

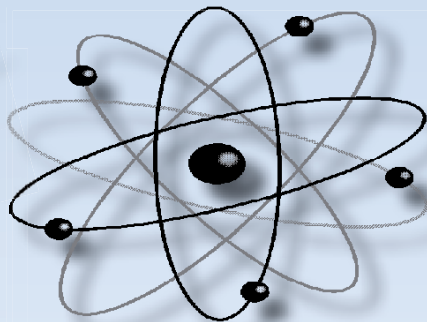
Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ V (69)

2023

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 КОМСОМОЛЬСКОГО-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 технологии и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологии 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

Ким К. К., Иванов С. Н.
K. K. Kim, S. N. Ivanov

РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ОБМОТКИ

TEMPERATURE CALCULATION OF SUPERCONDUCTING WINDING

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский пр., дом 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: snivanov57@mail.ru.

Sergey N. Ivanov – Dr. Sc., Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: snivanov57@mail.ru.

Аннотация. В статье приводится аналитическое решение тепловой задачи по определению «горячих» точек сверхпроводниковой обмотки, т. е. областей, где переход её в нормальное (резистивное) состояние наиболее вероятен. Предполагается, что источники тепловыделений расположены на поверхности обмотки и изменяются произвольным образом. Рассматриваются обмотки определённой конфигурации: длинные соленоиды с небольшой толщиной стенок, тонкие однослойные плоские обмотки галетного типа.

Summary. The article provides an analytical solution to the thermal problem of determining the «hot» points of the superconducting winding, i. e. the areas where its transition to a normal (resistive) state is most likely. It is assumed that the heat sources are located on the surface of the winding and change in an arbitrary way. Windings of a certain configuration are considered: long solenoids with a small wall thickness, thin single-layer flat windings of the biscuit type.

Ключевые слова: температура, сверхпроводниковая обмотка, потери, источник теплоты постоянной мощности.

Key words: temperature, superconducting winding, losses, constant power heat source.

УДК 537.312.62

Введение. Зачастую возникает необходимость в определении наиболее нагретых точек сверхпроводниковой обмотки как в переходном, так и стационарном режимах, т. е. областей, чей переход из сверхпроводящего состояния в нормальное (резистивное) наиболее вероятен. Аналитическое решение этой задачи с внутренними источниками теплоты в двухмерной, а тем более в трёхмерной постановке характеризуется значительными трудностями. Однако при относительно простой конструкции обмоток, в частности в случае длинных соленоидов с небольшой толщиной стенок или тонких (однослойных) плоских обмоток галетного типа, задача расчёта температуры может быть сведена к однородной и допускает аналитическое решение.

Постановка задачи исследования. Рассмотрим эквивалентную тепловую схему тонкой обмотки, намотанной на каркас. Собственно обмотка (толщиной a) и её изоляция (толщиной δ) имеют коэффициенты теплопроводности λ_1 и λ_2 соответственно.

Предполагается, что отвод тепловой энергии происходит с внешней поверхности обмотки через слой изоляции, h – коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки. Далее были сделаны следующие допущения:

1. каркас, на котором располагается обмотка, имеет крайне низкую теплопроводность по сравнению с теплопроводностью обмотки;
2. теплопроводность сверхпроводника на несколько порядков больше теплопроводности всех прочих материалов, используемых при изготовлении обмотки;
3. внешняя поверхность изоляции имеет температуру T_0 .

Решение задачи определения температуры. Для источника теплоты постоянной мощности (q) и для принятой эквивалентной тепловой схемы температура обмотки может быть найдена из системы

$$\begin{cases} \lambda_1 \frac{d^2 T_1}{dx^2} + q = 0 \\ \lambda_2 \frac{d^2 T_2}{dx^2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

при граничных следующих условиях:

$$T_1(a) = T_2(a); \quad \frac{dT_1(0)}{dx} = 0; \quad \frac{\lambda_1 dT_1(a)}{dx} = \frac{\lambda_2 dT_2(a)}{dx}.$$

Если обозначить $a + \delta = b$, тогда решение системы уравнений (1) при принятых граничных условиях имеет вид

$$\begin{aligned} T_1 &= -\frac{qx^2}{2\lambda_1} + \frac{qa^2}{2\lambda_1} - \frac{qa^2}{\lambda_2} + q \frac{ab}{\lambda_2} + \frac{qa}{h}; \\ T_2 &= -\frac{qax}{\lambda_2} + \frac{qa}{h} + \frac{qab}{\lambda_2} + T_0. \end{aligned}$$

Уравнение теплопроводности для принятой эквивалентной тепловой схемы при наличии источника теплоты, изменяющейся во времени, можно записать следующим образом:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q(t) = C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

где C – теплоёмкость обмотки.

Учитывая принятое выше допущение о незначительной толщине обмотки по сравнению с другими её размерами, уравнение (2) можно заменить уравнением

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

с начальными и граничными условиями

$$T(x, 0) = T_0; \quad T(b, t) = T_0; \quad \frac{\partial T(b, t)}{\partial x} = -\frac{hq(t)}{\lambda CV},$$

где V – объём обмотки.

В дальнейшем будем использовать следующие обозначения:

$$u = \frac{T - T_0}{T_0}; \quad \bar{x} = \frac{x}{b}; \quad \alpha = \frac{b^2 c}{P \lambda}; \quad \tau = \frac{t}{P}; \quad Q(t) = \frac{q(t) h b}{\lambda C T_0 V},$$

где P – период изменения тепловой мощности.

Уравнение (3) в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \bar{x}^2} = \alpha \frac{\partial v}{\partial \tau} \quad (4)$$

при начальных и граничных условиях

$$\begin{cases} v(\bar{x}, 0) = 0 \\ v(1, \tau) = 0 \\ \frac{\partial v(1, \tau)}{\partial \bar{x}} = Q(\tau) \end{cases}.$$

Суммарные потери в обмотке, которые теперь входят в граничные условия, можно разложить в ряд Фурье и представить в виде

$$Q(\tau) = \left[\frac{Q_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (Q_{1k} \cos 2\pi k \tau + Q_{2k} \sin 2\pi k \tau) \right].$$

Применим преобразование Лапласа к уравнению (4), в результате получим

$$\frac{d^2 Q}{d \bar{x}^2} = \alpha p \theta. \quad (5)$$

Из [1] известно решение уравнения (5):

$$\theta = \left[\frac{Q_0}{2P\sqrt{\alpha p}} + \frac{1}{\sqrt{\alpha p}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{pQ_{1k} + 2\pi k Q_{2k}}{P^2 + (2\pi k)^2} \right] \left(\frac{sh(\sqrt{\alpha p}(1 - \bar{x}))}{ch\sqrt{\alpha p}} \right).$$

После выполнения преобразования Лапласа и не сложных, но трудоёмких вычислений получаем искомое распределение температуры:

$$\begin{aligned} v = & \frac{Q_0(1 - \bar{x})}{2} + 2 Q_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin[\mu_n(1 - \bar{x})]}{\mu_n^2} e^{-\frac{\mu_n^2 \tau}{\alpha}} + \\ & + \frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\left[-\frac{\mu_n^2}{\alpha} Q_{1k} + 2\pi k Q_{2k} \right] \sin[\mu_n(1 - \bar{x})]}{\left[\left(\frac{\mu_n^2}{\alpha} \right)^2 + (2\pi k)^2 \right]} e^{-\frac{\mu_n^2 \tau}{\alpha}} \right\} + \\ & + \frac{1}{2\sqrt{\alpha \pi k} (\cos 2\sqrt{\alpha \pi k} + ch 2\sqrt{\alpha \pi k})} \{ Q_{1k} [(\cos 2\pi k \tau - 3 \sin 2\pi k \tau) A(x) + \\ & + (\cos 2\pi k \tau + \sin 2\pi k \tau) B(x)] + \\ & + Q_{2k} [(\cos 2\pi k \tau - \sin 2\pi k \tau) A(x) - (\cos 2\pi k \tau + \sin 2\pi k \tau) B(x)] \}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A(x) &= x \cdot [ch\sqrt{\pi \alpha k} \sin \sqrt{\pi \alpha k}(2 - x) - ch\sqrt{\pi \alpha k}(2 - x) \sin \sqrt{\pi \alpha k}], \\ B(x) &= x \cdot sh\sqrt{\pi \alpha k}(2 - x) \cos \sqrt{\pi \alpha k} - sh\sqrt{\pi \alpha k} \cos \sqrt{\pi \alpha k}(2 - x), \\ \mu_n &= (2n + 1) \frac{\pi}{2}. \end{aligned}$$

