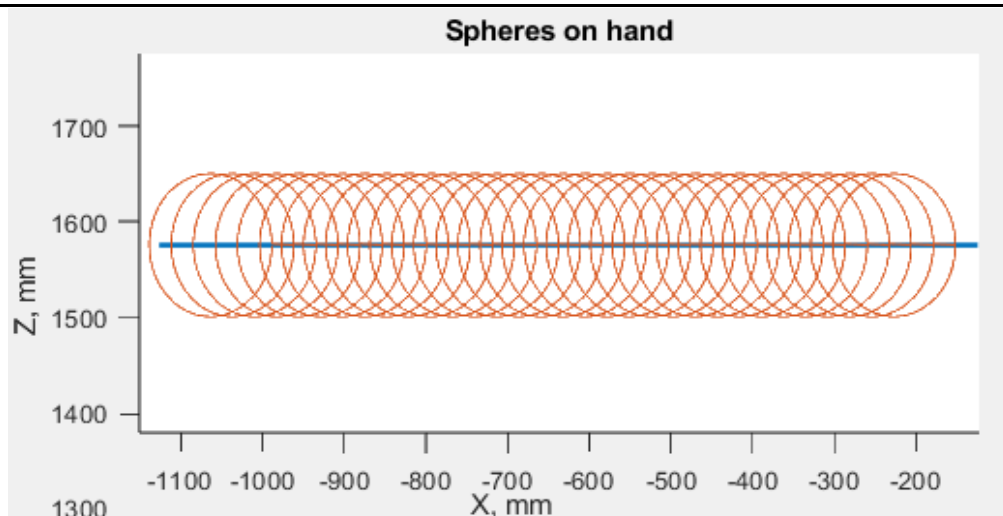


Рис. 2. Наложение сфер на руку модели человека

При выполнении условия считается, что между сферами существует коллизия.

Выражение основывается на утверждении: если расстояние между центрами сфер меньше, чем сумма радиусов, то они пересекаются.

Ниже представлен алгоритм определения коллизии между сферами разных звеньев (см. рис. 3, б).

В качестве входящих значений алгоритм получает:

- количество сфер каждого объекта (например, рука человека имеет 33 сферы, а робот – 119);
- массивы с координатами положения в пространстве каждого центра сферы;
- промежуточные переменные (*length*, *str*).

После этого с помощью цикла рассчитываются и записываются значения расстояния между сферами разной принадлежности. Поочерёдно цикл перебирает все возможные случаи. После происходит поиск значений расстояния меньших, чем сумма радиусов сфер разной принадлежности. Результат суммируется и выводится сигнал о наличии либо отсутствии коллизии. Таким образом происходит алгоритмическое определение коллизий между условными объектами.

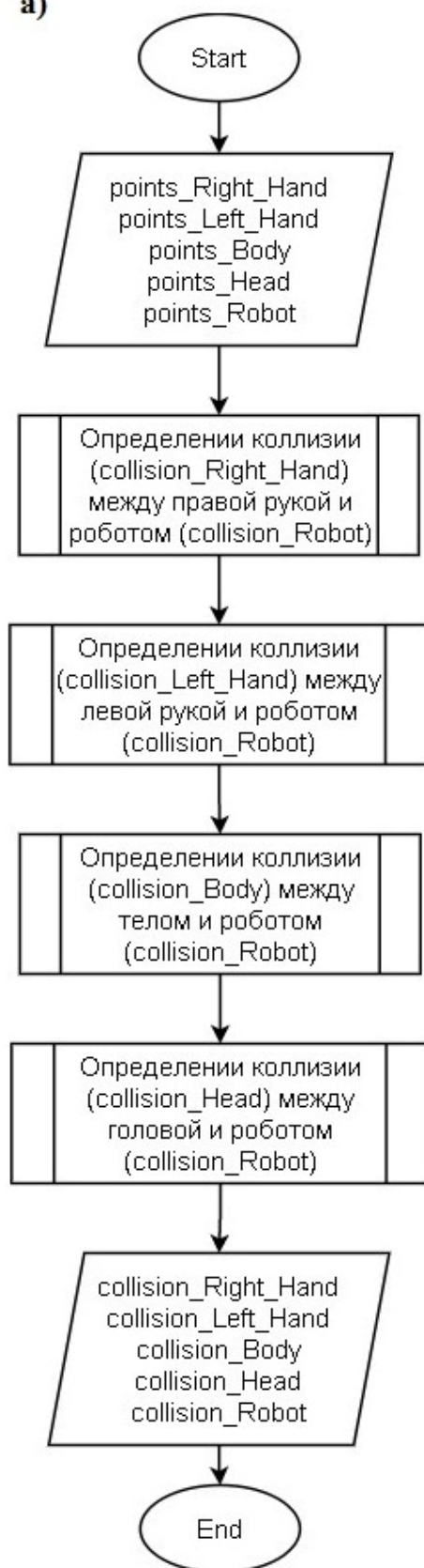
Следующим этапом необходимо определить возможные объекты столкновения, которые стоит учитывать: левая рука человека, правая рука человека, тело, голова, робот.

Модель человека следует разделять на составные части для дифференциации сигналов остановки движимых звеньев. Так, при столкновении правой руки с роботом левая рука останется свободна для движений.

Для формирования алгоритма идентификации коллизий между обозначенными объектами следует уточнить, что необходимо осуществлять поиск коллизий между руками и роботом, между роботом и телом, между роботом и головой. Ноги не учитываются, поскольку не входят в рабочую зону робота. На рис. 3, а представлен алгоритм идентификации коллизий между роботом и звеньями человека.

На вход алгоритм получает координаты точек, равномерно распределённых вдоль линии соответствующих звеньев. Эти точки являются центрами сфер, используемых в рис. 2.

а)



б)

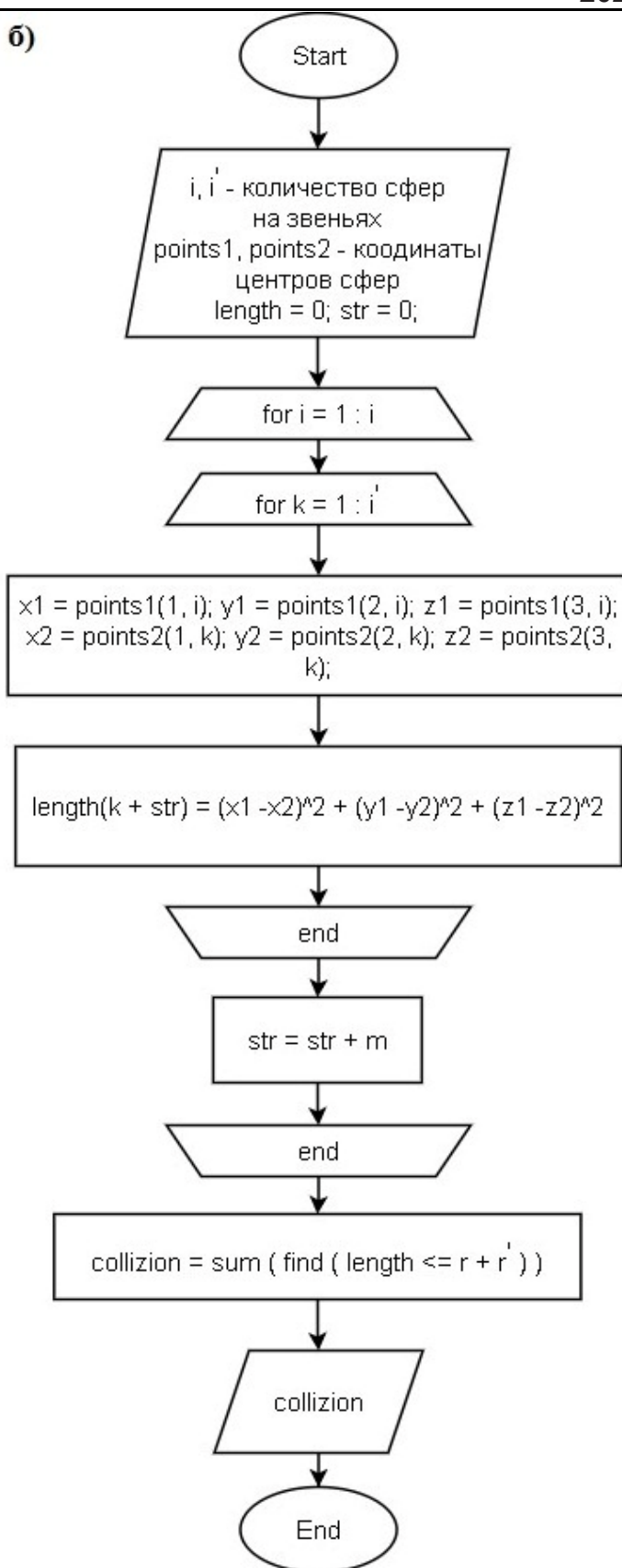


Рис. 3. Алгоритмы для идентификации коллизий между человеком и роботом:
а – алгоритм идентификации коллизий между роботом и звеньями человека;
б – алгоритм определения коллизии между набором сфер двух звеньев

Следующим шагом происходит поочерёдный расчёт коллизий между звеньями человека и робота. Полученные значения выводятся и используются функциональным блоком формирования сигналов остановки (см. рис. 4).

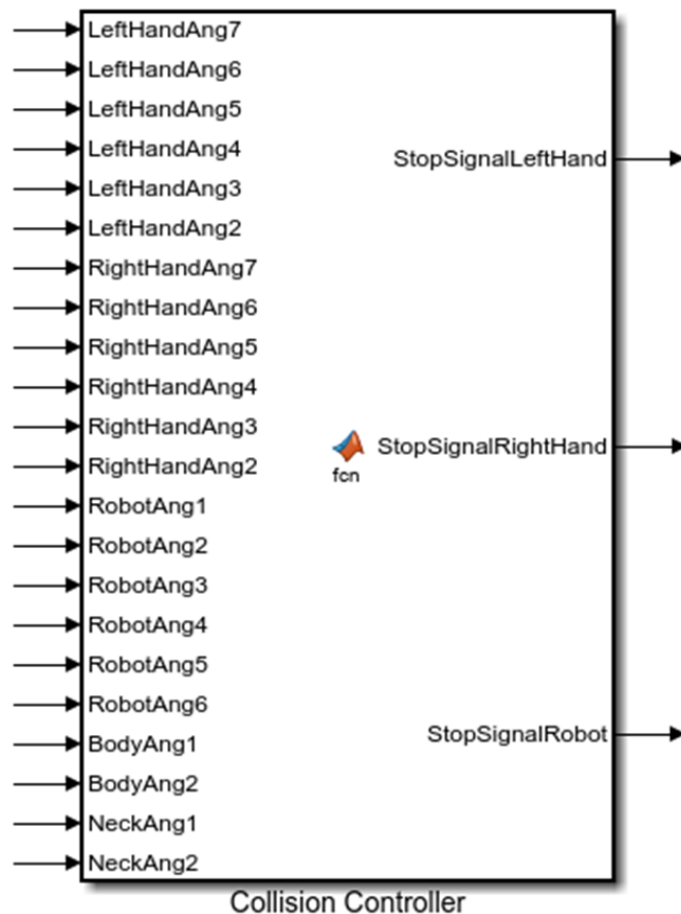


Рис. 4. Блок формирования сигналов остановки

Полученные сигналы могут иметь значения: 0 – выполнение движения не прерывается; 1 – движение необходимо остановить.

Эти сигналы поступают в блоки имитации движений соответствующих объектов. За счёт этого визуально отображается столкновение и остановка объектов (см. рис. 5). Представленные фрагменты симуляции модели демонстрируют её работоспособность.

Из этого следует, что главная цель по идентификации коллизий и имитации столкновений выполнена.

Заключение. В результате проведённой работы был адаптирован алгоритм определения коллизий в рамки моделирования роботизированного технологического процесса, а также был разработан алгоритм определения коллизий между звеньями моделей человека и робота. Результаты этих алгоритмов используются в управлении движениями, а именно для остановки столкнувшихся звеньев моделей. Полученный функционал идентификации коллизий в ходе демонстрации доказал свою работоспособность.

Представленные алгоритмы позволяют сохранить модульность модели и способны подстраиваться под изменения в составе моделируемых объектов. Поверхность, составленная из сфер, имеет возможность не только точно повторять рельеф и кривизну поверхности звеньев робота или рук человека, но и нарастить объём для создания дополнительного буфера, при котором коллизия может регистрироваться заранее, на некотором удалении. Это можно использовать для повышения

безопасности при внедрении решения в реальном комплексе, а также при разработке алгоритмов, предсказывающих коллизии. Кроме того, предложенный функционал позволит решить вопросы оптимизации планирования траектории перемещения коллаборативного робота.

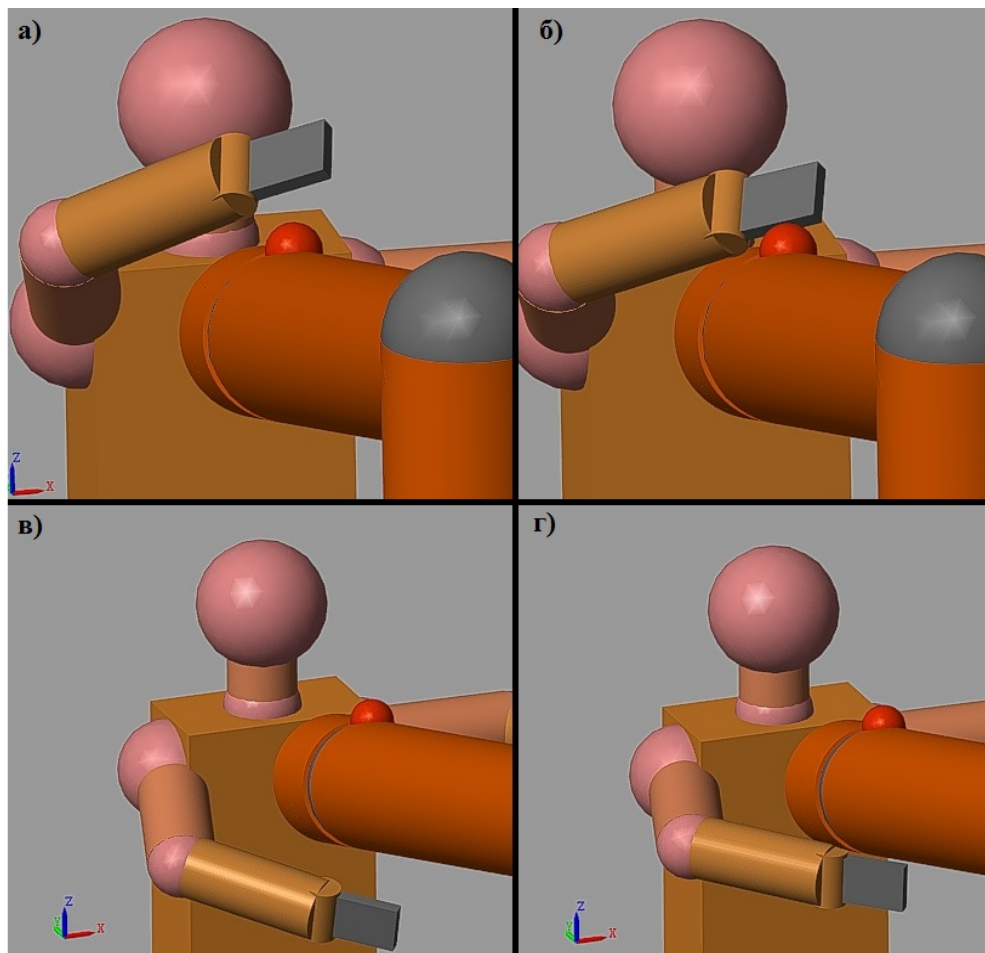


Рис. 5. Коллизия между рукой и роботом:

а – свободное перемещение руки модели человека; б – столкновение руки с роботом;
в – свободное перемещение модели робота; г – столкновение модели робота с рукой

В будущем работа над имитационной моделью позволит создать платформу для тестирования и отладки интеллектуальных алгоритмов управления роботизированными процессами. Завершение данного этапа открывает возможность разработки методов оптимизации роботизированных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shufei Li, Pai Zheng, Sichao Liu, Zuoxu Wang, Xi Vincent Wang, Lianyu Zheng, Lihui Wang, Proactive human-robot collaboration: Mutual-cognitive, predictable, and self-organising perspectives, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 81, 2023, 102510, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102510>.
2. Pandya, Ravi & Liu, Changliu. (2022). Safe and Efficient Exploration of Human Models During Human-Robot Interaction. 10.48550/arXiv.2208.01103.
3. Juan Heredia, Christian Schlette, Mikkel Baun Kjærgaard AR Training App for Energy Optimal Programming of Cobots, arXiv:2210.08015v1 [cs.RO] 14 Oct 2022 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.08015>.
4. K. Zieliński, K. Walas, J. Heredia and M. B. Kjærgaard, A Study of Cobot Practitioners Needs for Augmented Reality Interfaces in the Context of Current Technologies, 2021 30th IEEE International Conference on Robot &