Изменение температуры обмотки в установившемся периодическом режиме получим, положив $\bar{x} = 0$ при $\tau \rightarrow \infty$:

$$v = \frac{Q_0}{2} + \frac{1}{2\sqrt{\alpha \pi k} (\cos 2\sqrt{\alpha \pi k} + ch 2\sqrt{\alpha \pi k})} \times$$

$$\times [(\cos 2\pi k\tau - \sin 2\pi k\tau) \sin 2\sqrt{\alpha\pi k}(Q_{1k} + Q_{2k}) + \\ + (\cos 2\pi k\tau + \sin 2\pi k\tau) \operatorname{sh} 2\sqrt{\alpha\pi k}(Q_{1k} - Q_{2k})].$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Абраманич, И. Г. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости / И. Г. Абраманич, Г. Л. Лунц, Л. Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1968. – 416 с.
2. Ким, К. К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости: моногр. / К. К. Ким. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 360 с.
3. Ким, К. К. Использование сверхпроводящего подвеса в транспортных системах / К. К. Ким // Электротехника. – 2000. – № 6. – С. 16-19.
4. Уилсон, М. Сверхпроводящие магниты / М. Уилсон. – М.: Мир, 1985. – 408 с.
5. Шубин, М. А. Псевдодифференциальные операторы и спектральная теория / М. А. Шубин. – М.: Добросвет, 2003. – 299 с.
6. Андрианов, И. К. Построение обобщённого критерия оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения / И. К. Андрианов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 4-9.
7. Дмитриева, Т. Л. Разработка и тестирование численных алгоритмов решения условно экстремальных задач / Т. Л. Дмитриева, Х. Уламбаяр // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 59-72.



Рыжова Е. Л., Ким К. К., Иванов С. Н.
E. L. Ryzhova, K. K. Kim, S. N. Ivanov

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ

EVALUATION OF TRACTION MOTOR RELIABILITY BASED ON THE STATE OF WINDING ELECTRICAL INSULATION

Рыжова Елена Львовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский проспект, д. 9; тел. 8(812)457-81-42. E-mail: toe@pgups.ru.

Elena L. Ryzhova – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: toe@pgups.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский проспект, д. 9; тел. 8(812)457-81-42. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: snivanov57@mail.ru.

Sergey N. Ivanov – Dr. Sc., Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: snivanov57@mail.ru.

Аннотация. Эксплуатация тяговых электрических двигателей показывает, что основной процент дефектов обусловлен износом изоляции обмоток, от характера которого в основном зависят показатели надёжности и долговечности всего двигателя. Усовершенствование изоляционных систем и технологий их изготовления позволяет существенно улучшить эксплуатационные параметры изоляции обмоток двигателей. Для тяговых двигателей на ряд ближайших лет можно прогнозировать применение на основе термостойких (слюда-ных) пропиточных составов термореактивной изоляции, слюдяной бумаги с высокой пористостью при одновременном улучшении качества технологических процессов изготовления изоляции. Создание усовершенствованных изоляционных систем тяговых двигателей с использованием эпоксидного компаунда без отвердителя перспективно при включении отвердителя в пропитываемую систему. Применение эпоксидно-полиарилатных компаундов вызывает определённый интерес в случае неодинакового содержания компонентов в виде волокнистых связующих плёнок, исключая полиарилатную связующую компоненту.

Summary. The operation of traction electric motors shows that the main percentage of defects is caused by the wear of the winding insulation, the nature of which mainly determines the reliability and durability of the entire engine. The improvement of insulation systems and their manufacturing technologies makes it possible to significantly improve operational parameters of motor winding insulation. For traction engines in the coming years, it is possible to predict the use of thermosetting insulation based on heat-resistant (mica) impregnating compounds, mica highly porous paper, while improving the quality of technological processes for the manufacture of insulation. The creation of advanced insulation systems of traction motors using an epoxy compound without a hardener is promising when the hardener is included in the impregnated system. The use of epoxy-polyarylate compounds is of particular interest in the case of unequal content of components in the form of fibrous binder films, excluding the polyarylate binder component.

Ключевые слова: надёжность электрических машин, тяговый двигатель, электрооборудование, отказы, изоляция обмоток, электрическая прочность, термостойкость, электроизоляционные материалы.

Key words: reliability of electric machines, traction motor, electrical equipment, failures, winding insulation, electrical strength, heat resistance, electrical insulation materials.

УДК 679.743.1

Введение. Пригодность для эксплуатации и надёжность электрических машин – главные условия для их широкого применения в различных системах электротехнических комплексов. Определить надёжность локомотивов и оценить ресурс и/или техническое состояние работы подвижного состава возможно путём количественного анализа отказов отдельных элементов структурной схемы рассматриваемого объекта, который показывает, что определяющим и наиболее часто повреждаемым элементом являются именно тяговые электродвигатели, являющиеся максимально нагруженной частью силовой установки электровоза. За последние несколько десятилетий резко обострилась важнейшая научно-техническая проблема повышения надёжности тяговых двигателей (ТД), хотя она всегда являлась объектом особого внимания как проектировщиков оборудования, так и эксплуатационного персонала, что объективно связано со следующими причинами:

- увеличение сложности отдельных узлов и элементов ТД;
- интенсивность режимов работы и экстремальность условий работы ТД (высокие скорости, температуры, частоты вращения, плотности тока и давления, вибрация, перепад температур и т. д.);
- повышение требований к качеству работы и выполняемым ТД функциям (высокая точность, эффективность, экономическая и техническая цена отказа и т. д.);
- исключение контроля человеком функционирования ТД и его элементов из-за полной или частичной их автоматизации [1–6].

Надёжность тяговых двигателей напрямую связана с их отказами, которые подразделяются по следующим признакам:

- конструкционные, т. е. отказы из-за несовершенства, а в ряде случаев отклонения или нарушения нормативно-технических требований, регламентирующих процессы проектирования и конструирования двигателя (10...15 %);
- технологические, т. е. отказы вследствие нарушения календарного графика и непосредственно качества производства или ремонта (20...35 %);
- эксплуатационные, т. е. отказы в условиях непосредственной эксплуатации двигателей, например из-за отказа или отсутствия тепловой защиты, нарушений условий эксплуатации, стохастического увеличения нагрузки, которую практически невозможно спрогнозировать, естественного износа узлов и старения материалов (50...70 %).

Как можно заметить, основная часть всех отказов ТД возникает из-за технологических причин (недостаточного качества ремонта) и вследствие сложных условий эксплуатации. При исследовании надёжности технических систем или отдельных изделий, а также изучении статистики причин отказов электрических машин пользуются методом «слабых звеньев», анализируя физические процессы, обеспечивающие требуемое функциональное назначение и возникающие непосредственно в тех частях, которые в данных условиях характеризуются минимальной надёжностью, а затем на этой основе определяется результирующая надёжность всей технической системы. При исследовании и нахождении минимально надёжного элемента в тяговых двигателях обмотка статора выделяется как «слабое звено». Действительно, отказы ТД, по данным экспериментальных и статистических исследований, происходят в основном из-за повреждения обмоток в виде межвитковых замыканий (93 %), гораздо реже – вследствие пробоя межфазной изоляции (5 %) и пазовой изоляции (2 %) [1].