- Human Interactive Communication (RO-MAN), Vancouver, BC, Canada, 2021, pp. 292-298, doi: 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515406.”, 2022.
5. Chao Zhang, Guanghui Zhou, Dongxu Ma, Rui Wang, Jiacheng Xiao, Dan Zhao, A deep learning-enabled human-cyber-physical fusion method towards human-robot collaborative assembly, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 83, 2023, 102571, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102571>.
6. Shenglin Wang, Jingqiong Zhang, Peng Wang, James Law, Radu Calinescu, Lyudmila Mihaylova, A deep learning-enhanced Digital Twin framework for improving safety and reliability in human-robot collaborative manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 85, 2024, 102608, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102608>.
7. Zanchettin, A. M., Messeri, C., Crisantielli, D. et al. Trajectory optimisation in collaborative robotics based on simulations and genetic algorithms. *Int J Intell Robot Appl* 6, 707-723 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41315-022-00240-4>.
8. Mark Nicholas Finean, Wolfgang Merkt, Ioannis Havoutis, Predicted Composite Signed-Distance Fields for Real-Time Motion Planning in Dynamic Environments. *International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, 2021. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.00969>.
9. O. Vermesan, R. Bahr, M. Ottella, M. Serrano, T. Karlsen, T. Wahlstrøm, H.-E. Sand, M. Ashwathnarayan, M. T. Gamba, Internet of robotic things intelligent connectivity and platforms, *Frontiers in Robotics and AI* 7 (2020) 104.
10. M. Yunus Seker, Alper Ahmetoglu, Yukie Nagai, Minoru Asada, Erhan Oztop, Emre Ugur, Imitation and mirror systems in robots through Deep Modality Blending Networks, *Neural Networks*, Volume 146, 2022, P. 22-35, ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.11.004>.
11. Alexandre Angleraud, Akif Ekrekli, Kulunu Samarawickrama, Gaurang Sharma, Roel Pieters, Sensor-based human-robot collaboration for industrial tasks, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 86, 2024, 102663, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102663>.
12. Asad, Usman & Khan, Madeeha & Khalid, Azfar & Lughmani, Waqas. (2023). Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies. *Sensors*. 23. 10.3390/s23083938.
13. Sun, Xuemin & Zhang, Rong & Liu, Shimin & Lv, Qibing & Jinsong, Bao & Li, Jie. (2021). A Digital Twin-driven Human-robot Collaborative Assembly-commissioning Method for Complex Products. 10.21203/rs.3.rs-506544/v1.
14. Giovanni Boschetti, Maurizio Faccio, Irene Granata, Riccardo Minto, 3D collision avoidance strategy and performance evaluation for human-robot collaborative systems, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 179, 2023, 109225, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109225>.
15. Xingxin Li, Shibo Song, Junfeng Yao, Hanyin Zhang, Rongzhou Zhou, Qingqi Hong, Efficient collision detection using hybrid medial axis transform and BVH for rigid body simulation, *Graphical Models*, Volume 128, 2023, 101180, ISSN 1524-0703, <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2023.101180>.
16. Shuming Yi, Sichao Liu, Xiaohu Xu, Xi Vincent Wang, Sijie Yan, Lihui Wang, A vision-based human-robot collaborative system for digital twin, *Procedia CIRP*, Volume 107, 2022, Pages 552-557, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.024>.
17. Claudio Tripodo, Stefano Lorenzi, Antonio Cammi, Gioacchino Micciché, Object-oriented modeling, simulation and control of a 6-DoF parallel kinematic manipulator for remote handling in DONES facility, *Fusion Engineering and Design*, Volume 184, 2022, 113304, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113304>.



Бутко В. П., Кузьмин Р. В.
V. P. Butko, R. V. Kuzmin

ГЕНЕРАТОР МИКРОГЭС, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ СИСТЕМУ АВТОБАЛЛАСТНОЙ НАГРУЗКИ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНОГО СПОСОБА СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

MICROGRID GENERATOR USING AUTOBALLAST LOAD SYSTEM AS THE MAIN METHOD OF OUTPUT PARAMETERS STABILIZATION

Бутко Владимир Павлович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vl_butko@mail.ru.

Vladimir P. Butko – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vl_butko@mail.ru.

Кузьмин Роман Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: romadres@mail.ru.

Roman V. Kuzmin – PhD in Engineering, Associate Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: romadres@mail.ru.

Аннотация. В данной работе была исследована система стабилизации частоты и напряжения на основе метода автобалластной нагрузки для дугостаторного индукторного генератора. Показаны основные структурные схемы и математические зависимости параметров. Составлена имитационная модель дугостаторного индукторного генератора и его системы управления.

Summary. In this paper, a frequency and voltage stabilization system based on the autoballast load method for an arc-stator inductor generator has been investigated. The main structural schemes and mathematical dependences of parameters are shown. The simulation model of arc-stator inductor generator and its control system is compiled.

Ключевые слова: микроГЭС, автобалластная нагрузка, стабилизация частоты и напряжения.

Key words: micro hydropower plants, autoballast load, frequency and voltage stabilization.

УДК 62-503.51

Введение. Одной из главных задач при проектировании и создании систем децентрализованного электроснабжения на основе микроГЭС является задача по обеспечению энергопотребителей электрической энергией с качеством, установленным государственным стандартом [1]. Данная проблема обусловлена нестабильностью водного потока (первичного источника энергии), а также непредсказуемым характером изменения нагрузки.

Для того чтобы получить требуемые выходные показатели, в общем случае необходимо поддерживать уровень амплитуды вырабатываемого напряжения и его частоту. Одним из наиболее эффективных способов, не вносящих изменения в конструкцию генератора, является использование систем, основанных на методе автобалластной нагрузки [2]. Под «балластной» в данном случае понимают некоторую полезную нагрузку, которой в основном являются различные нагревательные элементы. Способ базируется на автоматическом перераспределении мощности между некоторыми потребителями, часть из которых допускает колебания уровня напряжения или его полное отсутствие.

Задача данной системы состоит в том, чтобы изменять мощность суммарной нагрузки, при этом поддерживать частоту вращения колеса гидротурбины (ротора) на требуемом уровне при случайном изменении полезной нагрузки. Данный способ стабилизации параметров генератора представляет собой двухканальную систему автоматического регулирования, которая состоит из

канала стабилизации напряжения (РН) и канала стабилизации частоты (РЧ) (см. рис. 1) [3]. При описанных требованиях наиболее целесообразным является корректирование величины балластной нагрузки по отклонению колебаний частоты выходного напряжения на зажимах генератора. В роли системы стабилизации напряжения будет выступать комбинированная система самовозбуждения генератора (см. рис. 2), т. к. применение этой системы позволит уменьшить коэффициент усиления регулятора возбуждения [4].

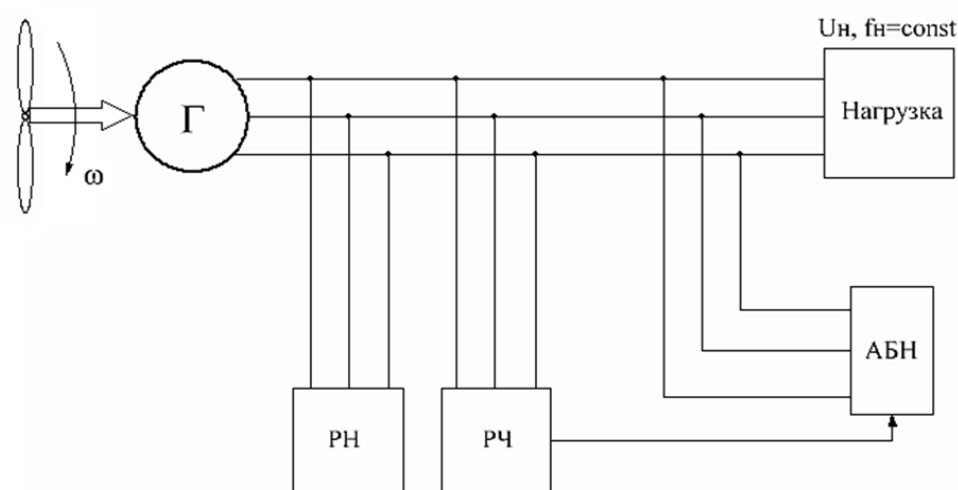


Рис. 1. Структурная схема системы

Дугостаторный индукторный генератор с резкопеременной нагрузкой, которой является балласт, а также турбина, точнее, воздействующий на неё водный поток, являются нелинейными элементами. Значит, и в целом система автоматического регулирования напряжения (САРН) является нелинейной. Для того чтобы исследовать систему (её устойчивость и реакцию на воздействие), необходимо определить передаточную функцию генератора, которая в операторной форме будет иметь вид инерционного звена первого порядка:

$$(m \cdot T_{d0} \cdot p + 1) \cdot U_{\Gamma} = \frac{U_{\text{в}}}{n},$$

где T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке якоря; p – число пар полюсов; U_{Γ} – выходное напряжение генератора; $U_{\text{в}}$ – напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения; m, n – коэффициенты нагрузки генератора.

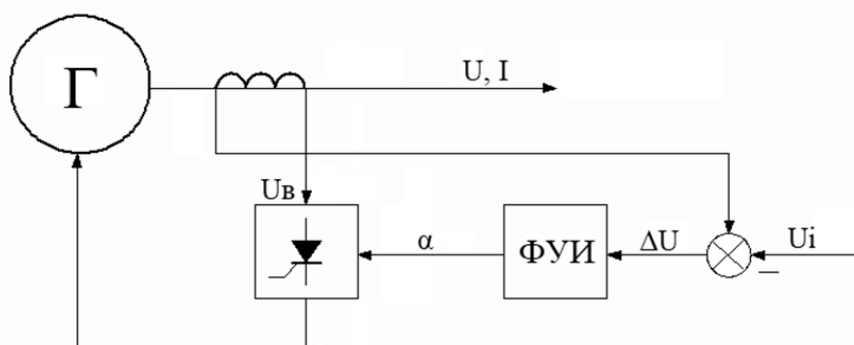


Рис. 2. Комбинированная система возбуждения

Для построения линеаризованной модели САРН необходимо сделать несколько допущений, которые не будут нарушать общего представления процессов, происходящих в генераторе: трансформаторные ЭДС равны нулю; демпферные обмотки отсутствуют.

Система автоматического регулирования частоты (САРЧ) генератора основывается на стабилизации скорости вращения гидротурбины при помощи изменения величины балласта. В качестве основного параметра САРЧ использует частоту переменного напряжения генератора (см. рис. 3) [5].

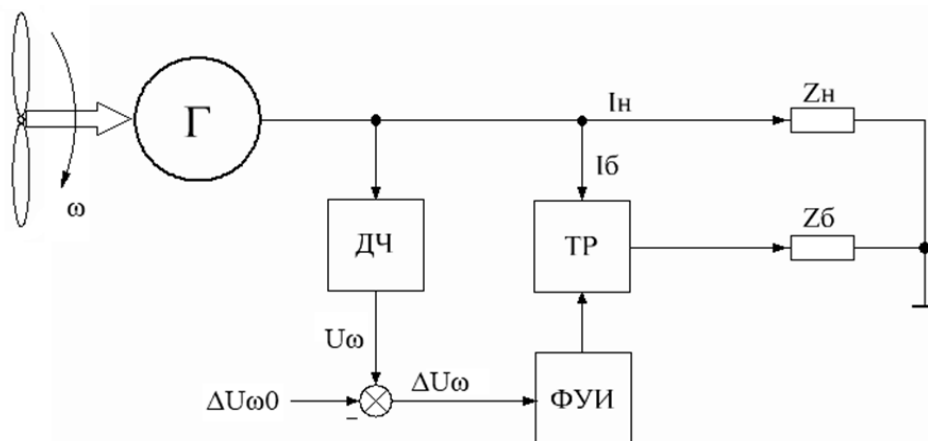


Рис. 3. Схема регулирования балластной нагрузки по частоте выходного напряжения

Так же как и другие описанные выше параметры, момент движущихся сил имеет нелинейную функциональную зависимость от частоты вращения [6]. При линеаризации этой зависимости получим

$$\Delta M_M = a \cdot \Delta n,$$

$$\Delta M_{ЭМ} = b \cdot \Delta n,$$

$$a = \frac{dM_M}{dn},$$

$$b = \frac{dM_{ЭМ}}{dn},$$

где M_M – момент, развиваемый турбиной; $M_{ЭМ}$ – момент сопротивления на валу турбины, соответствующий нагрузке генератора; n – частота вращения гидротурбины.

Уравнение движения вращающихся масс, записанное в описанных приращениях:

$$(a - b) \cdot \Delta n = I \cdot \frac{d\Delta n}{dt}.$$

Произведём моделирование описанной двухконтурной системы управления и дугостаторного индукторного генератора (см. рис. 4). Напряжение снимается датчиком и подаётся на детектор частоты, который создаёт тактовые импульсы для системы управления. Рассчитанная частота подаётся на вход ПИД-регулятора контура частоты, определяющего угол открытия тиристорного регулятора балластной нагрузки. Сигнал с датчика напряжения также поступает в блок, который определяет действующее значение напряжения. На основании этого значения блоком ПИД-регулятора контура напряжения определяется угол управления тиристорного регулятора контура напряжения.

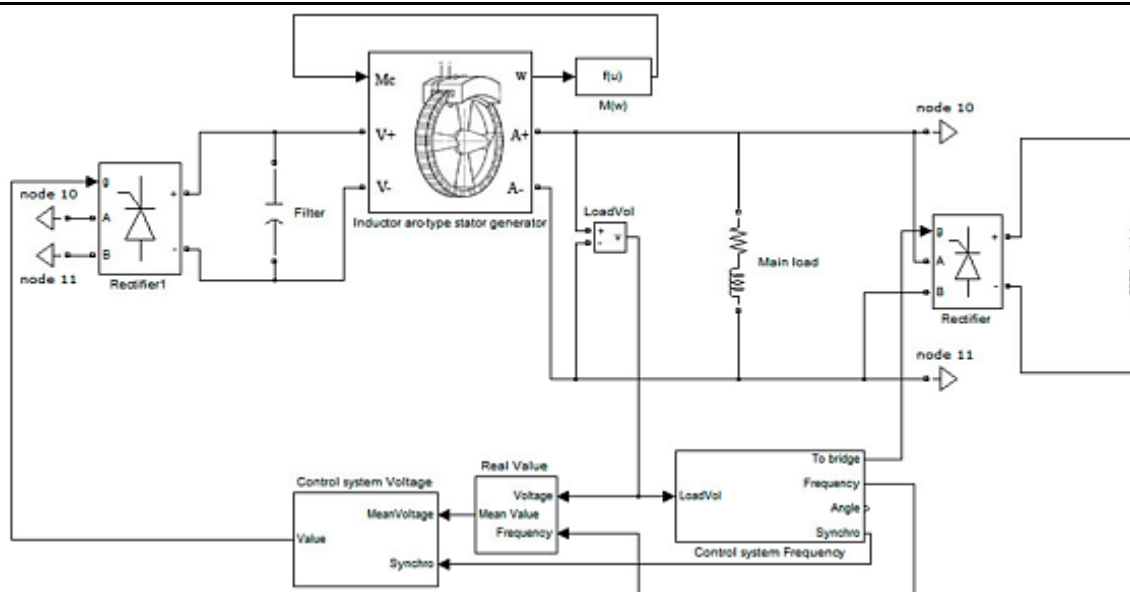


Рис. 4. Схема системы энергоснабжения

Исследуем зависимости частоты, выходного напряжения генератора и напряжения балластной нагрузки при изменении сопротивления нагрузки, результаты моделирования представим в виде графиков зависимости исследуемой величины от сопротивления нагрузки (см. рис. 5-7).