Современное состояние проблемы. Выходы из строя изоляции ТД определяются сложными эксплуатационными условиями, включающими не только климатические факторы, но и та-

кие специфические параметры, как профиль пути, скорость изменения и величины коммутационных перенапряжений, особенности трафика и интенсивность движения, грузонапряжённость и т. д. На нагрев, особенно вращающихся обмоток, и, как следствие, термическое разрушение их изоляции влияет не только превышение расчётных температур обмоток, но и резкое скачкообразное изменение нагрузок двигателей, частоты их вращения, механических возмущений (давление, вибрации, ударные воздействия и т. д.), процентное содержание влаги, наличие агрессивных веществ и ряд других факторов [6; 7; 8]. Различия отказов связаны не только с климатическими зонами эксплуатации, но и с сезонностью. Данные подтверждают, что наиболее неблагоприятным для тяговых двигателей является переходный осенне-зимний период, когда имеющие место перепады температур, наличие конденсата, попадание внутрь двигателя воды или снега приводят к увлажнению изоляции и, соответственно, способствуют резкому снижению электрического сопротивления [9; 10]. Во время среднесуточных колебаний температуры воздуха и при её резком повышении изоляция ТД в значительной степени теряет механическую прочность, становится жёсткой и хрупкой, что приводит к образованию механических дефектов: расслоений, трещин и пористости [11].

Таким образом, доленое количество дефектов при эксплуатации, проявляющихся в системе изоляции обмоток, составляет около 50...60 % от общего числа повреждений. Сложность прогнозного оценивания этой величины зависит не только от уровня основных эксплуатационных нагрузок, воздействующих на изоляцию обмоток (уровень вибрации, температура обмотки, коммутационные перенапряжения, влажность окружающей среды), но и от вариативного сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров [12].

Программы обеспечения и повышения надёжности включают целый ряд принципиально важных требований к изоляции обмоток статоров, от выполнения которых кардинально зависит технический уровень ТД в виде таких показателей надёжности при эксплуатации, транспортировании и хранении, как безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность, а также обеспечивается их конкурентоспособность на рынке.

На основе анализа отраслевых стандартов ведущих энергомашиностроительных предприятий промышленных отраслей России, ряда действующих стандартов международной электротехнической комиссии, а также рекомендаций американского Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) применительно к электрической изоляции разработаны актуализированные требования для электрических машин среднего и высокого напряжения.

Основные требования, предъявляемые к изоляции обмотки, включают обеспечение:

- высокой длительной и кратковременной электрической прочности;
- малых токов утечки по изоляции и, соответственно, минимальных потерь от их протекания;
- структурной однородности и монолитности, исключающих воздушные включения с целью снижения вероятности возникновения электрических разрядов;
- применительно к изоляции обмоточного провода высокой адгезии, что исключает граничные разряды в местах прилегания медных проводников и корпусной изоляции;
- высоких термостойкости и теплопроводности, чтобы снизить тепловое сопротивление и обеспечить минимальный тепловой барьер между сердечником статора и активной медью.

Пробивное напряжение характеризует состояние наиболее «слабого звена» (или наименее надёжного) изоляции ТД и является основным критерием его работоспособности. Необходимость использования критериев безотказности, которые можно определять без разрушения электрической изоляции (ёмкость изоляции, активное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь и др.), весьма актуальна, поскольку на практике определение величины пробивного напряжения связано с необратимым разрушением изоляции.

Количество внешних и внутренних факторов, определяющих физическое состояние и, как следствие, качество изоляции обмоток, срок службы и ресурс, в большой степени зависит от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов и их взаимного влияния. Например, для верификации параметров долговечности необходим обоснованный выбор технологии из-

готовления изоляционных материалов, определение конструктивных и технологических параметров изготовления обмоток, учёт изменений, которые происходят в изоляционных материалах при эксплуатации с учётом таких внешних факторов, как:

- нагрузки, связанные с аккумуляцией тепловых потерь: количество теплоты, выделяющейся в обмотке, градиенты температур, тепловые удары и тепловые перегрузки;
- нагрузки, связанные с электромагнитным преобразованием энергии: номинальное напряжение, коммутационные перенапряжения, количественные характеристики электромагнитного поля;
- нагрузки механического и термомеханического характера (термомеханические напряжения, вибрационные скорости и ускорения, тепловые удары, электродинамические усилия), обусловленные отличающимися коэффициентами теплового расширения активных проводниковых материалов и элементов системы изоляции, конструктивными особенностями обмоток, напряжения, возникающие в местах изгиба при формировании лобовых частей обмоток в процессе изготовления и при эксплуатационных воздействиях вибраций в рабочих режимах;
- нагрузки, обусловленные категоричностью климатического назначения оборудования: температура, влажность, давление, химический состав рабочей и внешней среды, пыль, солнечная радиация и т. п. [12–14].

При этом основным фактором, определяющим срок службы изоляции ТД, является термо-реактивное старение изоляции под действием температуры. В процессе эксплуатации в тяжёлых условиях внешних воздействий обмотки одновременно подвергаются воздействию электрических и тепловых полей из-за их нагрева токами нагрузки, вихревыми токами и гистерезисом. Изоляция статорных обмоток ТД постепенно разрушается, и её эксплуатация завершается пробоем. На эксплуатируемом в настоящее время транспорте температура нагрева отдельных элементов тяговых двигателей составляет 120 °С, при этом напряжения достигают значений 5...6 кВ. Очевидно, что увеличение нагрузки ведёт к росту рабочих температур электрической машины, и это требует обоснованного выбора диэлектриков в системе изоляции.

Надёжность тяговых двигателей, качество их изоляции, её электрическая прочность зависят не только от совершенства изоляционных конструкций, но и от характеристик материалов, применяемых для электроизоляционных элементов. Возможность экономии за счёт снижения расхода цветных и чёрных металлов, в первую очередь таких как обмоточная медь и электротехническая сталь на единицу мощности ТД, позволяет качественно повысить электрические, механические и тепловые характеристики электрической машины, но при этом возникает необходимость изменения физико-механических свойств изоляции.

Для примера: при неизменных габаритах к повышению мощности ТД на 4...10 % приводит уменьшение толщины изоляции на 15...20 %, в свою очередь, это обеспечивает, как отмечено выше, снижение расхода цветных и чёрных металлов до 3...8 %. При снижении удельной материалоемкости ТД примерно на 10...12 % увеличивается его мощность на 13...15 %, другой ограничивающий фактор – допустимая температура обмотки – возрастает на 20 °С.

Ещё одним немаловажным параметром технологического характера, косвенно зависящим от физико-химических свойств применяемых электроизоляционных материалов, является степень механизации, автоматизации и длительности выполнения обмоточно-изолирующих работ. Это приводит к пересмотру и повышению требований к уже применяемым системам изоляции, а также выявляет новые недостатки и критерии совершенствования в применяемых материалах электроизоляционных элементов. Значительный прогресс в энергетическом электромашиностроении в последнее время позволил существенно улучшить эксплуатационные параметры изоляции статорной обмотки электрических машин, в основном за счёт усовершенствования изоляционных систем и технологий их изготовления.

Вновь создаваемые изоляционные материалы и системы изоляции позволяют снизить толщину изоляции, повысить коэффициент заполнения паза и удельную мощность ТД и, соответственно, улучшить её теплопроводность, кроме того, появилась возможность повышения напряжённости электрического поля, достигающей средних значений 2,8...3,0 кВ/мм.



Для систем изоляции обмоток электрических машин основная часть материалов на предприятиях Российской Федерации, выпускающих электромашиностроительные изделия, в настоящее время изготавливается с использованием изоляционных лент производства ОАО «Холдинговая компания Элинар». Эта компания более 50 лет выпускает для всех реализуемых технологических способов изготовления высоковольтной изоляции предварительно пропитанные и непропитанные ленты. Длительный опыт этого производителя, дающий результаты оценивания надёжности изоляции при эксплуатации, показывает, что в отличие от существующих мнений в большинстве случаев тепловое старение и вибрационные воздействия не являются главными факторами износа. На первое место в качестве определяющих факторов старения, действующих на изоляцию в процессе специальных испытаний, целесообразно поставить термомеханические напряжения и количественные параметры электрического поля. Форсирование термомеханического старения изоляции при контрольных испытаниях достигается путём существенного изменения по сравнению с рабочим режимом циклов нагрева и охлаждения испытываемой обмотки. В течение ряда последних лет специалистами «Холдинговой компании Элинар» был выполнен целый комплекс работ по оценке устойчивости изоляции к воздействию теплового старения при наличии электрического поля, а также мультифизических факторов, которые возникают при расчётной нагрузке и при внезапных отключениях от номинальной нагрузки.

Со стороны большинства заказчиков актуальной задачей оценки надёжности электрической машины является её определение при испытаниях на реальных стержнях на стадии изготовления. Задача заключается в проведении форсированных контрольных испытаний, нахождении степени износа изоляции и оценке долговечности как при раздельном, так и при совместном воздействии электротеплового старения и термоциклов (нагрева и охлаждения обмотки). Учёными компании проводились исследования на стержнях, изготовленных по технологии термопрессования Resin Rich (RR). В ходе испытаний изоляция, изготовленная с применением слюдосодержащих лент Элмикатерм с различным химическим составом связующего вещества, подвергалась практически всем основным видам эксплуатационных нагрузок. Результаты исследований показали, что использование лент слюдяной бумаги с повышенной плотностью увеличивает не только высокую длительную электрическую прочность изоляции, но и позволяет обеспечивать электрическую напряжённость поля на обмотке до $3...3,2$ МВ/м. Устойчивость изоляции в течение 400 ч к одновременному воздействию температуры (около 130 °С) и высокой напряжённости поля (10 МВ/м) при рабочих температурах (ниже 10 % при 155 °С) обеспечивает применение лент с меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь. Повышение устойчивости изоляции при воздействии тепловых циклов требует применения лент с более высоким классом нагревостойкости.

Перспективы. На ближайшие годы в принципе можно спрогнозировать повышение качества технологических процессов изготовления изоляции на основе термореактивных компаундов тяговых двигателей с применением как термостойких пропиточных слюдосодержащих составов, так и слюдяной бумаги высокой пористости. Усовершенствованная термореактивная изоляция на основе слюдосодержащих лент Элмикатерм не уступает аналогам лучших мировых производителей, что доказывают её высокие механические и электрофизические свойства и широкое применение при выпуске и ремонте ТД не только на отечественных, но и на зарубежных энергомашиностроительных предприятиях.

В настоящее время термореактивные компаунды находят широкое применение в электромашиностроении. В качестве основы при заливке и пропитке точных изделий, а также электронных схем и блоков используются эпоксидные смолы. Высокие, а зачастую и незаменимые электрофизические, механические и технологические свойства, в частности низкая вязкость эпоксидных компаундов, позволяют их использовать не только непосредственно для пропитки обмоток с повышенным коэффициентом заполнения паза активной медью, но и для пропитки элементов систем изоляции обмоток, содержащих стеклоткани, слюдянистые бумаги, полимерные плёнки и другие материалы. Для исключения воздушных включений и получения монолитной изоляции применяются специальные технологические процессы пропитки с использованием повышенного давления, вакуума, прессования, повышенной температуры и других технологий. В состав

пропиточных компаундов, помимо эпоксидной смолы, входит отвердитель, например полиэтил-полиамин, а также наполнитель и пластификатор, что хотя и позволяет обеспечить повышение вязкости компаундов, но после окончания процесса полимеризации делает невозможным их дальнейшее использование.

Применение эпоксидной смолы без отвердителя возможно, если имеется наличие отвердителя в пропитываемой системе, что представляет новое направление в развитии и создании новых систем изоляции для тяговых двигателей. Продукты с наибольшей плотностью сшивки образуются в процессе отверждения эпоксидных смол полиарилатами на основе изо- и терефталевых кислот и их ангидридов. Введение дистиллированной воды в эпоксидно-полиарилатный компаунд позволяет расплавить порошок полиарилата при 140...160 °С и получить продукт с низкой вязкостью, который может отверждаться на стадии формования изделий.

Для нахождения допустимой температуры эксплуатации электроизоляционных материалов – оценки важной характеристики эпоксидно-полиарилатных композиций различного состава изоляции – определялись термогравиметрические индексы. Термогравиметрический индекс компаунда, содержащего 40...60 % полиарилата, находится в достаточно узком диапазоне, составляющем 161...165 °С. Улучшение физико-механических, электрических и химических свойств на основе эпоксидно-полиарилатных компаундов подтвердило их пригодность для длительной эксплуатации при температуре выше 155 °С испытаниями ряда материалов электроизоляционного назначения. При создании многослойных композиционных ламинатов электроизоляционного назначения находят применение плёнки из полиарилатов, которые обеспечивают лёгкое склеивание без отвердителя любой эпоксидной смолой. Такая технология позволяет одновременно повысить качество изоляционных материалов, унифицировать процесс изготовления, для механизированных процессов изолирования оптимально выбрать сочетания прочности при растяжении и расслоении, когда материал подвергается разнонаправленным механическим нагрузкам к плоскости материала по осям, например, горизонтальной и вертикальной. Такая эпоксидно-полиарилатная композиция без отвердителя по ряду свойств и способности к переработке превосходит полиарилаты, полученные с применением отвердителей, и её использование перспективно для изготовления изоляции ТД.

Полученные результаты для эпоксидно-полиарилатных компаундов с различным содержанием компонентов характерны и для других материалов в виде волокнистых связующих плёнок на основе полиарилатного пропиточного компонента. К материалам этого класса может быть отнесена модифицированная синтетическая бумага, содержащая внедрённые в эпоксидную смолу без отвердителя волокнистые компоненты из полиарилатов. Пропитка бумаги при оптимальном соотношении эпоксидного олигомера и полиарилата значительно повышает её электрические и физико-механические характеристики вследствие того, что волокнистые компоненты бумаги смачиваются вводимым из раствора в ацетоне низковязким эпоксидным олигомером. Возрастающая при нагреве вязкость олигомера, взаимодействующего с полиарилатом, обеспечивает заданные свойства эпоксидно-полиарилатного связующего, которое обладает низкой поверхностной активностью в неотверждённом состоянии и позволяет формировать из бумаги различные элементы, которые после отверждения обеспечивают сохранение формы с необходимыми высокими механической и электрической прочностью. Использование полиарилатов в качестве компонентов электроизоляционных систем можно считать перспективным для изоляции тяговых электрических двигателей.

Заключение. Анализ результатов эксплуатации ТД показывает, что основной процент возникающих дефектов составляет износ изоляции обмоток, от характера которого в основном зависят показатели надёжности и долговечности всего двигателя.

В последнее время усовершенствование изоляционных систем и технологий их изготовления позволило существенно улучшить эксплуатационные параметры изоляции обмоток ТД.

Показатели технологичности (степень механизации, автоматизации и длительность обмоточно-изолирующих работ) существенно зависят от качества используемых электроизоляционных материалов.



На ближайшее время можно прогнозировать ускоренное развитие и создание систем изоляции ТД на основе терморезистивных компаундов с применением термостойких пропиточных составов, слюдяных компонентов, слюдяной бумаги высокой пористости, а также повышение качества технологических процессов изготовления изоляции.