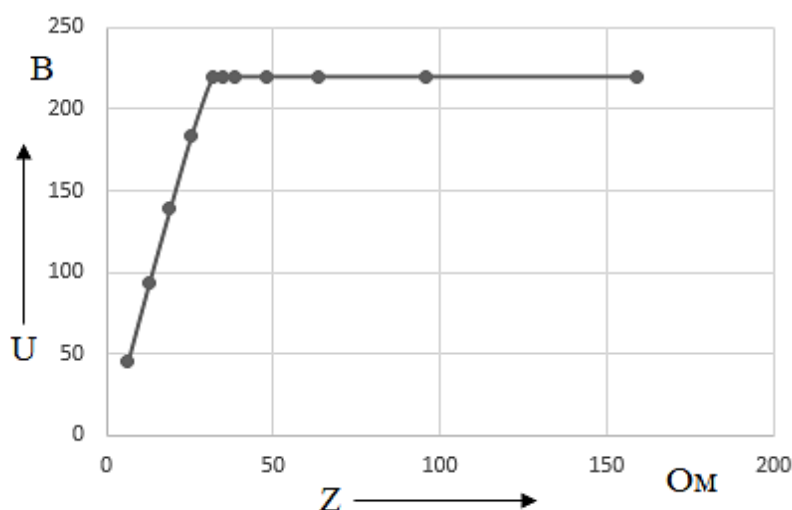


Рис. 5. Динамическая характеристика напряжения генератора

Исходя из полученных результатов, можно сказать, что система начинает стабилизировать выходные параметры при сопротивлении нагрузки более 30 Ом. При сопротивлении нагрузки в диапазоне от 0 до 30 Ом выходное напряжение генератора (см. рис. 5) и его частота (см. рис. 6) имеют характерную линейную возрастающую зависимость. При превышении порогового значения в 30 Ом напряжение и частота начинают выходить за свои номинальные значения, в связи с этим на балластную нагрузку поступает напряжение и система приходит в стабилизированное (номинальное) состояние. При дальнейшем увеличении нагрузки система всё также находится в устойчивом состоянии. Напряжение балластной нагрузки (см. рис. 7) на всём диапазоне её работы при этом нелинейно возрастает вплоть до значения, которое равно 0,9 от номинального фазного

напряжения. В диапазоне от 0 до 30 Ом балластная нагрузка не вступает в работу, поскольку система ещё не достигла своих номинальных показателей.

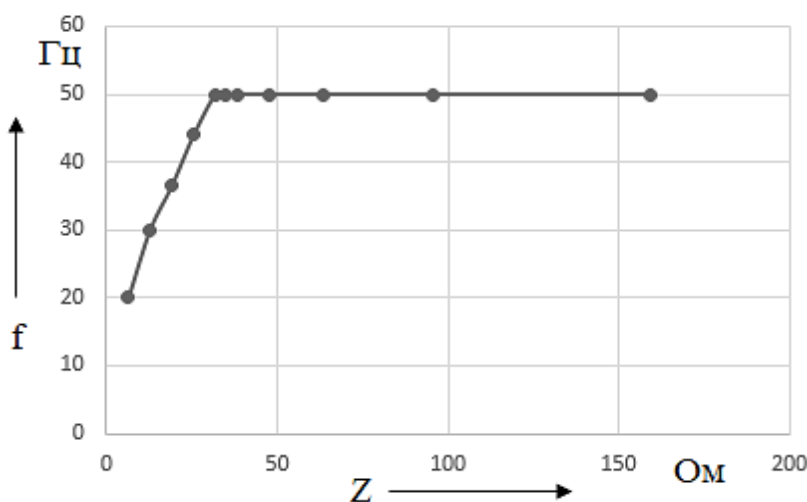


Рис. 6. Динамическая характеристика изменения частоты выходного напряжения

Предложенная система имеет ряд недостатков, которые требуют дальнейших доработок и исследования. К аспектам, которым необходимы последующие исследования, можно отнести следующие: случайное изменение характера нагрузки, от которого будут зависеть потребляемые активная и реактивная мощности; изменение характера водного потока, которое носит нелинейный характер и учёт влияния которого является очень сложной задачей; внутренние электромагнитные процессы в дугостаторном генераторе и процессы взаимосвязей статора и гидротурбины, которые на данный момент не исследованы в необходимом объёме.

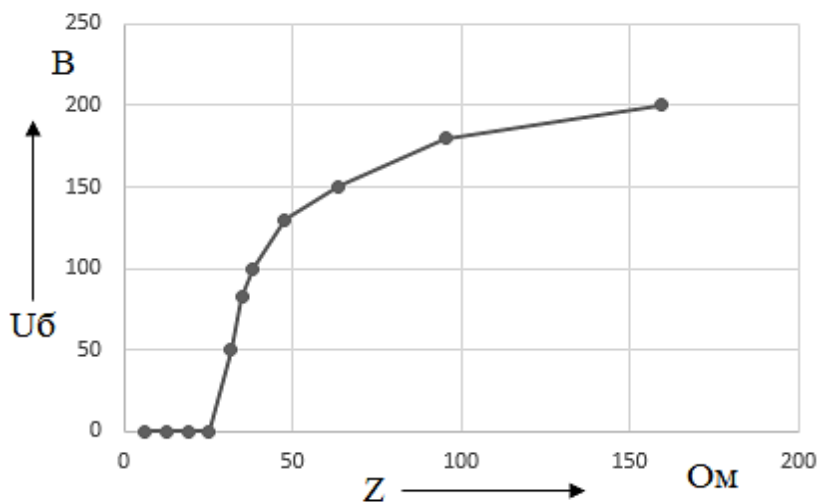


Рис. 7. Динамическая характеристика напряжения балластной нагрузки

Заключение. В данной работе была рассмотрена система автобалластной нагрузки при работе с дугостаторным индукторным генератором. Исследована имитационная модель автономной системы энергообеспечения на основе микроГЭС. Проведены испытания модели при изменении нагрузки генератора. В результате испытаний было выявлено, что предложенная система способна стабилизировать величину и частоту выходного напряжения при изменении нагрузки энергоуста-

новки и качество выходных параметров генератора соответствует параметрам, предъявляемым государственным стандартом на качество электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: введён впервые: дата введения 2014-07-01 / Разработан Обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – М.: Стандартинформ, 2024. – 20 с.
2. Бутко, В. П. Способы регулирования и стабилизации выходных параметров генератора в составе микроГЭС / В. П. Бутко, Р. В. Кузьмин // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 05-11 декабря 2022 г. В 2 ч. Ч. 1 / Редколлегия: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 164-167.
3. Никитина, Ж. А. Разработка и исследование системы децентрализованного энергоснабжения на базе микроГЭС / Ж. А. Никитина, Р. В. Кузьмин // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 01-15 апреля 2016 г. / Э. А. Дмитриев (отв. ред.). – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 419-421.
4. Стельмашук, С. В. Согласованное управление устройством транспортировки ленты с модальными регуляторами / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 28-40.
5. Шаломов, В. И. Предварительный анализ эксплуатационных показателей паротурбинных установок новой Советско-Гаванской теплоэлектроцентрали / В. И. Шаломов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № III (67). – С. 28-34.
6. Кузьмин, В. М. Математическая модель автономного источника с электромашиным формированием кривой выходного напряжения / В. М. Кузьмин, В. И. Суздорф // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1 (5). – С. 23-28.



Петрова А. Н., Фролов Д. О.
A. N. Petrova, D. O. Frolov

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ РЕЛЕВАНТНЫЙ ПОИСК В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

USE OF NEURAL NETWORKS FOR A PREDICTION SYSTEM USING RELEVANCE SEARCH IN BIG DATA SYSTEMS

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Проектирование, управление и развитие информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Head of the Department «Design, Management and Development of Information Systems», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Аннотация. В настоящее время искусственные нейронные сети (ИНС) успешно решают множество задач, используя различные виды информации в качестве входных данных. Однако возникают сложности в обучении ИНС из-за возможного использования неподходящих наборов данных с большим количеством параметров. Одна из ключевых проблем подготовки данных – оценка их эффективности для обучения конкретной ИНС. В данном исследовании проведён анализ методов обучения искусственных нейронных сетей, включая разнообразные подходы к оптимизации параметров при подготовке данных для обучения ИНС. Также изучено влияние выбора метода оптимизации и количества параметров нейронной сети на эффективность обучения. Главная цель обучения состоит в достижении баланса между способностью сети правильно реагировать на входные данные, использованные в обучении (запоминание), и способностью выдавать правильные результаты на входные данные, аналогичные, но не идентичные тем, что использовались в обучении (принцип обобщения).

Summary. At present, artificial neural networks (ANNs) effectively tackle numerous tasks utilizing diverse types of information as input vectors. Nevertheless, there exists a challenge in training ANNs due to the potential utilization of improperly prepared datasets containing a vast array of parameters. Evaluating the efficacy of data preparation in training a particular ANN stands as one of the primary issues. The analysis in the paper delves into training methods for artificial neural networks, examining various approaches to optimizing parameters during data preparation for training an ANN. The study also scrutinizes the impact of optimization method selection and the quantity of neural network parameters on learning efficiency. The objective of training is to strike a balance between the network's capacity to provide accurate responses to input data employed during training (memorization) and its ability to yield correct outcomes when faced with input data that is akin but not identical to that used during training (the principle of generalization).

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, алгоритмы обучения, анализ данных.

Key words: artificial neural networks, learning algorithms, data analysis.

УДК 517.95

Введение. Перед началом подготовки данных важно изучить различные методы обучения нейронных сетей. С увеличением сложности задач, а также нелинейным ростом объёмов и размерности данных, становится критически важным повышение эффективности алгоритмов обучения нейронных сетей. Существует несколько алгоритмов, таких как метод обратного распростра-

нения, метод упругого распространения и генетический алгоритм обучения. Однако все они основаны на двух основных принципах: обучении с учителем и без него.

В процессе добычи руд и песков драгоценных металлов компания ООО «Золото» нуждается в информации от своих сотрудников, основанной на их опыте. Возникает необходимость заметить экспертное мнение опытных сотрудников на прогноз, полученный от обученной нейронной сети на основе данных из системы больших данных предприятия. Для улучшения качества обработки и снижения затрат на добычу драгоценных металлов необходимо внедрить систему прогнозирования процесса добычи, использующую соответствующий поиск во внутренних системах больших данных предприятия.

Подготовка данных для обучения нейронных сетей занимает значительное количество времени из-за сложности процессов ручной обработки информации. Объём поступающих данных избыточен и разнообразен. Полученные данные хранятся в корпоративной информационной системе в виде таблиц с различными типами данных и большим количеством параметров процесса добычи. Методы формирования обучающих и тестовых выборок зависят от поставленной задачи: для классификации данные разделяются таким образом, чтобы численное соотношение объектов разных классов в полученных наборах было сопоставимо с исходной генеральной совокупностью; для регрессионного анализа необходимо обеспечить равномерное распределение целевой переменной в полученных наборах, используемых для обучения и проверки качества.

Алгоритм обратного распространения ошибки представляет собой метод обучения многослойных персептронов, т. е. нейронных сетей с множеством слоёв, включая скрытые. При этом процессе обучения необходимо иметь заданные целевые значения для примеров. Основным принципом этого алгоритма заключается в использовании ошибки на выходе нейронной сети для вычисления коррекции весов нейронов в её скрытых слоях:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (y - y')^2,$$

где k – число выходных нейронов сети; y – целевое значение; y' – фактическое выходное значение.

Обобщённый процесс обучения включает в себя множество примеров и сложную сеть нейронов. На каждом этапе тренировки происходит два прохода через нейронную сеть: сначала данные передаются от входного к выходному слою, затем выходные значения обратно распространяются для коррекции весов. Подготовка данных для обучения также важна. Она включает в себя сбор и обработку информации для создания набора данных, который соответствует требованиям алгоритмов машинного обучения. Хотя процесс обучения ориентирован на определённые цели, такие как классификация, уменьшение количества параметров с помощью корреляции данных также является важным шагом перед реализацией метода:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 * \sum (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i – значение переменной X ; y_i – значение переменной Y ; \bar{x} – среднее арифметическое для переменной X ; \bar{y} – среднее арифметическое для переменной Y .

В результате количество параметров для обучения снизится с 16 до 9. Проверяем данные на разных эпохах обучения. Результаты приведены в табл. 1.

Значения потери – функции и точность нейронной модели – приведены в табл. 2 для уменьшенного количества параметров.

По результатам проведённой валидации можно сделать вывод об успешном обучении нейронной модели. Дальнейшая проверка качества обучения тесно связана с прогнозированием работы на обученной модели Sequential и последующим сравнением с ручными расчётами.

Прогноз формируется на основе предыдущих данных из внутренней системы, осуществляющей релевантный поиск в больших данных. Затем с помощью обученной нейронной сети оценивается успешность выполнения поиска данных. Рассчитанные значения добавляются к исходной



выборке данных, и далее производится прогноз с учётом предыдущих значений. Этот процесс повторяется до достижения заданного периода прогнозирования.

Таблица 1

Исследование до и после корреляции данных

Этап	Количество строк на каждом шаге до корреляции	Количество строк на каждом шаге после корреляции
Базовая	6024	6024
1 шаг	4138	3877
2 шаг	2239	1793
3 шаг	1421	712
4 шаг	648	97

Таблица 2

Качество обучения модели на уменьшенном количестве параметров

Потеря		Точность	
Обучение	Валидация	Обучение	Валидация
0,0482	0,0969	0,9893	0,9897

Важно отметить, что на каждом шаге прогнозирования значения управляющих параметров считаются известными и передаются на вход нейронной сети. Это позволяет производить дальнейшее изменение их значений в поисках оптимального режима работы.

После окончательного обучения модели мы вычисляем ошибку прогнозирования для каждой строки в тестовых данных в виде абсолютной процентной ошибки.

Для оценки результатов рассчитывается процентная ошибка (APE):

$$APE = (\text{оценочное значение} - \text{фактическое значение}) / \text{фактическое значение} \times 100.$$

Пример работы приложения для прогнозирования представлен на рис. 1. Из расчёта процентной ошибки видно, что на данном наборе данных процентная ошибка не превышает установленного порога в 5 %.

relationship	PredictedRelationship	APE
0.915874	0.902503	1.459902
0.951825	0.906832	4.726996
0.968373	0.940506	2.877753
0.916418	0.903856	1.370751
0.960972	0.942439	1.928556

Рис. 1. Расчёт процентной ошибки

Для оценки точности прогнозирования сети было проведено сравнение с данными, полученными в результате ранее осуществлённого релевантного поиска в системах больших данных. В результате этого сравнения была построена гистограмма, иллюстрирующая сопоставление оценок, полученных от сотрудника, и прогнозов, сделанных системой прогнозирования (см. рис. 2).



Рис. 2. График прогноза

Качество прогнозирования оценивалось по величине средней квадратичной ошибки.

Заключение. В рамках проекта были созданы как математическая, так и компьютерная модели, обученные для релевантного поиска в структурах больших данных для обнаружения аномалий в процессе добычи драгоценных металлов. Данные, полученные в результате поиска, существенно влияют на прогнозирование эффективности обнаружения аномалий. Также были предложены методы уменьшения объёма данных с использованием корреляции. После анализа процентной ошибки стало ясно, что прогнозируемые значения в среднем отличаются от фактических на 3 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудфеллоу, Я. Deep Learning / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль; пер. с англ. А. А. Слинкина. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 652 с.
2. Хант, Э. Python и машинное обучение / Э. Хант. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 414 с.
3. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. — СПб.: Питер, 2018. — 400 с.
4. Шолле, Ф. Программирование нейронных сетей на Python / Ф. Шолле. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 403 с.
5. Нильсен, М. Нейронные сети и глубокое обучение / М. Нильсен. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 308 с.
6. Аршакян, А. И. Применение нейронных сетей для анализа больших данных в бизнесе / А. И. Аршакян, А. С. Пугачев, В. Ю. Варгулёв // Мир науки, культуры, образования. — 2018. — № 4. — С. 36-38.
7. Брэдли, С. Глубокое обучение с PyTorch / С. Брэдли. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 254 с.
8. Рашка, С. Python и машинное обучение / С. Рашка. — М.: ДМК Пресс, 2016. — 418 с.
9. Чарки, Ш. Глубокое обучение и TensorFlow / Ш. Чарки. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 480 с.
10. Применение методов машинного обучения в задачах оценки технологических процессов / О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев, Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. — 2021. — № VII (55). — С. 68-72.
11. Попова, О. В. Моделирование оценки параметров в технологических задачах / О. В. Попова, А. В. Кириллов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07-11 февраля 2022 года. — Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. — С. 244-246.
12. Кизянов, А. О. Корреляция Пирсона на языке программирования Python / А. О. Кизянов // Постулат. — 2018. — № 8 (34). — С. 14.
13. Рекуррентные нейронные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП машиностроительного производства / С. Н. Поезжалова [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2011. — Т. 15. — № 5 (45). — С. 36-46.



Петрова А. Н., Фролов Д. О.
A. N. Petrova, D. O. Frolov

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОИСКА ФОНОВЫХ ССЫЛОК ПО СМЫСЛУ В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

USE OF MEANING-BASED BACKGROUND REFERENCE SEARCH IN BIG DATA SYSTEMS

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Проектирование, управление и развитие информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Head of the Department «Design, Management and Development of Information Systems», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Аннотация. Задача фоновое связывание направлена на рекомендацию новостных статей для читателя, которые наиболее релевантны для предоставления контекста и предыстории для статьи запроса. Для выполнения этой задачи предложен двухэтапный подход IR-BERT, который сочетает в себе поисковую мощность BM25 с контекстным пониманием получения с помощью модели на основе BERT. Далее предложили использовать меры разнообразия для оценки эффективности подходов к связыванию фона при извлечении разнообразного набора документов. Приведено сравнение IR-BERT с другими подходами в TREC 2023.