Перспективно создание модифицированных систем изоляции для тяговых двигателей с использованием эпоксидной смолы без отвердителя при условии наличия отвердителя в пропитываемой системе.

Определённый интерес вызывает применение эпоксидно-полиарилатных композиций с параметризуемым содержанием компонентов, в которых полиарилатная связующая компонента присутствует в виде волокнистых связующих плёнок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надёжность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
2. Анализ надёжности изоляции обмоток электрических машин тягового подвижного состава с учётом особенностей климатических условий внешней среды / А. М. Худоногов, Д. А. Оленцевич, В. В. Сидоров, Е. М. Лыткина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 232-236.
3. Юренков, М. Г. Анализ влияния условий эксплуатации на надёжность тяговых электродвигателей / М. Г. Юренков // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава. – Омск: ОмИИТ, 1974. – С. 57-60.
4. Галкин, В. Г. Надёжность тягового подвижного состава / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
5. Захаров, В. И. Повышение эксплуатационной надёжности тяговых электрических машин магистральных электропоездов / В. И. Захаров // Повышение ресурса тяговых электродвигателей: сборник докладов и сообщений научно-технической конференции / Под ред. А. Т. Осяева. – М., 2004. – С. 32-36.
6. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: учеб. пособие / А. С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.
7. Исмаилов, Ш. К. Электрическая прочность изоляции электрических машин локомотивов: моногр. / Ш. К. Исмаилов. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 272 с.
8. Пак, В. М. Современное состояние и перспективы развития систем изоляции крупных электрических машин / В. М. Пак, А. В. Папков, И. Е. Куимов // Электротехника. – 2011. – № 4. – С. 2-7.
9. Эксплуатация электропоездов в условиях низких температур / А. М. Худоногов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 201-204.
10. Козубенко, В. Г. Безопасное управление поездом: вопросы и ответы: учебное пособие для образовательных учреждений железнодорожного транспорта, осуществляющих профессиональную подготовку / В. Г. Козубенко. – М.: Маршрут, 2005. – 320 с.
11. Смирнов, В. П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электропоезда: моногр. / В. П. Смирнов. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2003. – 328 с.
12. Иванов, С. Н. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы: моногр. / С. Н. Иванов, К. К. Ким, В. М. Кузьмин. – СПб.: ООО «Издательство ОМ-Пресс», 2009. – 348 с.
13. Колесник, М. Б. Анализ напряжённо-деформированного состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII (55). – С. 43-47.
14. Колесник, М. Б. Имитационное и экспериментальное моделирование электромеханического привода герметичной задвижки / М. Б. Колесник, А. С. Гудим // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № VII (63). – С. 52-58.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ ОКНАХ В ГЛУХОДОННОМ СТАКАНЕ

MODELING OF FORCED PROCESS OF LIQUID METAL MIXING IN THE CRYSTALLIZER OF CONTINUOUS STEEL CASTING UNIT WITH SYMMETRICAL WINDOWS IN A DEEP-DRAWN BEAKER

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

Valery I. Odinokov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Research and Development Management Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

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

Alexey I. Evstigneev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Research and Development Management Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Eduard A. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rector@knastu.ru.

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

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

Петров Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Viktor V. Petrov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Research and Development Management Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Предложена новая технология процесса заполнения кристаллизатора УНРС жидким металлом и его перемешивания. Приведена оригинальная конструкция устройства. Исследования проведены математическим моделированием численным методом. Представлены результаты вычислительных расчётов течения расплава в объёме кристаллизатора. Приведён пример расчёта разлива стали в кристаллизатор прямоугольного сечения, схемы потоков расплава по различным сечениям кристаллизатора. Результаты численного решения задачи представлены в виде полей скоростей потоков жидкого металла и их температуры по различным сечениям кристаллизатора.

Summary. A new technology of filling the UNRS crystallizer with liquid metal and mixing is proposed. The original design of the device is given. The research was carried out by mathematical modeling by numerical method. The results of computational calculations of the melt flow in the crystallizer volume are presented. An example of calculating the casting of steel into a mold of rectangular cross-section, melt flow diagrams for different sections of the mold is given. The results of the numerical solution of the problem are presented in the form of velocity fields of liquid metal flows and their temperature over various sections of the mold.

Ключевые слова: моделирование, кристаллизатор, жидкий металл, потоки расплава, математическая модель, численная схема, скорость течения.

Key words: modeling, crystallizer, liquid metal, melt flows, mathematical model, numerical scheme, flow velocity.

УДК 519.677

Введение. Теоретический процесс перемешивания жидкой стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали (УНРС) [1; 2] математически описан и проанализирован в работах [3; 4; 5]. В этих публикациях процесс заполнения кристаллизатора жидкой сталью ведётся с помощью глуходонного стакана с эксцентрично расположенными выходными отверстиями. Эксцентричные окна в глуходонном стакане были эффективны, когда отсутствовало принудительное перемешивание жидкого металла.

В работе [6] также присутствует глуходонный стакан с эксцентричными выходными окнами, но возникает вопрос: насколько это эффективно при принудительном перемешивании? Ответ на этот вопрос и поставлен в настоящей работе, где моделируются потоки жидкой стали в кристаллизаторе при принудительном перемешивании, когда выпуск стали осуществляется из глуходонного стакана с симметрично расположенными выходными окнами. Ведь изготовление глуходонного стакана с симметричными окнами проще и дешевле, чем с эксцентрично расположенными.

На рис. 1 изображена схема данного процесса. Из ковша 1 через глуходонный стакан 2, имеющий симметрично расположенные окна 3, металл поступает в кристаллизатор 4. По наружной поверхности глуходонного стакана выше его выходных отверстий установлена с зазором разъёмная огнеупорная рубашка 5, соединённая с механизмом вращения 6. Имеем квазистационарный процесс. При постановке задачи было принято, что огнеупорная рубашка 5 и глуходонный стакан 2 имеют одинаковое квадратное сечение (см. рис. 1).

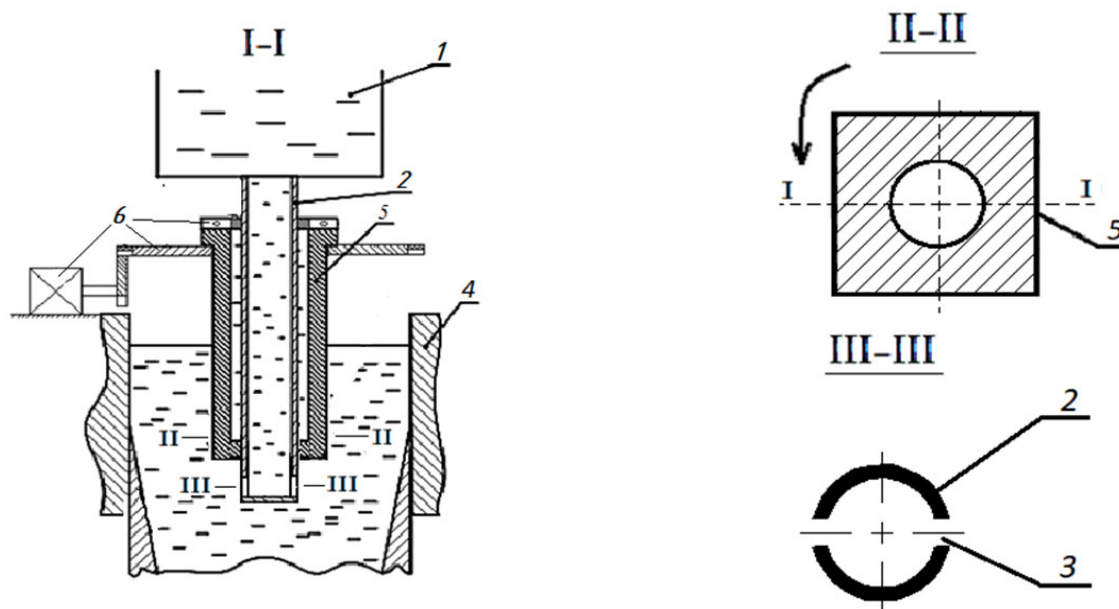


Рис. 1. Схема процесса подачи металла через глуходонный стакан с симметричными окнами принудительного перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе при вращении разъёмной рубашки

При заданном направлении вращения одна половина грани квадрата как бы выталкивает жидкий металл от себя, а вторая половина грани втягивает металл. В этом случае можно считать рубашку неподвижной, а через её грани втекает и вытекает металл со скоростями, пропорцио-

нальными скорости вращения и геометрическим размерам квадратного сечения огнеупорной рубашки. Такая идеализация подробно описана в работе [6] и позволяет рассматривать данный процесс как стационарный. Кроме того, не будем учитывать появляющуюся на гранях кристаллизатора корочку затвердевшего металла.