Summary. The background linking task aims to recommend news articles to the reader that are most relevant to provide context and background for the query article. To fulfill this task, a two-stage IR-BERT approach is proposed that combines the search power of BM25 with the contextual understanding of retrieval using a BERT-based model. The authors also proposed the use of diversity measures to evaluate the performance of background linking approaches in retrieving a diverse set of documents. A comparison of IR-BERT with other approaches in TREC 2023 is given.

Ключевые слова: фоновое связывание, двухэтапный подход, семантический поиск.

Key words: background linking, two-step approach, semantic search.

УДК 517.95

Введение. Интернет-службы новостей стали ключевыми источниками информации и повлияли на то, как мы потребляем и делимся новостями. При составлении новостной статьи часто предполагается, что читатель имеет достаточную информацию о случившихся событиях. Это не всегда так, что требует необходимости предоставить читателю ссылки на полезную информацию, которые могут установить полную картину событий. Новостная информация может быть написана разными авторами до или после выпущенной статьи и служить для предоставления дополнительной информации о статье, что даёт возможность познакомить читателя с ключевыми идеями. Однако определение того, что можно отнести к статье, предоставление фонового контекста и получение таких документов не является простым. В связи с этой проблемой была решена задача фоновое связывание. Целью является получение списка публикаций, которые можно включить в поле «Пояснение» рядом с текущей статьёй, чтобы помочь читателю понять или узнать больше об истории или основных вопросах. В данной работе предложен двухэтапный подход IR-BERT для решения проблемы фоновых ссылок. Первый этап фильтрует список для идентификации набора

документов-кандидатов, которые имеют отношение к рассматриваемой статье. Это достигается путём объединения взвешенных ключевых слов, извлечённых из запроса документа в эффективный поисковый запрос, и использования BM25 для поиска в корпусе. На втором этапе используется Sentence-BERT для изучения контекстных представлений запроса в проведении семантического поиска по кандидатам, включённым в список. Мы предполагаем, что использование языковой модели может быть полезным для понимания контекста статьи-запроса и поможет найти публикации, которые предоставляют полезную информацию для текущей статьи.

Инструменты для работы. BM25 – одна из самых популярных функций ранжирования, используемых поисковыми системами для оценки релевантности документов по заданному поисковому запросу. BM25 основан на функции поиска «bag-of-words», которая ранжирует набор документов на основании терминов запроса, встречающихся в каждом документе независимо от их близости внутри документа. Несколько предыдущих подходов для поиска фоновых ссылок построено с использованием BM25.

Данная задача очень актуальна для специального поиска, в котором запросы написаны на естественных языках. Но есть основные проблемы с использованием BERT для поиска семантического сходства между текстовыми документами. Во-первых, чтобы сравнить пару документов, оба должны быть введены в модель, что приводит к значительным вычислительным затратам во время вывода. Во-вторых, для решения задачи семантического поиска широко используется подход, суть которого заключается в отображении документов в векторное пространство, где подобные документы ближе. Общие практики, такие как усреднение выходного слоя BERT или использование выходных данных [CLS] токена, дают плохие вложения. BERT выводит семантически значимые вложения предложений, которые можно сравнить, используя косинусное подобие. В этом докладе используем Sentence-BERT как часть архитектуры.

Методология. Задачу фонового связывания можно сформулировать следующим образом: учитывая новостную статью S и набор новостных статей A , получить другие новостные статьи из A , которые содержат важный контекст или справочную информацию о S . Эту задачу разумно рассматривать как частный случай новостей, рекомендацию, направленную на получение соответствующих статей из набора новостных статей A для запроса, созданного на основе статьи S . Мы предполагаем, что большинство статей, которые могут предоставить контекстную информацию о статье-запросе, вероятно, были опубликованы перед этим. С этой целью мы отфильтровываем прямые ссылки из полученных результатов, т. е. статьи, опубликованные после статьи запроса, не рассматриваются.

IR-BERT пытается решить проблему фонового связывания в два этапа. На первом этапе строим взвешенный запрос Q_i из статьи S_i и используем BM25 для получения p набора кандидатов документа. Пусть этот набор документов будет $R_b^i = \{d_1, d_2, d_p\}$, где $|R_b^i| = p$. На втором этапе мы проводим смысловой поиск Q_i по множеству найденных документов R_b^i , чтобы получить окончательный комплект документов $R_f^i = \{d_1, d_2, d_t\}$, где $|R_f^i| = t$. На рис. 1 показаны два этапа IR-BERT.

Взвешенный поисковый запрос и BM25. Сначала мы создаём эффективный поисковый запрос, который лучше всего отражает соответствующие темы статьи-запроса. Проблема сформулирована как извлечение основных ключевых слов из статьи запроса с присвоением им веса в соответствии с их релевантностью и объединением их для формирования запроса. Этот запрос затем используется для выполнения поиска по корпусу с помощью BM25, посредством которого ранжированный список генерируется.

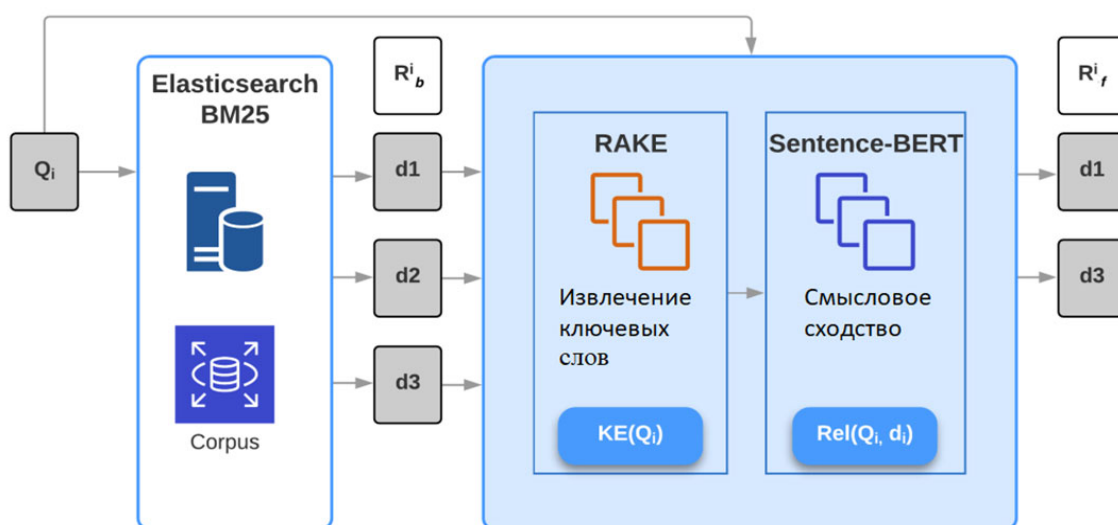


Рис. 1. Этапы поиска в конвейере IR-BERT

Чтобы найти ключевые слова $\{k_1, \dots, k_n\}$ из документа запроса S , мы сортируем все слова в S в порядке убывания их TF-IDF. Чтобы присвоить ключевым словам разные оценки релевантности, мы определяем вес w_j для каждого ключевого слова k_j следующим образом:

$$w_j = \text{nint} \left(\frac{s_j}{\sum_{k=1}^n s_k} * n \right),$$

$$s_j = \text{TF}(k_j, S) * \text{IDF}(k_j, A),$$

где n – количество ключевых слов, а TF и IDF – это две статистики: частота терминов и обратная частота документов. Чтобы применить вес для каждого ключевого слова, мы округляем его значение до ближайшего целого числа w_j и повторяем j -е ключевое слово k_j w_j количество раз в запросе. Мы также назначаем разные веса во вкладе ключевых слов в заголовке и теле статьи. Этот взвешенный запрос передаётся в BM25 и верхний p найденных статей (R_b^i), выбранных в качестве документов-кандидатов.

Семантический поиск с использованием BERT. На первом этапе для получения документов кандидатов используется BM25, полностью основанный на терминах частот слова, встречающихся в статье запроса. Чтобы понять контекст статьи запроса, важно принять семантику слова во внимание, потому что фон статьи необязательно может содержать те же ключевые слова, что и поисковый запрос, созданный на основе статьи запроса.

RAKE. Прежде чем проводить семантический поиск по множеству документов R_b^i , важно вводить только те слова Sentence-BERT, смысловое значение которых могло бы принести нам пользу. Таким образом, каждый документ в R_b^i передаётся через Rapid automatic Keyword Extraction algorithm (RAKE).

RAKE принимает список стоп-слов и запрос в качестве входных данных и извлекает их ключевые слова из запроса за один проход.

В основе RAKE лежит идея о том, что совпадения слов имеют значение при определении, являются ли они ключевыми словами. Отношения между словами автоматически адаптируются к стилю и содержанию текста. Это позволяет RAKE иметь адаптивное измерение совпадения слов, которые используются для оценки ключевых слов кандидата.

Sentence-BERT. Sentence-BERT (SBERT) представляет собой модификацию предварительно обученной сети BERT, которая добавляет объединение, работает поверх последнего уровня BERT и точно настроена на получение предложения фиксированного размера.

Siamese Network работает с вложениями предложений, которые специально обучены для работы с мерой сходства, такой как косинус-подобие. Архитектура Sentence-BERT во время вывода представлена на рис. 2.

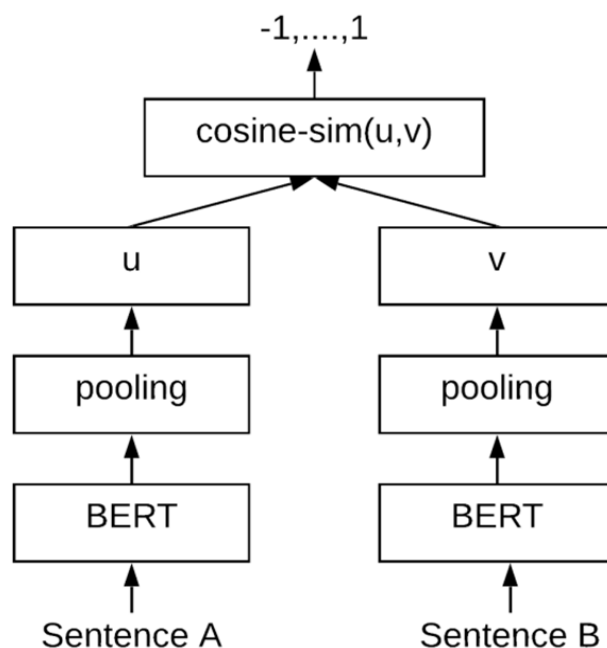


Рис. 2. Архитектура Sentence-BERT при вычислении сходства баллов

SBERT используется для получения вложений для документа запроса Q_i и каждого из документов R_b^i , извлечённых RAKE. Документы в R_b^i затем сортируются в соответствии с их косинусным сходством с запросом Q_i при помощи уравнения

$$\text{CosineSim}(e_1, e_2) = \frac{e_1 \cdot e_2}{\|e_1\| \cdot \|e_2\|},$$

где e_1 и e_2 – вложения двух сравниваемых документов.

Алгоритм 1 описывает шаги, необходимые для формирования окончательного списка документов R_f^i через SBERT-вложения.

Алгоритм 1. Изменение ранга кандидатов (Q_i, R_b^i) :

- 1: $p \leftarrow$ Количество документов, полученных BM25
- 2: $t \leftarrow$ Требуемое количество итоговых документов
- 3: $q_i \leftarrow \text{SBERT}(Q_i)$
- 4: for $j = 1, \dots, p$ do
- 5: $E_j = \text{SBERT}(R_{b,j}^i)$
- 6: $f_j = \text{CosineSim}(E_j, q_i)$
- 7: end for
- 8: $F \leftarrow R_b^i$ отсортировано по убыванию f_j
- 9: $R_f^i \leftarrow$ топ t документов в F
- 10: вернуть R_f^i

В качестве набора данных мы использовали выпуски российской газеты «Вечерняя Москва». Сборник «Вечерняя Москва» содержит 630 новостных статей и сообщений в блогах за 11 месяцев 2023 года.

Набор данных был предварительно обработан. Шаги обработки данных газеты «Вечерняя Москва» показаны на рис. 3.

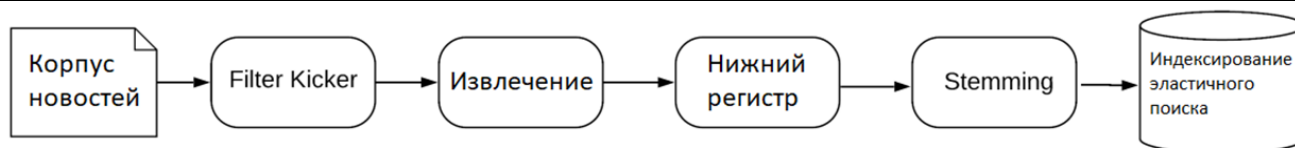


Рис. 3. Шаги обработки данных российской газеты «Вечерняя Москва»

Статьи представлены в формате JSON и включают поля для названия, даты публикации, кикера (заголовка раздела), текста статьи, а также ссылок на встроенные изображения и мультимедиа. Наш метод основан на Elasticsearch в качестве платформы индексации. Во время индексирования мы извлекли информацию из различных полей и проиндексировали их как отдельные поля Elasticsearch. Мы также создали новое поле для хранения текста статьи. Для этого мы сначала извлекли текстовое содержимое HTML из полей, отмеченных типом «sanitized_html» и подтипом «paragraph», а затем объединили их после использования регулярных выражений для извлечения необработанного текста из текста HTML. Далее мы выполнили нижний регистр, удаление стоп-слов и создание исходного текста. Окончательный предварительно обработанный текст затем индексировался как отдельное текстовое поле в Elasticsearch, представляющее тело статьи.

Мы использовали метод оценки по умолчанию в Elasticsearch, чтобы установить относительные веса для заголовка и тела статьи в поисковом запросе. Мы экспериментировали с различными сочетаниями ряда параметров, конечные значения для которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров

# слов в построенном запросе Q	100
# отфильтрованных результатов из BM25	180
# ключевых слов, созданных на основе RAKE	100
% ключевых слов в Q из заголовка	70
% ключевых слов в Q из тела	30

Метрики оценки. Основной метрикой, используемой TREC для фоновой связи задачи, является $nDCG@5$ со значением усиления 2^{r-1} , где r – уровень релевантности в диапазоне от 0 (даёт мало или вообще не даёт полезной информации) до 4 (обеспечивает критический контекст).

Мера разнообразия. Задача фоновой связывания – использовать полученный список разнообразных статей. Идея разнообразия может показаться субъективной, но можно вывести формулу

$$Diversity = \frac{1}{|Q|} \sum_{Q_i} \frac{1}{|R_f^i|} \sum_{a \in R_f^i} \sum_{b \in R_f^i, b \neq a} dist(d_a, d_b), \quad (1)$$

где для каждого полученного списка документов R_f^i вычисляем сумму расстояний между всеми возможными парами документов d_a и d_b . Расстояния между представлением документов могут быть зафиксированы с помощью таких показателей, как косинусное сходство. Эти расстояния затем суммируются по всем запросам/темам Q , чтобы получить разнообразные счета.

Полученные результаты. Мы рассматриваем относительную эффективность IR-BERT по сравнению с некоторыми другими методами участия в TREC 2021 в табл. 2.

Результаты показывают, что IR-BERT работает лучше, чем TKB48, который использует повторное ранжирование Doc2Query на основе преобразователя. IR-BERT также превосходит такие методы, как FUH-N и QU, которые используют матричные операции индексации и трансферное обучение из подтем соответственно.

Таблица 2

Оценки $nDCG@5$ IR-BERT и других участвующих методов в наборе данных российской газеты «Вечерняя Москва» за 2023 год

Методы	$nDCG@5$
KWVec	0.4620
IR-Cologne	0.4423
TKB48-DTQ	0.2925
FUH-N	0.2655
IR-BERT	0.3613

С другой стороны, такие методы, как KWVec и IR-Cologne, получили более высокие оценки $nDCG@5$, чем IR-BERT. KWVec похож на IR-BERT в использовании Sentence-BERT и Elasticsearch. IR-Cologne использует извлечённые объекты и отношения для реранжирования.

При исследовании влияния использования языковой модели на фоновую задачу связывания мы сравниваем производительность альтернативных архитектур в российской газете «Вечерняя Москва» за 2023 г. Мы перечисляем оценки $nDCG@5$ и $nDCG@10$ для каждого из этих подходов (см. табл. 3). Первые два подхода используют только первый этап нашей архитектуры, т. е. они просто создают поисковый запрос и используют BM25 для поиска. В то время как wBT+BM25 при построении запроса использует только взвешенное тело и заголовок, wQ+BM25 использует также веса для всех присутствующих слов в документе запроса. Мы видим, что wQ+BM25 даёт лучший показатель $nDCG@10$, что означает, что статьи, содержащие полезную справочную информацию, скорее всего, будут содержать ключевые слова аналогично статье запроса. Кроме того, IR-BERT достигает наивысшего балла $nDCG@5$, что позволяет предположить, что контекстуальное понимание истории статьи может принести пользу. Также интересно отметить, что использование IR-RoBERTa поверх BM25 из-за повторного ранжирования ухудшает производительность по сравнению с использованием стандартной модели BERT.

Таблица 3

Сравнение оценок $nDCG$ для альтернативных методов в наборе данных российской газеты «Вечерняя Москва» за 2023 год

Методы	$nDCG@5$	$nDCG@10$
wBT+BM25	0.4088	0.4155
wQ+BM25	0.3942	0.4315
IR-RoBERTa	0.394	0.3918
IR-BERT	0.4199	0.4104

В нашей последней серии экспериментов мы сравнивали разнообразные документы, полученные всеми нашими подходами к российской газете «Вечерняя Москва» за 2023 год с использованием уравнения (1) (см. табл. 4). Мы наблюдаем тот IR-RoBERTa, который относительно хуже работает на $nDCG@10$, извлекает самый разнообразный список справочных статей по заданному запросу.

Таблица 4

Сравнение разнообразия найденных документов из разных методов в наборе данных российской газеты «Вечерняя Москва» за 2023 год

Методы	Оценка разнообразия
wBT+BM25	0.9067
wQ+BM25	0.912
IR-RoBERTa	0.921
IR-BERT	0.9084



Заключение. В этой статье мы описали двухэтапный подход к решению проблемы. Задача фоновой связи новостного трека TREC 2023 – извлечь репрезентативные ключевые слова из запрашиваемой статьи и использовать их для получения набора кандидатов фоновых ссылок. Далее используется контекстуальное понимание, полученное от BERT, для выполнения семантического поиска. Наша модель IR-BERT достигла оценки $nDCG@5$ 0,3613 по версии TREC российской газеты «Вечерняя Москва» за 2023 год. В целом, участвующие модели и их эффективность демонстрируют эффективность повторного ранжирования за счёт использования контекстуального понимания моделей, основанных на трансформаторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shchadnaya, M. A. Neural networks as a factor / M. A. Shchadnaya, M. A. Sparing. – M.: Aeterna, 2018. – 163 p.
2. Esin, R. V. Structural diagram of the organization in an electronic learning environment / R. V. Esin. – M.: Piter, 2017. – 321 p.
3. Grishaeva, K. E. Functionality of various types and forms of aspects of their use in the process / H. E. Grishaev. – M.: Scientific Almanac, 2016. – 103 p.
4. Buzdova, A. A. Models of neural network / A. A. Buzdova, I. A. Semenov. – M.: AST-CENTER, 2013. – 84 p.
5. Nazarov, S. V. Architecture and design of software systems: monograph / S. V. Nazarov. – 2nd ed., revised. – M.: INFRA-M, 2018. – 374 p. // ZNANIUM.COM: electronic library system. – Access mode: <http://znanium.com/catalog.php#>, restricted. – Zagl. from the screen.
6. Wainer, H. (Ed.). (2000). Computerized adaptive testing. A, 2nd Edn. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. doi: 10.4324/9781410605931.
7. Gage Kingsbury, Steven L. Three Measures of neural network based on Optimal Information. Journal of Computerized Adaptive Testing. Vol 8, No 1 (2020).
8. Eggen Theo J. H. M. Multi-Searching for information in a neural network. Front. Educ., 11 December 2018, 3: 111. doi: 10.3389/educ.2018.00111.
9. Lord, F. M. (1970). «Relevant search using a neural network» in Computer-Assisted Instruction, ed W.H. Holtzman (New York, NY: Harper and Row), 139-183.

Плетнев Н. О., Полейчук П. А.
N. O. Pletnev, P. A. Poleychuk

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ
НА ДЕФОРМАЦИЮ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ**

**EFFECT OF HEAT-AFFECTED ZONE TEMPERATURE ON DEFORMATION DURING
PULSED LASER WELDING**

Плетнев Никита Олегович – старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(924)317-49-19. E-mail: nik1111ta@mail.ru.

Nikita O. Pletnev – Senior Lecturer, Department of «Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(924)317-49-19. E-mail: nik1111ta@mail.ru.

Полейчук Полина Анатольевна – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(924)317-49-19. E-mail: nik1111ta@mail.ru.

Polina A. Poleychuk – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(924)317-49-19. E-mail: nik1111ta@mail.ru.

Аннотация. В работе представлена зависимость температуры от времени во время импульсной лазерной сварки нержавеющей стали 12X18H10T, которая позволяет подробнее изучить влияние температуры на внутренние напряжения и появление деформации.

Summary. The paper presents the time dependence of temperature during pulsed laser welding of 12X18N10T stainless steel, which allows us to study in detail the influence of temperature on internal stresses and the appearance of deformation.

Ключевые слова: сварка, неразъёмные соединения, лазерная сварка, лазерный импульс, RMS.

Key words: welding, permanent joints, laser welding, laser pulse, RMS.

УДК 621.791.72

Введение. Ранее уже выполнялись исследования, в которых проводилось измерение деформации тонкостенных деталей при импульсной лазерной сварке. В работе были представлены отработки технологий трёхмерного лазерного сканирования листовых деталей из нержавеющей сталей, а именно 12X1810T, свариваемых при помощи импульсной лазерной установки BULAT LRS 300. Измерение деформации заготовок было проведено лазерным сканером ModelMaker MMDx100 на манипуляторе Nikon MCSx с разными временными промежутками. В конце статьи для понимания образования внутренних напряжений и появления деформаций было предложено добавить в экспериментальную установку возможность измерения температуры зоны термического влияния и заготовки в целом [1].

Методика проведения исследований. Сварка образцов осуществлялась при помощи импульсной лазерной установки BULAT LRS-300, представленной на рис. 1.

Устройство установки для лазерной сварки BULAT LRS-300:

1. основной блок установки с источником питания и системой охлаждения;
2. пульт управления, на котором расположены кнопки включения устройств и панель управления, служащая для изменения параметров и режимов работы установки;
3. лазерный излучатель с оптической контрольно-фокусирующей системой;
4. рабочий стол – ручной двухкоординатный;
5. механизм перемещения излучателя.

Для более точного понимания образования внутренних напряжений и появления деформации при импульсной лазерной сварке или последующего предупреждения их образования следует добавить в экспериментальную установку возможность измерения температуры зоны термического влияния и заготовки в целом. На следующем этапе было предложено повторить эксперимент с использованием измерения температуры деталей в процессе сварки с помощью цифрового измерителя температуры АТТ-2004 и хромель-алюмелевых термопар, размещённых в 10 мм от стыка и кромок пластины в начале и конце стыка (см. рис. 2).



Рис. 1. Основной блок установки



Рис. 2. Комплекс оборудования для исследований деформации и измерения температуры листовых деталей при выполнении стыковых сварных соединений лазерной сваркой

Результаты исследования и их обсуждение. При импульсной лазерной сварке пластины термопара 1 в начале сварного шва имела минимальную температуру 20,8 °С, а максимальную – 140,4 °С. Термопара 2, установленная в конце шва, имела минимальную температуру 21,0 °С, а максимальную – 145,8 °С. Далее были получены скан-модели при помощи лазерного сканера (см. рис. 3-5) и замерены деформации.

Температура при сварке была измерена при помощи термопар, которые были приварены импульсной лазерной сваркой при помощи присадочного материала марки 12Х18Н10Т в начале и конце сварного шва, на расстоянии 10 мм от края пластины и 10 мм от стыка двух пластин. Максимальная температура начала шва импульсной лазерной сварки составляет 148 °С, минимальная – 20,2 °С. Диаграмма зависимости температуры от времени первой термопары показана на рис. 6.

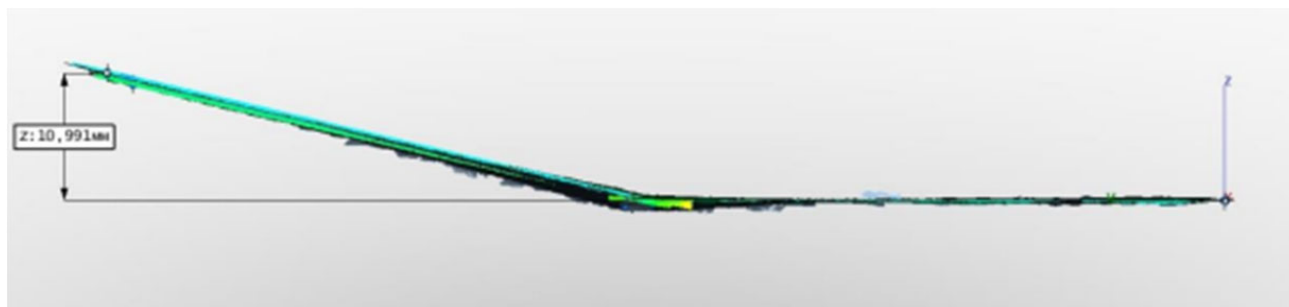


Рис. 3. Скан-модель в профиль с замером угловой деформации в 10,991 мм

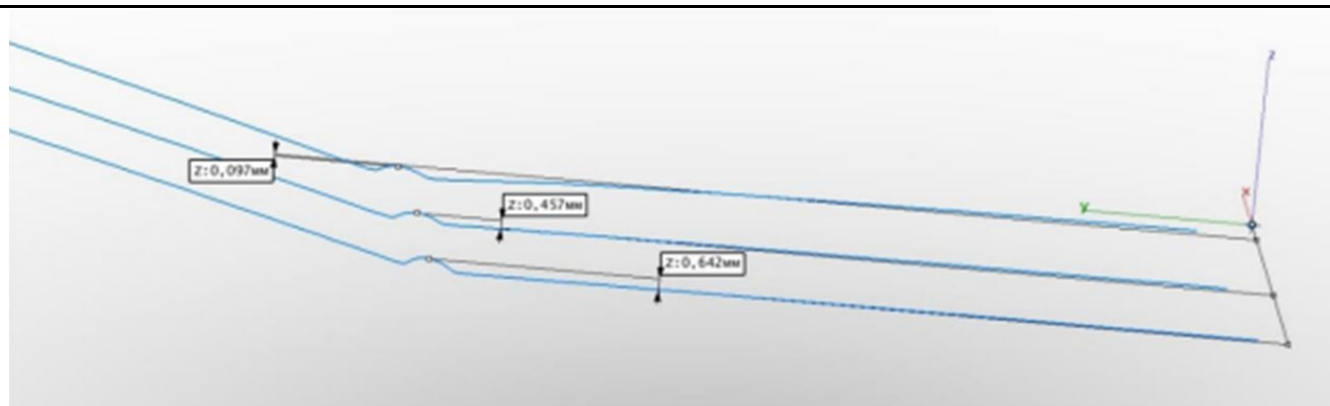


Рис. 4. Скан-модель полученного образца в трёх сечениях

Максимальная температура конца шва импульсной лазерной сварки составляет 89,9 °С, минимальная – 19,8 °С. Диаграмма зависимости температуры от времени второй термопары показана на рис. 7.

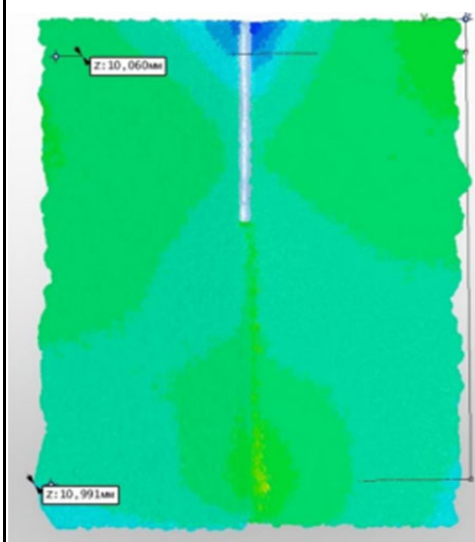


Рис. 5. Скан-модель пластины после сварки, вид сверху

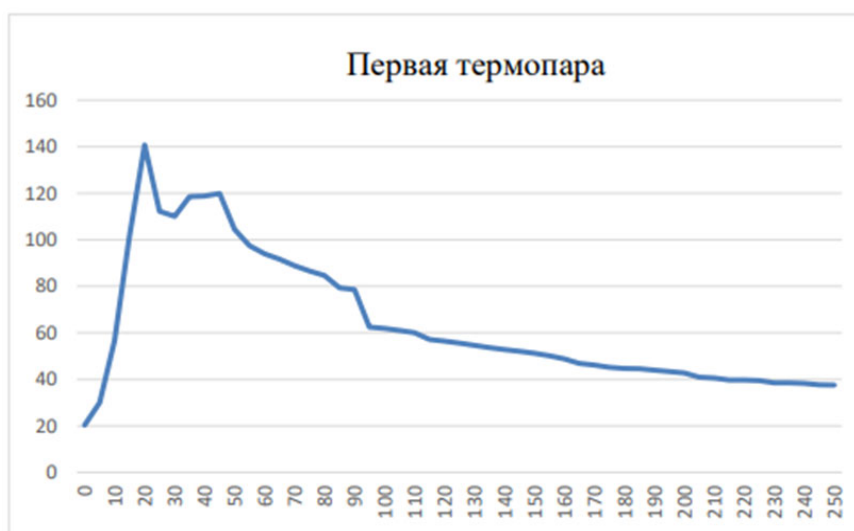


Рис. 6. Диаграмма зависимости температуры (°С) от времени (с) первой термопары



Рис. 7. Диаграмма зависимости температуры (°C) от времени (с) второй термопары

Так как термопары зафиксировали температуру не выше 190 °C, значит, воздействие на структуру основного металла на расстоянии 10 мм от шва не вызывает деформацию при сварке. Из этого следует, что деформация происходит в процессе сварки за счёт термического расширения при кристаллизации расплавленного металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полейчук, П. А. Деформация тонкостенных деталей при импульсной лазерной сварке / П. А. Полейчук, Н. О. Плетнев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3 ч. Ч. 1. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 92-94.
2. Полейчук, П. А. Влияние формы импульса на соотношение наплавленного металла в объёме сварной точки / П. А. Полейчук, Н. О. Плетнев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы II Международной научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 14-18 ноября 2022 г. / Редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 150-154.
3. Григорьев, А. А. Местные сварочные деформации тонколистовых конструкций и мероприятия по их уменьшению / А. А. Григорьев, А. Н. Сидоренков. – Ленинград: Книжная типография Полиграфиздата, 1957. – 127 с.
4. Винокуров, В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. – Москва: Машиностроение, 1984. – 280 с.

Загнетов В. А., Бахматов П. В.

V. A. Zagnetov, P. V. Bakhmatov

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ
НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ. МЕТОДЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, КОНСТРУКЦИОННЫЕ
ОСОБЕННОСТИ**

**PREVENTION OF CAVITATION DAMAGE TO OIL REFINING EQUIPMENT. METHODS,
TECHNICAL SOLUTIONS, DESIGN FEATURES**

Загнетов Валентин Александрович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

Valentin A. Zagnetov – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. Актуальность данной работы состоит в том, что кавитация как один из способов коррозионно-эрозионного процесса нефтепереработки имеет высокие эксплуатационные риски по причине своей малоизученности и отсутствия эффективных способов диагностирования. При своевременном выявлении и контроле коррозионно-эрозионных процессов кавитации на действующем оборудовании возрастает возможность прогнозирования и определения безопасного срока эксплуатации, своевременного планирования и производства ремонтных работ, снижения возможного внепланового ремонта, финансовых потерь по причине внепланового выхода из строя действующего оборудования, нанесения ущерба оборудованию и эксплуатационному персоналу. В данной работе рассмотрены опыт нефтеперерабатывающих предприятий по предотвращению кавитационного разрушения оборудования, способы неразрушающего контроля и прогнозные исследования по безопасному эксплуатационному ресурсу.

Summary. The relevance of this work consists in the fact that cavitation as one of the ways of corrosion-erosion process of oil refining has high operational risks due to its poor knowledge and lack of effective methods of diagnostics. At timely detection and control of corrosion-erosion processes of cavitation on the operating equipment the possibility of forecasting and determination of safe operation period, timely planning and production of repair works, reduction of possible unscheduled repairs, financial losses due to unscheduled failure of the operating equipment, damage to equipment and operating personnel increases. This paper considers the experience of oil refineries in preventing cavitation destruction of equipment, methods of nondestructive testing and forecast studies on safe operational life.

Ключевые слова: коррозия, кавитация, оборудование нефтепереработки, повышение надёжности и безопасности оборудования, неразрушающий контроль, прогнозирование.

Key words: corrosion, cavitation, oil refining equipment, improving the reliability and safety of equipment, non-destructive testing, forecasting.

УДК 532.528

Введение. Нефтеперерабатывающее производство – сложный производственный комплекс, состоящий из большого числа оборудования и систем, связанных технологическими трубопроводами с постоянным потоком продукта, находящимся под давлением и в условиях повышенных температур. Установки нефтепереработки эксплуатируются в сложных климатических и техноло-

гических условиях. От состояния трубопровода зависит работоспособность предприятия. В работах [1; 2] указано, что до 40 % аварий на трубопроводных системах связано с коррозионными разрушениями. В общем технологическом цикле переработки продуктов наиболее часто встречаются случаи коррозионного разрушения переходников в трубопроводных системах переработки нефтепродуктов (ТСПН).