Постановка задачи. Итак, рассматривается стационарный процесс течения несжимаемой жидкости, для которого справедливы уравнения

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_i^*, \quad I_i^* = \rho \left(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}, \quad \xi_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (2)$$

$$v_{i,i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a\Delta\theta; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера; σ – гидростатическое напряжение; μ – коэффициент вязкости (г·сек/см²); v_i – проекция скоростей перемещений по координатным осям x_i ($i = 1, 2, 3$); ρ – плотность жидкого металла; F_i^* – проекция удельной объёмной силы на координатные оси x_i ($i = 1, 2, 3$); τ – время; Δ – Лапласа оператор; θ – температура; a – коэффициент температуропроводности $a = \lambda / (c \cdot \gamma)$, здесь λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоёмкость; γ – удельный вес; все коэффициенты принимаются постоянными константами. Для стационарного процесса

$$\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau} = 0.$$

Граничные условия задачи (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{\Gamma_2} = p_1; \quad (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 1 \dots 3; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 5, 6, 7, 8; \quad \sigma_{31} = \sigma_{32}|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 9, 10, 11; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma'_8} = 0; \quad (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{\Gamma''_8} = 0; \\ v_2|_{\Gamma_5} = v^*; \\ v_3|_{\Gamma''_8} = V_t; \\ v_2|_{\Gamma'_8} = V'_t; \\ v_1|_{\Gamma_1} = v_u; \\ v_1|_{\Gamma_3} = 0; \\ v_2|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 6, 7, 8; \\ v_3|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 9, 10, 11, \end{aligned} \quad (5)$$

где V_t, V'_t – скорости течения металла через грани Γ''_8, Γ'_8 ; v_u – скорость вытягивания слитка (см. рис. 2).

При решении уравнения теплопроводности (4) использовались граничные условия:

$$\theta|_{\Gamma_i} = \theta_i^*, \quad i = 1 \dots 10; \quad (6)$$

$$q|_{\Gamma_i} = q_i^*, \quad i = 6, 7, 9, 10,$$

где v^* – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана; θ_i^* – заданные функции распределения температуры металла на поверхностях Γ_i ; q_i^* – заданные из экспериментальных данных тепловые потоки через поверхности Γ_i ; θ_5^* – заданная температура выхода металла из окон Γ_5 .

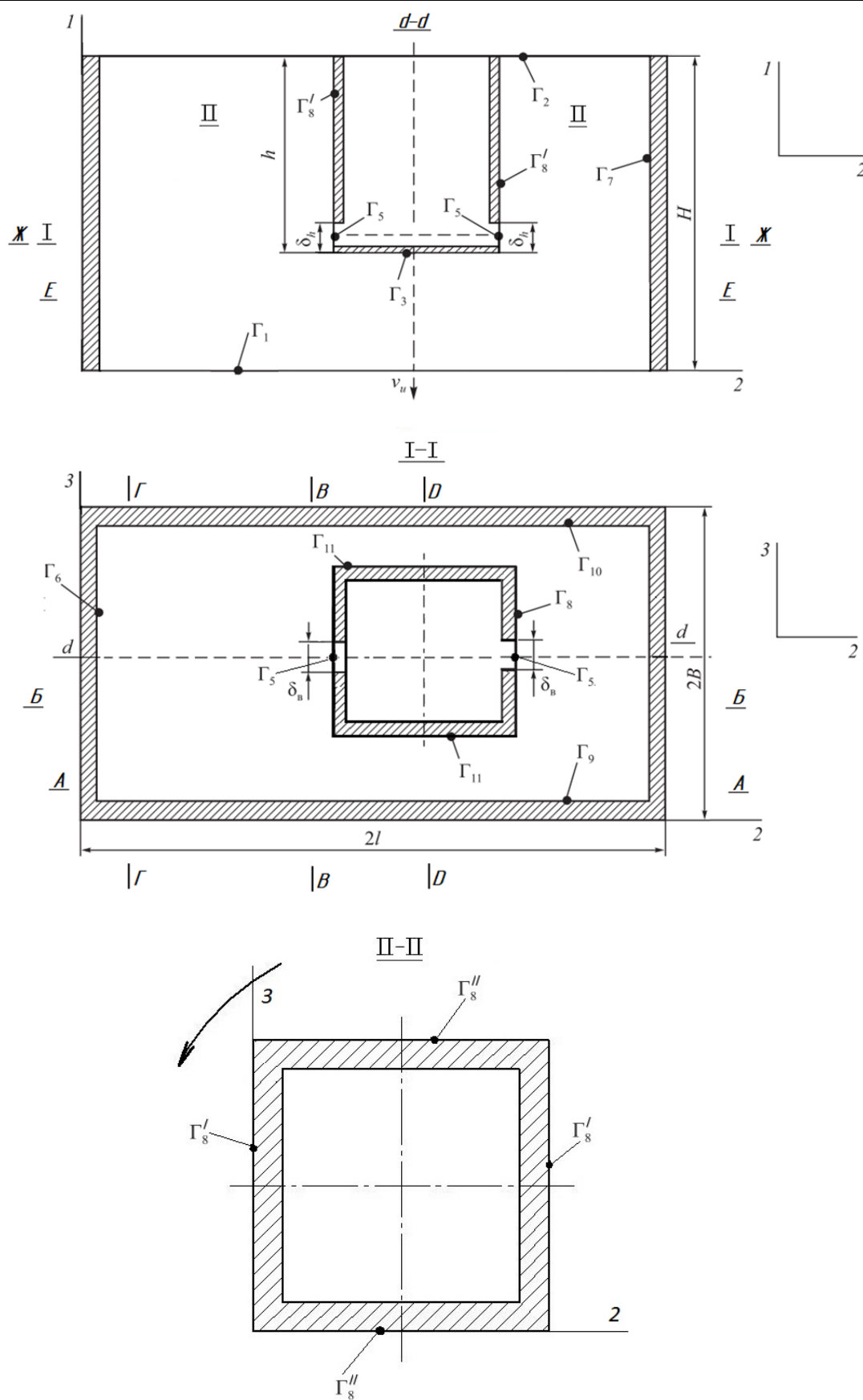


Рис. 2. Расчётная схема процесса разлива металла в кристаллизатор

Численная схема и алгоритм решения системы уравнений (1) – (4) при граничных условиях (5), (6) подробно описаны в работе [6] с использованием численного метода [7].