Из всего многообразия локальных видов разрушения материалов можно сделать вывод, что в агрессивных жидкостях повреждения происходят особенно быстро в результате двойного воздействия как кавитационной эрозии, так и коррозии. Эрозия разрушает поверхность металла и способствует удалению с неё защитной окисной плёнки, создавая тем самым идеальные условия для коррозии.

До настоящего времени нет единого мнения о механизмах локального разрушения трубопроводных систем в процессе переработки нефтепродуктов, а отсюда и единого мнения по устранению причин данного явления. Поэтому материаловедческое обоснование и исследование эволюции структурных изменений при локальном разрушении трубных элементов с целью обеспечения их эксплуатационной надёжности являются актуальными задачами современной нефтеперерабатывающей промышленности.

Цели данной работы: установление природы локальных разрушений реальных трубопроводов нефтепереработки и анализ эффективности методов обнаружения и контроля локализованных очагов разрушений.

Методика экспериментального исследования. Для оценки влияния коррозионных процессов предоставлены образцы разрушенного трубопровода теплообменного аппарата на установке первичной переработки нефти (см. рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид исследуемых образцов

Ультразвуковая толщинометрия проводилась дефектоскопом EPOCH LTC (OLYMPUS) прямым пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП).

Микроструктурные исследования проводили на микроскопе Nikon MA200. Пробоподготовку для микроструктурного анализа проводили с помощью шлифовально-полировального станка Buehler AutoMet 250 с последующим травлением в 5%-м спиртовом растворе азотной кислоты 10-20 секунд до проявления микроструктуры. Фрактография образцов проводилась на растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N. Для проведения фрактографии образцы подвергали очистке спиртом в ультразвуковой ванне BST-200.

Профилометрию рентгеноскопией проводили с использованием Стапель 5 Ir 192, цифрового детектора DXR250C-W с программным обеспечением Rhythm и фильтром улучшения изображения на технологическом трубопроводе диаметром до 159×8 мм с продуктом и через изоляцию.

Результаты исследований. По внешнему виду атмосферная коррозия трубопроводных систем не приводит к существенному изменению макрорельефа поверхности, на которой сохраняются следы механической обработки и опескоструивания.

Коррозионное разрушение характеризуется локальностью на входном и выходном патрубках прохождения головного отводного продукта и отвода печного змеевика. Локально неравномерное разрушение наблюдается и в самих поражённых коррозией участках. Неравномерное коррозионное разрушение в виде сферических лунок, образующих цепочки, распространяется в направлении движения рабочей жидкости. Глубина и размеры сферических лунок различны и могут быть как поверхностными, так и сквозными, последние являются зародышами образования трещин.

Общая зона повышенного коррозионного износа неравномерна и по окружности патрубка – сохранение исходной толщины патрубка с одной стороны и утонения с другой стороны вплоть до разрушения стенки.

На внутренней поверхности змеевика чётко видны чёрные отложения, характерные для сульфидного металла. Толщина плёнки незначительна, она хорошо сцеплена с основным металлом и не имеет рыхлости. Локальные участки коррозионного повреждения характеризуются неравномерным распределением вдоль оси патрубков вытянутых лунок диаметром 5...7 мм и глубиной 0,1...2,0 мм, образующих как бы вытянутые бороздки. Характер распределения глубины поражений на исследуемых образцах виден на профилограммах толщины стенки, полученных методом ультразвукового сканирования с наружной стороны трубы (см. рис. 2).

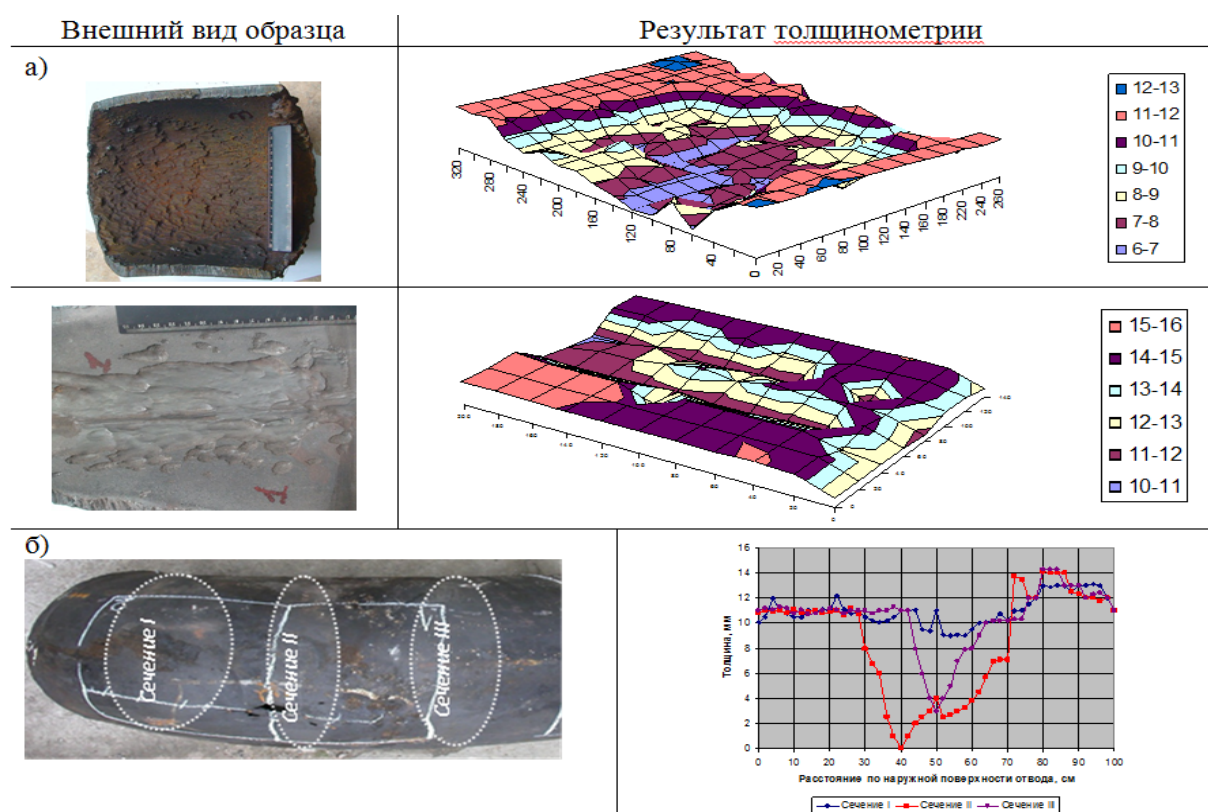


Рис. 2. Профилограммы распределения глубины поражений линейные (а) и объёмные в развёртке трубы (б)

Зона повышенного коррозионного износа характеризуется неравномерностью по окружности, т. е. сохранение исходной толщины в одном месте и уменьшение толщины вплоть до нулевой – в другом.

Результаты ультразвуковой толщинометрии методом сплошного сканирования (см. рис. 2) по трём сечениям отвода показали, что в сечении I толщина остаётся практически одинаковой во всех точках (на уровне 10 мм), а в местах турбулизации потока на радиусе изгиба (сечения II и III) – интенсивный местный коррозионный износ. Если для сечения I на всех зонах турбулизации потока расчётная скорость коррозии за 7-летний период эксплуатации составила около 0,3 мм/г, то в зоне турбулизации (сечения II и III) – 1,7 мм/г. Объёмный характер распределения глубины поражений в развёртке трубы свидетельствует о локализации поражений в определённой зоне (см. рис. 2, б).

Монтажные сварные кольцевые швы по концам отвода, выполненные, согласно технической документации, аустенитными электродами марки ЭА-395/9, в том числе то соединение, которое попало в зону воздействия турбулентных потоков, не имеют следов коррозии, что указывает на их высокую коррозионную стойкость.

Электронная микроскопия поверхности коррозионного разрушения показывает (см. рис. 3), что характер разрушения металла под продуктами коррозии (см. рис. 3, б, в) и самих продуктов коррозии (см. рис. 3, г, д) различается размерами трещин и микротрещин на несколько порядков. Отделение продуктов коррозии происходит целыми конгломератами (рис. 3, а). На поверхности металла в первоначальный момент формируются вздутия величиной в 15...25 мкм с последующим образованием микротрещин (см. рис. 3, в).

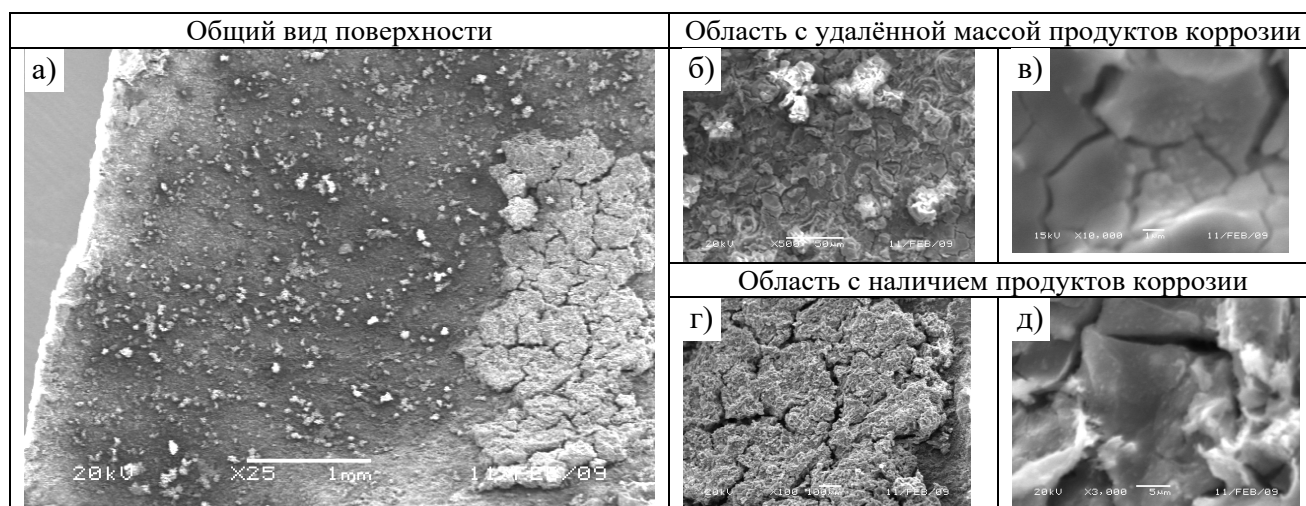


Рис. 3. Фрактограмма поверхности разрушения патрубка ТСПН

Как видно из рис. 4, разрушение происходит как вдоль, так и поперёк ферритно-перлитных полос, совпадающих с направлением прессования. Максимальная глубина трещин, заполненных продуктами коррозии, наблюдается в зонах углублений. Разрушение носит межкристаллитный и транскристаллитный характер. Чётко прослеживается образование: локальных коррозионных разрушений и субмикротрещин по границам перлитных зёрен (см. рис. 4, а); отслаивающихся коррозионных разрушений вдоль полосчатой структуры по границам ферритных скоплений (см. рис. 4, б); субмикروпузырей, вздутий, предшествующих разрушению (см. рис. 4, в). Наблюдаются характерные участки продуктов локальной коррозии с формированием коксовых отложений (см. рис. 4, г, д).

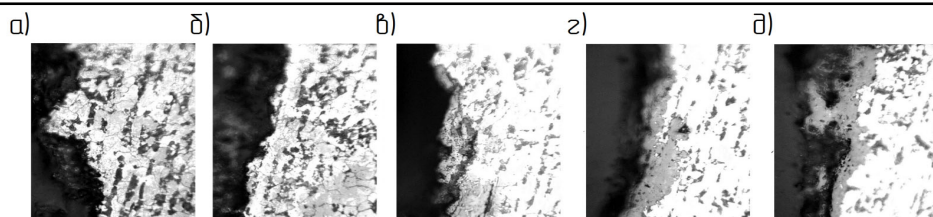


Рис. 4. Микроструктура ($\times 400$) в зоне локально-катастрофического разрушения ТСПН:
а – субмикротрещины по границам перлитных зёрен; б – отслаивающиеся разрушения;
в – субмикробузыри; г, д – коксовые отложения

Наибольший интерес вызывают образцы, разрушение поверхности которых происходит либо сразу после встречи потока продукта с усилением корневого валика кольцевого шва, либо по линии продольного шва (см. рис. 5).

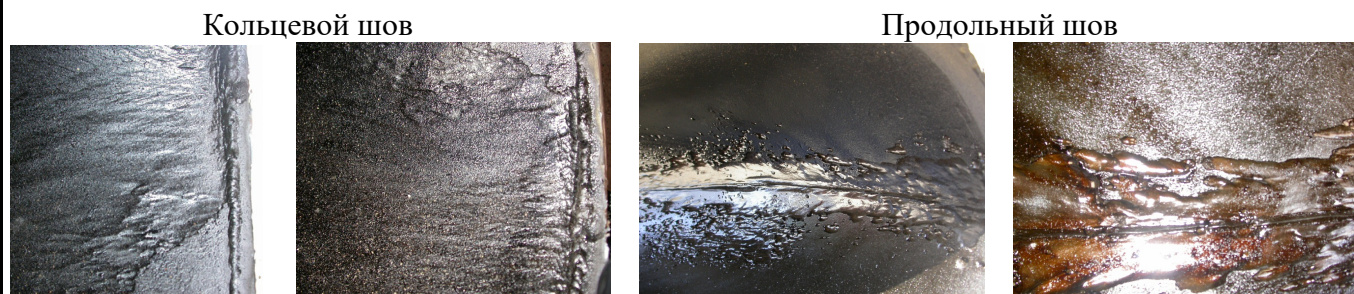


Рис. 5. Вид участков кавитационного разрушения внутренней поверхности трубопровода

Внешний вид участков разрушения говорит о прохождении кавитационного разрушения, при этом характерна сохранность внутренней поверхности стенки трубы до усиления корневого валика кольцевого шва и разрушение корневого валика продольного шва и его зоны термического влияния.

Известно [3–9], что при встрече с препятствием в ламинарном потоке жидкого вещества, транспортирующегося по технологическому трубопроводу, возникает срыв потока, его турбулизация и образование кавитационных пузырьков, приводящих к нарушению защитных сульфидных плёнок и ускоряющих процессы локальной эрозии стенки трубы за сварным швом по направлению потока продукта. Также известно, что в условиях ООО «Комсомольский НПЗ» стальные технологические трубопроводы собираются с применением ручной дуговой сварки (РДС), монтажные стыковые сварные соединения регламентируются ГОСТ 16037-80, преимущественно типом С17, не нормирующим высоту и ширину обратного валика. При этом величина зазора при сборке составляет 1,5...2,0 мм, а СТ ЦКБА 025-2006 допускает величину зазора до 3,5 мм, что гарантирует наличие усиления обратного валика. Величина усиления обратного валика (его ширина, а особенно высота) влияет на изменение проходного сечения трубопровода и вероятность образования кавитации, как местной (при наличии отдельных участков шва с завышенной высотой усиления), так и общей, по всему периметру шва (в случае равномерного завышения усиления).

Естественно, что при отсутствии усиления (нулевая высота) обратного валика кавитация не возникает, но при применении РДС в неповоротных стыках технологического трубопровода усиление валика гарантировано, особенно при наложении валика в нижнем положении.

Нахождение минимальной допустимой величины усиления, гарантирующей отсутствие кавитации, является актуальной задачей, требующей проведения как натурных экспериментов, так и нахождения математических расчётов, способствующих прогнозированию возникновения кавитации в конкретных условиях работы трубопровода и сформированного сварщиком обратного валика.

В настоящее время процесс изменения толщины стенки технологических трубопроводов преимущественно определяют ультразвуковой толщинометрией, имеющей ряд недостатков:

- требует снятия теплоизоляции;
- точечный контроль;
- отсутствие визуализации результатов контроля в объёме исследуемого участка;
- точность измерения зависит от человеческого фактора и рабочего состояния трубопровода.

В настоящее время рентгеноскопия уже применяется в производственных условиях ООО «Комсомольский НПЗ» для объёмной профилометрии с целью определения очагов коррозионного разрушения технологических трубопроводов нефтеперерабатывающего оборудования. Этот метод пришёл на смену ультразвуковой толщинометрии, которая требовала снятия теплозащитного покрытия и кожуха, точного определения места контроля и не гарантировала обнаружения очагов образования сквозных дефектов вблизи контрольного места.

Профилометрия рентгеноскопией также намного предпочтительней рентгенографии [10], т. к. не требует использования рентгенографической плёнки, а изображение может быть обработано в цифровом формате с увеличением чувствительности в 10 раз (см. рис. 6).

В отличие от плёнки, качество изображения улучшается по мере увеличения времени экспозиции детектора.