Результаты решения задачи. Задавались существующие размеры кристаллизатора: $H = 100$ см, $B = 12,5$ см, $l = 100$ см, $h = 20$ см, $b = 7,5$ см, $\delta_h = 8,5$ см, $\delta_B = 1,5$ см, $\delta_1 = 1,5$ см, $v_u = 1$ м/мин = $1,66... \text{ см/с}$. Для стационарного процесса v^* определялось из равенства секундных объемов:

$$v_u \cdot B \cdot l = v^* \cdot \delta_n \cdot \delta_B; \Rightarrow v^* = \frac{v_u \cdot B \cdot l}{\delta_n \cdot \delta_B}.$$

Температура истекания жидкой стали из окна (Γ_5) принималась $\theta^*|_{\Gamma_5} = 1600$ °С. Температуры на поверхностях стакана и вращающейся рубашки (см. рис. 2) Γ_i $i = 3, 8, 8', 11$ принимались $\theta^*|_{\Gamma_i} = 1550$ °С, $i = 3, 8, 8', 11$. На поверхности Γ_2 (см. рис. 2) находится жидкая шлаковая «рубашка», температура которой $\theta^*|_{\Gamma_2} = 1550$ °С.

Константы: $\lambda = 0,29$ Вт/(см · с); $c = 444,47$ Дж/(кг · с); $\gamma = 7,8$ г/см³. Коэффициент вязкости μ в уравнениях (2) принимался по работе [8]: $\mu = 2,1 \cdot 10^{-4}$ кг · с/м².

На рис. 3 показаны потоки металла в сечении А-А при вращении рубашки $n = 30$ об/мин. Величина вращения $n = 30$ об/мин взята исходя из результатов расчетов, показавших, что при большей степени вращения ($n = 50$ об/мин) происходит значительный «заброс» металла в шлаковую рубашку, что негативно влияет на качество получаемого непрерывного слитка.

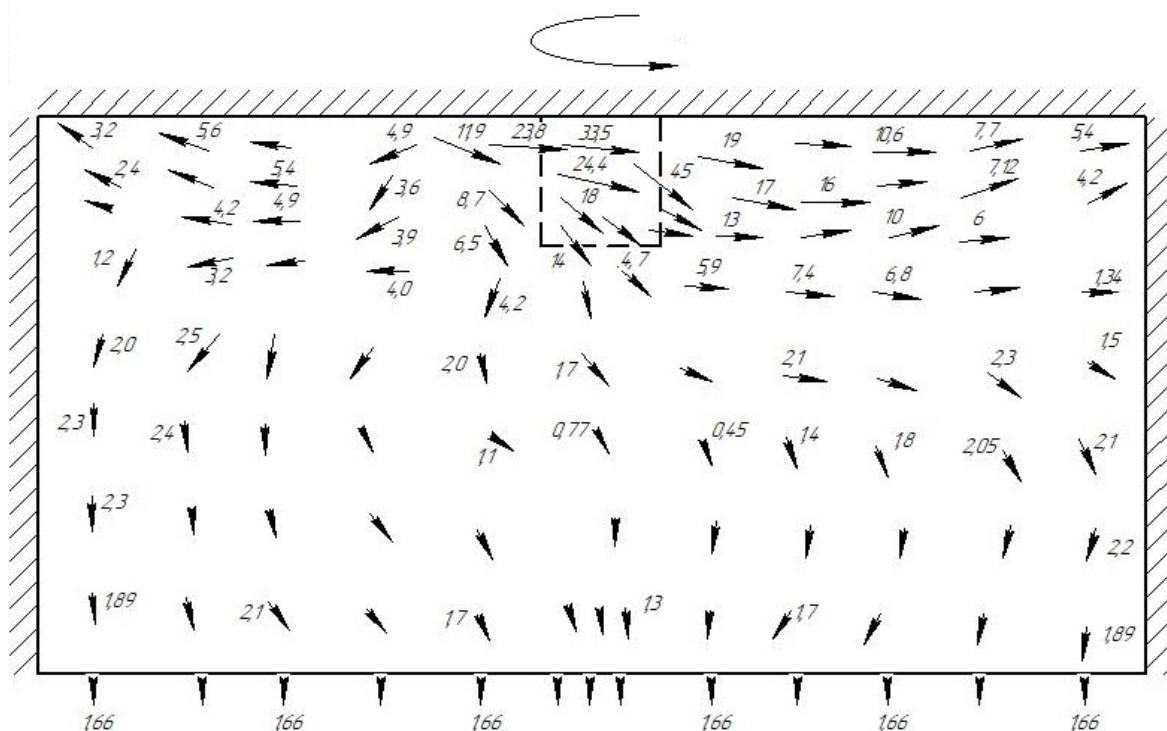


Рис. 3. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении А-А при $n = 30$ об/мин

Картина потоков в этом сечении показывает менее интенсивное проникновение жидкого металла в шлаковую область.

На рис. 4 приведены потоки металла в сечении Б-Б. Видим примерно тот же рисунок, что и в сечении А-А (см. рис. 3), но под стаканом наблюдаются вихревые потоки металла.

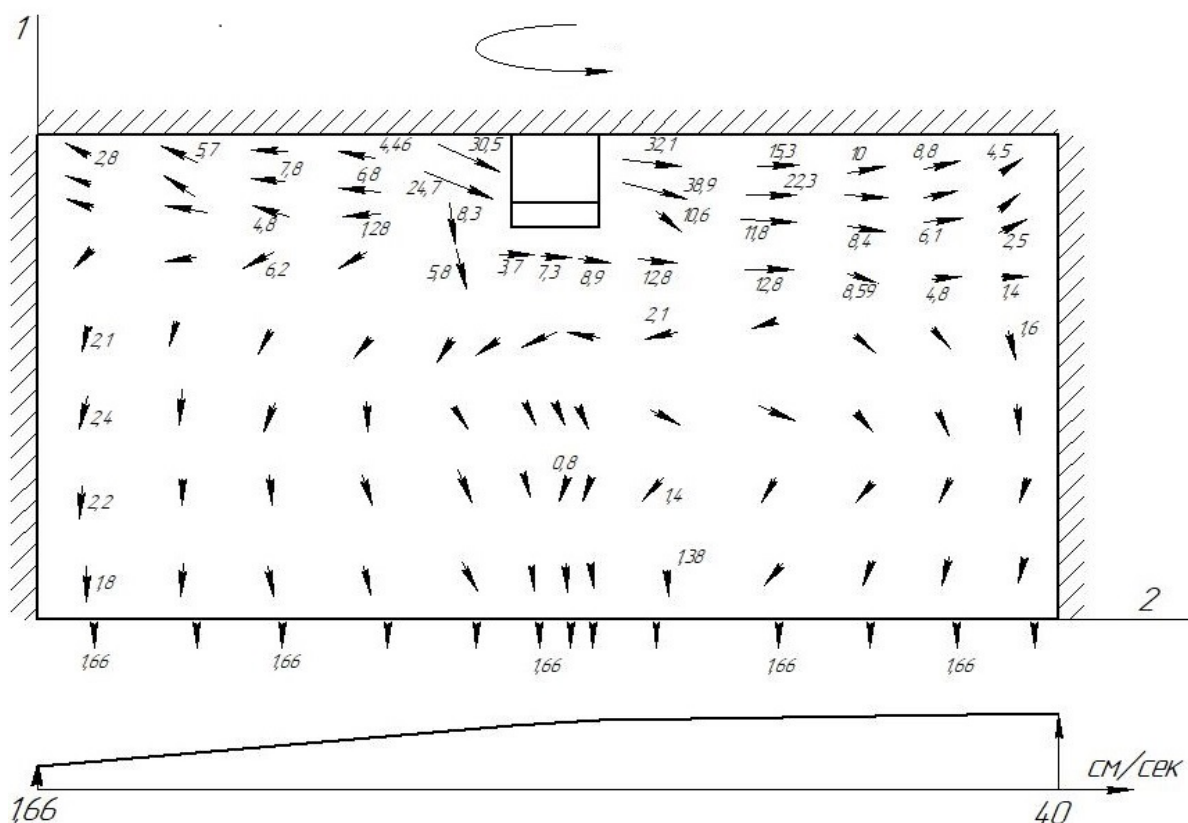


Рис. 4. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Б-Б при $n = 30$ об/мин

На рис. 5 приведены потоки металла в сечении Ж-Ж. Наблюдается практически та же картина, что и в работе [7] при эксцентричном выпуске металла из глухондонного стакана.