В большинстве практических случаев качество изображения лучше, чем на плёнке, получается при времени экспозиции детектора в несколько секунд. Длительные экспозиции позволяют получать изображения сверхвысокого качества.

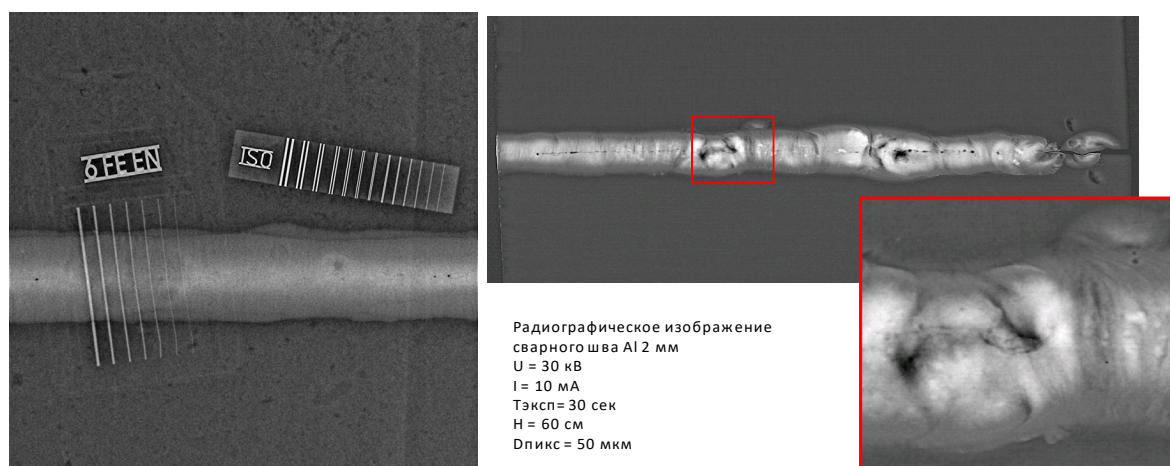


Рис. 6. Изображения, полученные рентгеноскопией

Полученное изображение имеет чёткие границы профиля стенки трубы и сварных швов. Наличие продукта позволяет просмотреть границы сварного шва. Визуально наличие следов коррозии можно оценить по состоянию профиля стенки трубы, а также по оттенкам градиентов серого. Контрастность изображения увеличивается со временем захвата изображения (см. рис. 7).

В ходе проведения работ были получены удовлетворительные результаты на действующих трубопроводах с параметрами контроля труб с диаметром до 219 мм и толщиной стенки до 8 мм. Для определения профилометрии с большими диаметром или толщиной стенки было недостаточно мощности используемого источника.

Основными недостатками при проведении работ были отмечены:

1. невозможность установки оборудования по причине отсутствия доступа к месту контроля, попадания дефектоскописта в зону облучения (отсутствие площадок обслуживания, лесов, мест подхода);
2. наличие сильной вибрации на трубопроводах, а также площадках обслуживания;
3. необходимость универсального приспособления для закрепления источника излучения;

4. большое время экспозиции (10...120 с) для получения профилометрии;
5. большое фокусное расстояние для получения полного изображения на экране детектора (возможности угла раскрытия коллиматора), что увеличивает время экспонирования;
6. отсутствие методик проведения контроля (с различными источниками излучения);
7. невозможность получения результатов на трубопроводах с водой.

Схема процесса



Результат рентгеноскопии

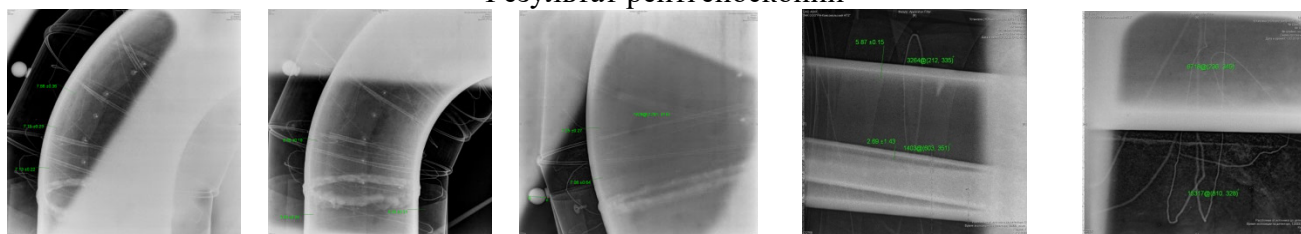


Рис. 7. Схемы процесса и результаты рентгеноскопии технологических трубопроводов

Основными преимуществами данного оборудования можно отметить:

1. работу на трубопроводах без снятия изоляции, с продуктом, на рабочем режиме, под высокой температурой;
2. визуализацию контролируемых мест с имеющимися дефектами, коррозией и эрозией;
3. возможность использования различных источников ионизирующего излучения в зависимости от поставленных задач;
4. получение результатов контроля и возможность их корректировки (изменение ракурса изображения) непосредственно на месте в процессе проведения работ для лучшей визуализации контролируемого участка.

Выводы:

1. Кавитационные процессы усиливают эрозию внутренней стенки технологического трубопровода, сокращают межремонтный период. Причиной возникновения кавитации может послужить усиление корневого валика. Нахождение минимальной допустимой величины усиления, гарантирующей отсутствие кавитации, является актуальной задачей, требующей как проведения натурных экспериментов, так и разработку математических методов расчёта, способствующих прогнозированию возникновения кавитации в конкретных условиях работы трубопровода и сформированного сварщиком обратного валика.
2. Использование цифровой радиографии даёт большие возможности в визуализации и понимании происходящих процессов в местах, где невозможно использовать стандартные методы контроля без дополнительных мероприятий, а также выполнении основных задач по контролю сварных соединений.
3. Использование Стапель 5 Ir 192, цифрового детектора DXR250C-W с программным обеспечением Rhythm и фильтром улучшения изображения позволяет проводить контроль сварных швов и коррозионного состояния технологического трубопровода диаметром до 159×8 мм с продуктом и через изоляцию.
4. Оценка геометрических параметров корневого валика, а также профилометрия (толщинометрия) возможны по профилю стенки трубы и центральной части снимка по градиенту серого.



5. Требуется автоматизация процесса профилометрии рентгеноскопией (создание мобильного комплекса) с возможностью проведения томографии объекта контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние структурных изменений металла труб на повреждения трубопроводных систем переработки нефтепродуктов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, А. В. Фролов и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 9. – С. 42-46.
2. Аналитическая оценка и разработка методов повышения коррозионной стойкости конструкционных сталей ТСПН / В. И. Муравьев, А. А. Евстигнеев, П. В. Бахматов, А. В. Бутин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1 (8). – С. 58-70.
3. Чернов, А. А. Кавитация высоковязкого газонасыщенного расплава / А. А. Чернов, А. А. Пильник // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2012. – № 2 (10). – С. 239-245.
4. Винокурова, И. М. Коррозия и защита оборудования от коррозии. Т. 1 / И. М. Винокурова. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2016. – 246 с.
5. Полякова, М. А. Теория коррозии и методы защиты от коррозии: учеб. пособие / М. А. Полякова, В. Г. Мустафина. – Магнитогорск: МГТУ, 2008. – 139 с.
6. Пронк, Д. Коррозия и защита от коррозии фланцевых соединений трубопроводов / Д. Пронк // Арматуростроение. – 2023. – № 1 (142). – С. 32-34.
7. Коррозия и защита от коррозии конструкционных материалов и сооружений: учеб. пособие / сост.: С. Б. Бурлуцкий, А. А. Еремеева. – СПб.: Изд-во «ЛЕМА», 2021. – 38 с.
8. Яковлева, И. В. Продление срока эксплуатации гидротурбин, подверженных кавитации / И. В. Яковлева, Д. А. МаксUTOва, А. Р. Халиуллина // Актуальные проблемы науки в студенческих исследованиях: сборник материалов VIII Всерос. студенческой науч.-практ. конф., Альметьевск, 21-22 ноября 2018 г. – Альметьевск: Изд-во «Перо», 2018. – С. 135-139.
9. Габец, В. С. Применение полиуретана для защиты от коррозии, кавитации, абразивного износа / В. С. Габец, А. А. Асламов, С. В. Габец // Вестник Ангарской государственной технической академии. – 2009. – Т. 3. – № 1. – С. 23-27.
10. РДИ 38.18.001-83. Инструкция по радиографической профильной толщинометрии технологических трубопроводов. – Волгоград: ВНИКТИнефтехимоборудование, 1983. – 47 с.

Короткий М. М., Бахматов П. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА РЕАКТОРНОЙ ПЕЧИ РИФОРМИНГА УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ИЗ СПЛАВА MANAURITE 900

Короткий М. М., Бахматов П. В.

M. M. Korotkiy, P. V. Bakhmatov

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА РЕАКТОРНОЙ ПЕЧИ РИФОРМИНГА УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ИЗ СПЛАВА MANAURITE 900

DETERMINATION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL STATE OF WELDED JOINT OF MANIFOLD OF REACTOR FURNACE REFORMING UNIT FOR HYDROGEN PRODUCTION FROM THE MANAURITE 900 ALLOY

Короткий Михаил Михайлович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

Mikhail M. Korotkiy – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. Актуальность данной работы заключается в том, что сплав MANAURITE 900 редко используется на территории России. Вследствие этого мало сведений как об основном материале, который поставляется заводом-изготовителем, так и о технологии сварки на предприятии, непосредственно монтирующем и эксплуатирующем конструкции из данного материала. Также отсутствуют сведения о ремонтных технологиях конструкций из данного сплава, учитывающих особенности эксплуатации конструкции. В работе по результатам экспериментальных исследований сформированы рекомендации по необходимым мероприятиям получения ремонтных сварных соединений удовлетворительного качества.

Summary. The relevance of this work lies in the fact that the MANAURITE 900 alloy is rarely used in Russia. As a result, there is little information both about the base material that is supplied from the manufacturer, and about the welding technology, which is written by the enterprise where the structure made from this material is directly installed and operated. There is also no information about repair technologies for structures made from this alloy, not to mention repair technology based on the operating characteristics of the structure. In this work, based on the results of experiments and research, recommendations are formed on the preliminary measures that are necessary to obtain repair welded joints of satisfactory quality.

Ключевые слова: установка производства водорода, реакторная печь риформинга, металл сварного шва, MANAURITE 900, испытания, структура, дефекты.

Key words: hydrogen production plant, reactor reforming furnace, weld metal, MANAURITE 900, testing, structure, defects.

УДК 621.791.019

Введение. Ввиду нераспространённости сплава MANAURITE 900 и производства конструкций из этого сплава за пределами территории России, относительно малого времени и опыта его использования, небольшой области применения возникает сложность изучения данного материала после продолжительной эксплуатации.

Данное исследование дополняет сведения о влиянии структуры металла, сформированной технологическим циклом изготовления трубы, на формирование сварного соединения, а также



влияние долгой эксплуатации в среде водорода и высоких температур на качество ремонтного сварного соединения.

Методы и материалы. Для исследования использовали материал коллектора под реакторной печью реформинга для производства водорода на АО «ННК-Хабаровский НПЗ».

Для разделения конструкции использовали ленточный станок HBS-1319V и полотна bahco sandflex cobra 3851-27-0.9-3/4. Станок обладает возможностью подачи СОЖ во избежание изменения в структуре металла от нагрева при интенсивном механическом воздействии на него.

Химический анализ проводили при помощи оптико-эмиссионного спектроанализатора Q4 TASMAN.

Для определения механических характеристик образцов при испытании на статическое растяжение использовали испытательную машину INSTRON 3382.

Для изготовления сварных образцов применяли аппарат аргонно-дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона OZAS FAL TIG – 400 AC/DC.

Сплав MANAURITE 900 используется в нефтехимическом производстве в качестве газоотводящих труб; для листовых деталей установок, которые работают при высоких температурах (700...850 °С) длительное время и с таким же сроком службы. Преимущественно применяется в газоперерабатывающей и нефтеперерабатывающей промышленности для производства водорода и аммиака [3].

Химический состав MANAURITE 900 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав MANAURITE 900

C	Si	Mn	Ni	S	P
До 0,1...0,18	До 0,5...1,5	До 1,5	30,0...35,0	До 0,03	До 0,03
Cr	Nb	Cu	Mo	Sn	Pb
19,0...23,0	0,8...1,2	До 0,25	До 0,5	До 0,01	До 0,01

Механические свойства материала MANAURITE 900 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства материала MANAURITE 900

Температура T , град	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, МПа	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·град)	Плотность материала ρ , кг/м ³	Удельное электро-сопротивление $R \cdot 10^{-9}$, Ом·м	Коэффициент температурного расширения $A \cdot 10^6$, 1/град
100	162 000	13	8020	600	16,9...20,1
820	-	25	-	-	-

Технология ремонта разработана специалистами АО «ННК-Хабаровский НПЗ» и одобрена Национальным агентством качества сварки (НАКС). В качестве нормативной документации использованы СТО 38.17.003-2009; СТО 00220368-008-2006; ОСТ 26.260.3-2001, сварочные материалы: Thermanit 21/33So. Толщина свариваемых деталей 30 мм, диаметр деталей в зоне сварки 300 мм. Форма подготовки кромок С3н по СТО 00220368-008-2006 (см. рис. 1). Расчётное количество валиков 28...36. Режимы сварки: диаметр электрода Ø 3...4 мм, сварочный ток при обратной полярности 100...120 А. Схема раскладки валиков указана на рис. 2. Источник питания – выпрямитель инвертор Caddy™ Arc 151i со сварочным генератором ESAB KHM 351 YS [6].

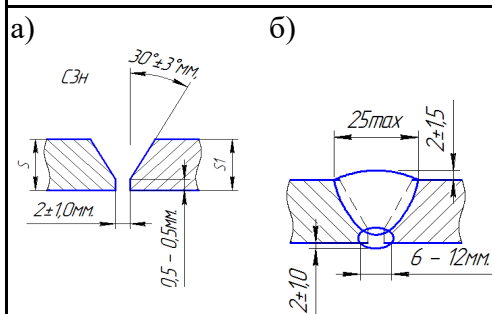


Рис. 1. Размеры сварного соединения до (а) и после сварки (б)

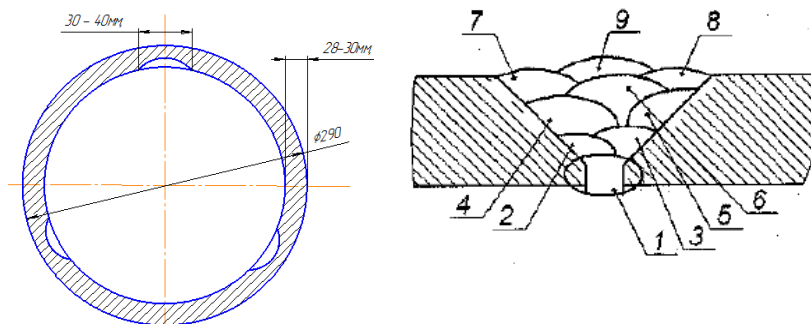


Рис. 2. Схема расположения прихваток и раскладки валиков многопроходного шва

Сварка корневого и последующих слоёв сопровождалась дефектами, такими как микронадрывы, трещины, поры. Дефекты выбирали механическим способом до полного удаления, местами удаляя сквозным пропиливанием корневой металл шва, вышлифовывая порядка 85...90 % сварного шва (см. рис. 3), и так каждый последующий проход, поддерживая межслойную температуру не более 100 °С (температуру выдерживали согласно ОСТ 26.260.3-2001, СТО 00220368-008-2006) [5].

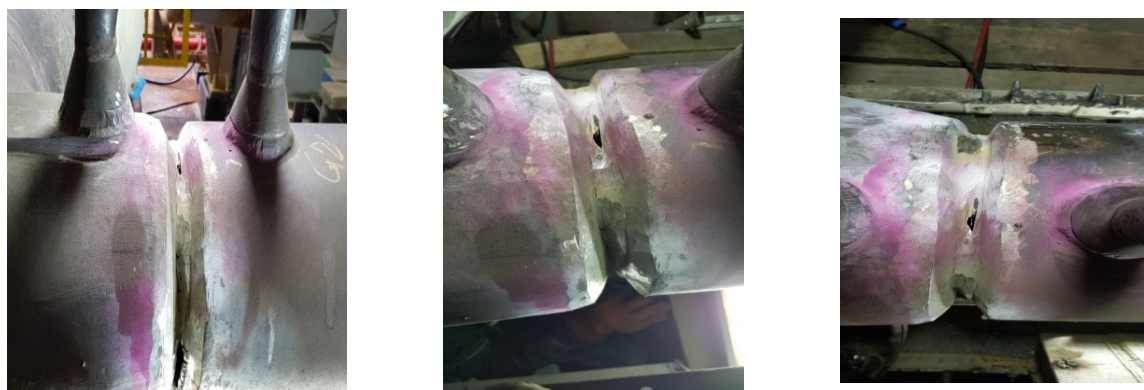


Рис. 3. Корневой валик стыкового соединения

Принято решение стабилизировать внутренние напряжения, выполнив стабилизирующий отжиг согласно подпункту 5.1.26 СТО 00220368-019-2017 по режиму: нагрев до 870...900 °С, выдержка 3 ч, охлаждение с нагревателем до 300 °С при скорости охлаждения 50...100 °С/ч, далее на воздухе) с целью снятия остаточных сварочных напряжений. Термообработку выполнили установкой РТ75-6 [1].

Наплавив кромку со стороны тройника нижнего коллектора, заваривали корень шва и все последующие слои (см. рис. 4).

Сварное соединение после ремонта отработало в штатном режиме порядка восьми месяцев, наружных дефектов на поверхности шва и зоны термического металла не выявлено, далее, выведя установку в ремонт, благополучно заменили коллектор на новый [6].

Для выявления количества фаз и расширения металла был изготовлен образец на дилатометр. Результаты дилатометрии представлены на рис. 5 [4].

Исследования на дилатометре показали: сталь имеет однофазную структуру до 1200 °С.

Для испытания на разрыв изготовили образец из сварной конструкции, в состав которой входят основной металл коллектора, основной металл тройника и сварной шов.

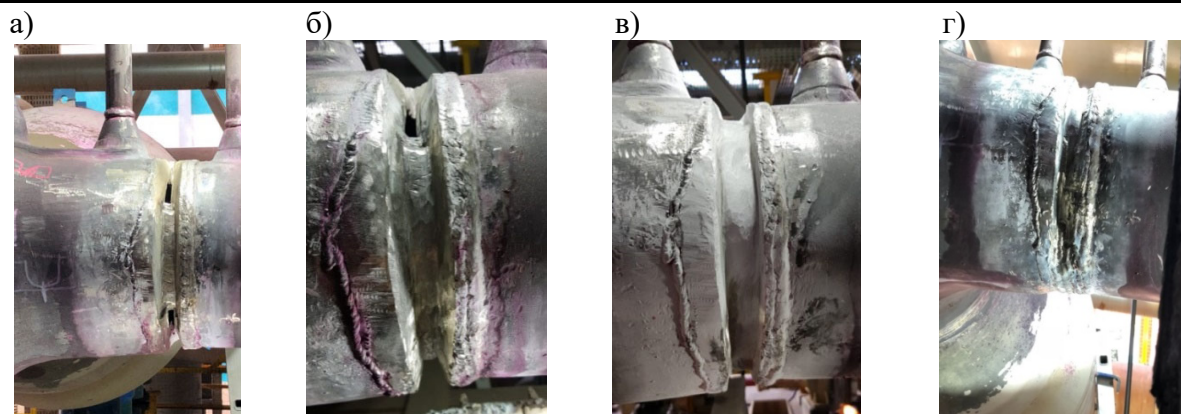


Рис. 4. Этапы заполнения кромок: а – первый слой; б – второй слой;
в – третий слой; г – четвёртый слой

В результате испытаний получили график, который изображён на рис. 6. Образец разрушился по основному металлу (см. рис. 7) [4].

По результатам испытаний предел прочности составил 119,3 МПа, что сильно отличается от характеристик, заявленных заводом-изготовителем – 329 МПа [4].

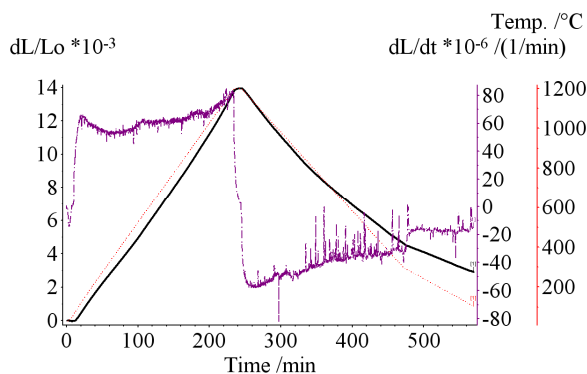


Рис. 5. Дилатограмма основного металла

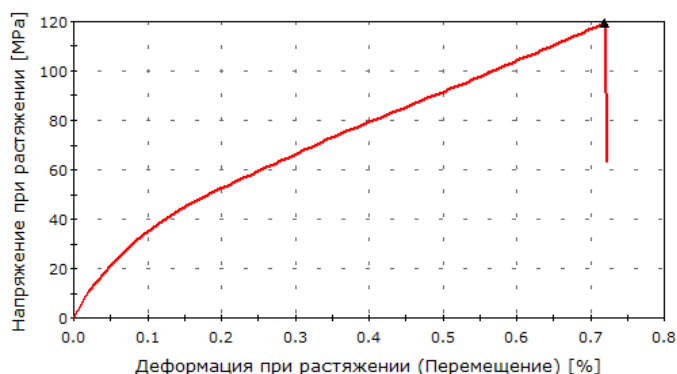


Рис. 6. График напряжения при растяжении

Для сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов были изготовлены образцы из металла коллектора (см. рис. 8).

После сварки в околошовной зоне, вдоль всего корня шва, образовалась холодная трещина (см. рис. 9).

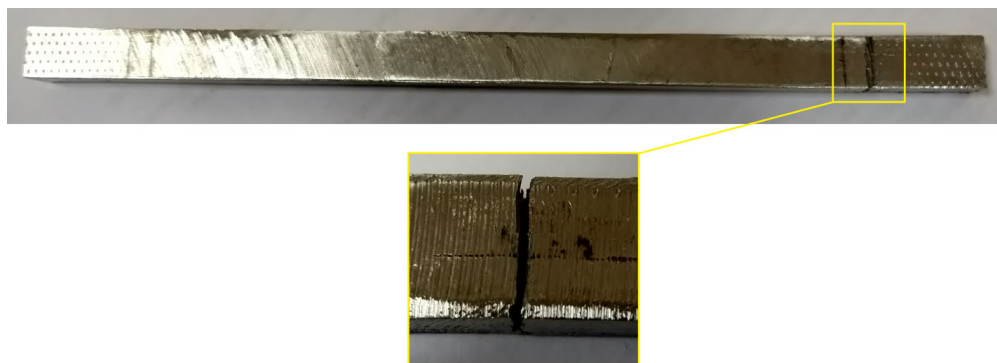


Рис. 7. Образец после статического растяжения



Рис. 8. Образцы для сварки



Рис. 9. Дефект в виде трещины вдоль всего корня шва



Рис. 10. Доломанный образец

После сварки обнаружены трещины в основном металле в зоне термического влияния (см. рис. 9). Произвели долом (см. рис. 10), после исследовали плоскость разлома на РЭМ (см. рис. 11-13).

На рис. 11 видна мелкозернистая структура – место зарождения горячей трещины, место пересечения дендритов основного металла и металла шва [4].

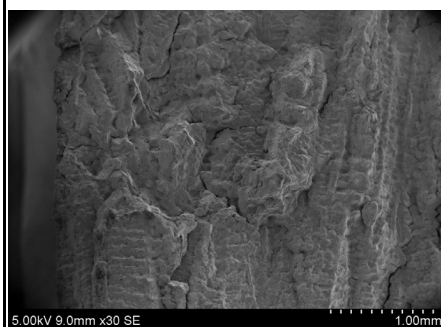


Рис. 11. Место зарождения трещины

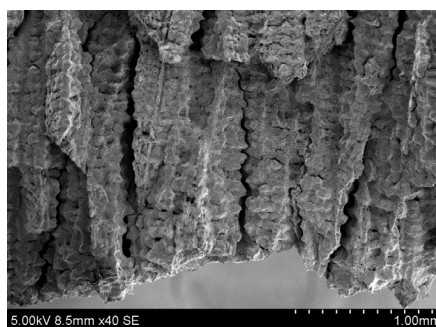


Рис. 12. Зона долома, верхний валик

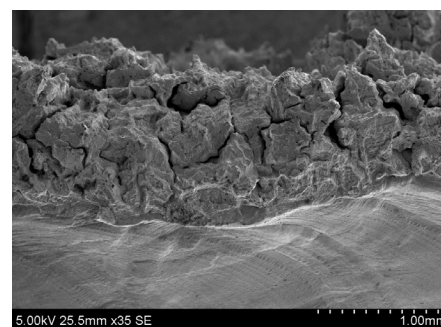


Рис. 13. Граница между основным металлом и металлом шва

Ближе к шву наблюдается мелкозернистая структура, по мере удаления от шва размер зёрен увеличивается (см. рис. 13).

Дендриты направлены в одну сторону, по направлению от внешней стенки к внутренней, такая структура характерна для центробежного литья [4].

Для микроанализа структуры подготовили образцы и залили в эпоксидный клей.

Сделали химический анализ основного металла и металла шва, места обозначены на рис. 14-16, результаты представлены в табл. 3, 4, 5.

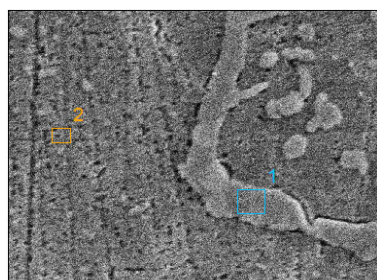


Рис. 14. Основной металл

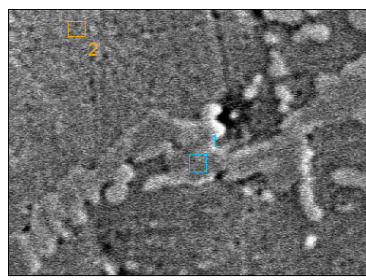


Рис. 15. Основной металл

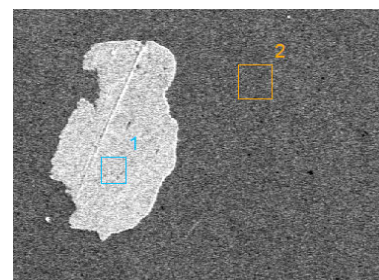


Рис. 16. Металл шва



Таблица 3

Химический состав (зоны на рис. 14)

В процентах

Si	Cr	Mn	Fe	Ni
зона 1				
1,89	60,05	-	18,31	19,74
зона 2				
0,99	19,41	1,53	44,65	33,42

Таблица 4

Химический состав (зоны на рис. 15)

В процентах

Si	Cr	Nb	Fe	Ni
зона 1				
4,41	64,40	11,09	-	20,09
зона 2				
-	18,97	-	43,95	37,08

Таблица 5

Химический состав (зоны на рис. 16)

В процентах

Cr	Fe	Ni	In
зона 1			
3,86	5,11	-	91,03
зона 2			
25,60	45,69	28,72	-

В межзёренном пространстве наблюдаются увеличение хрома в 2...2,5 раза и превышение количества никеля. Предположительно, эти элементы постепенно выделялись из зёрен в межзёренное пространство во время всего периода эксплуатации, что со временем привело к образованию хрупкой σ -фазы. Также в металле шва были обнаружены включения индия [4].

Выводы. Основной причиной образования трещин является способ изготовления труб, а именно центробежное литьё, вследствие чего образовалась крупнозернистая дендритная структура. После длительной работы в межзёренное пространство выделилась хрупкая σ -фаза с высоким содержанием хрома, которая при минимальных дуговых воздействиях разрушается по границам зёрен, вследствие чего образуются трещины.

Перед сваркой для восстановления пластичности рекомендуется произвести термическую обработку: нагреть коллектор до 1000 °С, когда σ -фаза становится неустойчивой и растворяется в аустените, выдержать 3-5 ч при этой температуре и охладить. Также при снижении температуры необходимо ускорять охлаждение при достижении 875 °С и заканчивая 650 °С для избежания повторного выделения σ -фазы в межкристаллитное пространство.

В случае невозможности произвести термическую обработку, необходимо производить предварительный подогрев свариваемых кромок для увеличения пластичности, уменьшения вероятности образования трещин и образования более однородной структуры металла шва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кухарец, А. А. Структура и свойства ремонтного сварного соединения коллектора реакторной печи реформинга установки производства водорода из сплава MANAURITE 900 / А. А. Кухарец, П. В. Бахматов, Б. М. Соболев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре,

06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – С. 71-74.

2. Макаров, Э. Л. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 487 с.

3. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for reformer furnace tubes. History of evolution // Archives of Foundry Engineering. – 2011. – V. 11. – № 2. – P. 47-52.

4. Короткий, М. М. Влияние аргонодуговой сварки сплава MANAURITE 900 на образование холодных трещин / М. М. Короткий, П. В. Бахматов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 года. В 4 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – С. 73-75.

5. Кухарец, А. А. Опыт ремонта элемента трубопровода для высокотемпературной подачи водорода в условиях нефтеперерабатывающего производства: автореф. ... дис. магистра / Кухарец Александр Анатольевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2020. – 16 с.

6. СТО 00220368-088-2006. Изготовление деталей и узлов из коррозионностойких сплавов на железоникелевой и никелевой основе, разнородных соединений и двухслойных сталей с плакирующим слоем из сплавов марок 06ХН28МДТ, ХН65МВ, Н70МФВ-ВИ. Типовой технологический процесс. – Введ. 2007-01-01. – Волгоград: ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры», 2006. – 49 с.

**О НАГРАЖДЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ НАГРАДОЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
А. А. БУРЕНИНА**



За большой вклад в развитие науки и многолетнюю добросовестную работу указом Президента РФ В. В. Путина от 4 декабря 2023 года № 919 награждён медалью «За заслуги перед Отечеством» II степени профессор кафедры «Авиастроение», доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук Анатолий Александрович Буренин.

От лица коллектива университета и редакции журнала поздравляем профессора А. А. Буренина с заслуженной наградой. Желаем силы и твёрдости духа, энергии и оптимизма, благополучия и надёжного тыла в семье, а также новых творческих достижений в науке и подготовке инженерных и научно-педагогических кадров.

Содержание

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Черный С. П., Савельев Д. О., Сбитнев Н. Р., Саяпина П. О. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ, ТРЕБУЮЩИМИ УЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	4
Черный С. П., Муравьев Е. М., Иванов Д. Р. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГОРОДСКОГО ТРАФИКА.....	11
Носков С. И., Чекалова А. Р. МИНИМИЗАЦИЯ РАССТОЯНИЯ МОДУЛЕЙ ОШИБОК АППРОКСИМАЦИИ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДО ИХ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ	20
Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	25
Андрианов И. К., Чепурнова Е. К. ВАРИАЦИОННАЯ ЗАДАЧА О СУММАРНЫХ ИЗДЕРЖКАХ ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ ПРОДУКЦИИ С ПОДВИЖНОЙ ПРАВОЙ ГРАНИЦЕЙ	32
Трещев И. А., Монастырская Е. И. СОБЫТИЙНАЯ ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ЗЛОУМЫШЛЕННИКА	42
Дружинин В. А., Азимов Х. Х., Андрианов И. К., Колесник М. Б., Иванов С. Н. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ	47
Дмитриев Э. А., Карпенко В. А., Одинокоев В. И., Евстигнеев А. И. ЭВОЛЮЦИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОР И ЕГО ПЕРЕМЕШИВАНИЕ	59
Дзюба В. А., Арсентьева К. А., Журавлева Е. В. ПАРАМЕТРЫ ДИАГРАММ «МОМЕНТ-КРИВИЗНА» ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С АРМАТУРОЙ А500 НА СТАДИИ БЛИЗКОЙ К РАЗРУШЕНИЮ	68
Маслов В. И., Куделько А. Р. РАЗРАБОТКА НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЫ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ.....	75
Ворощенко В. Д., Горькавый М. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В РОБОТИЗИРОВАННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ	82
Бутко В. П., Кузьмин Р. В. ГЕНЕРАТОР МИКРОГЭС, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ СИСТЕМУ АВТОБАЛЛАСТНОЙ НАГРУЗКИ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНОГО СПОСОБА СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ	90
Петрова А. Н., Фролов Д. О. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ РЕЛЕВАНТНЫЙ ПОИСК В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ	96
Петрова А. Н., Фролов Д. О. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОИСКА ФОНОВЫХ ССЫЛОК ПО СМЫСЛУ В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ.....	100

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Плетнев Н. О., Полейчук П. А. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НА ДЕФОРМАЦИЮ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ	107
Загнетов В. А., Бахматов П. В. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ. МЕТОДЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ	111
Короткий М. М., Бахматов П. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА РЕАКТОРНОЙ ПЕЧИ РИФОРМИНГА УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ИЗ СПЛАВА MANAURITE 900	119

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

О НАГРАЖДЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ НАГРАДОЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ А. А. БУРЕНИНА	126
---	-----

Научное издание

Учёные записки КНАГТУ
2024 № I (73)
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор
С. Н. Иванов

Подписано в печать 25.03.2024
Дата выхода в свет 29.03.2024

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,63.
Уч.-изд. л. 17,18.
Тираж 200. Заказ 31070

Отпечатано в типографии
КНАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27.