На рис. 6 – 8 показаны потоки металла соответственно в поперечных сечениях Г-Г, В-В, D-D. В периферийном сечении Г-Г (см. рис. 6) металл в верхней части (на глубине погружного стакана) идёт вверх и изменяет направление при приближении к вращающейся рубашке (см. рис. 7, 8). Следует отметить, что скорость потока металла вверх (см. рис. 6) значительно ниже скорости течения (≈ 3 см/с), чем в случае с эксцентричным выходом металла (≈ 10 см/с), а значит, и меньше вероятность заноса шлака в непрерывный слиток.

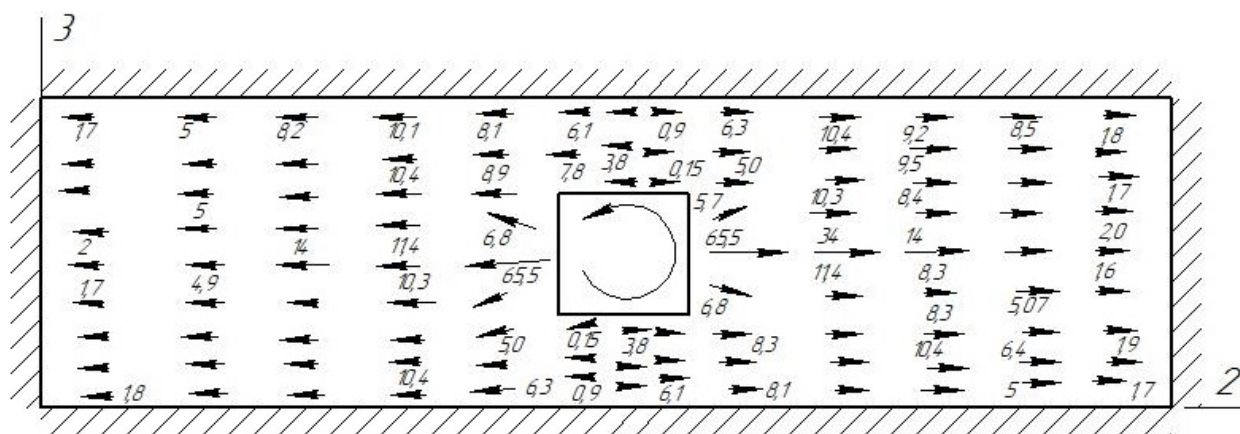


Рис. 5. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Ж-Ж при $n = 30$ об/мин

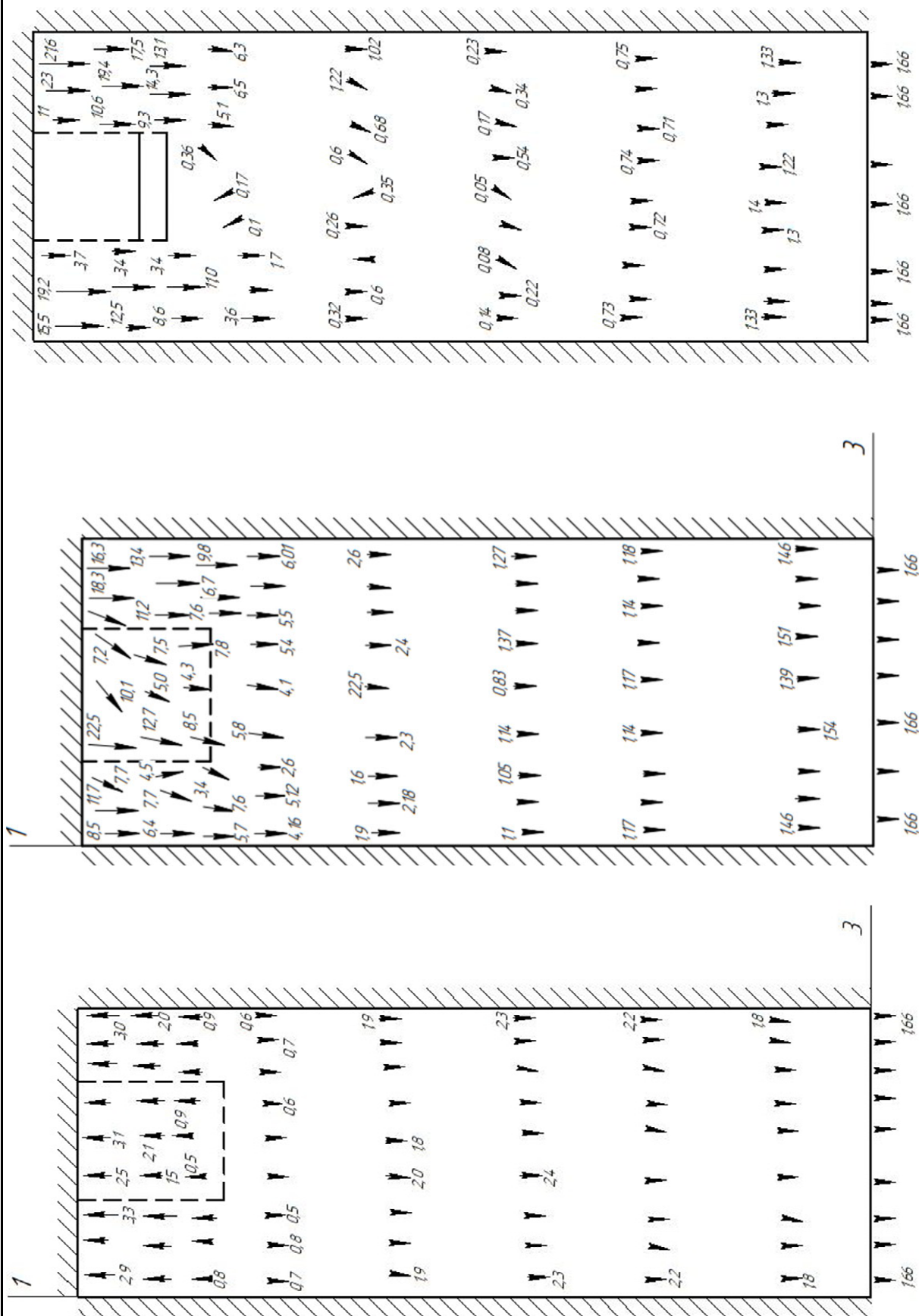


Рис. 6. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Г-Г при $n = 30$ об/мин

Рис. 7. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении В-В при $n = 30$ об/мин

Рис. 8. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Д-Д при $n = 30$ об/мин



Выводы:

1. Разработана математическая модель процесса заполнения и перемешивания жидкой стали в кристаллизаторе прямоугольного сечения с симметричным выходом металла из глухондонного погружного стакана.
2. Анализ результатов показал эффективность применения глухондонного погружного стакана с симметричными выходными окнами по сравнению со стаканом с эксцентричными выходными окнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка нового способа разлива слитков на МЛНЗ / В. В. Стулов, В. А. Матысик, Т. В. Новиков, С. В. Щербаков, И. В. Чистяков, А. П. Плотников. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 156 с.
2. Патент № 196254 Российская Федерация, МПК В22D 11/10 (2006.01). Устройство для подачи жидкого металла в вертикальный кристаллизатор УНРС через погружной прямоточный стакан: № 2019128247: заявлено 12.03.2018; опубликовано 21.02.2020 / Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – Бюл. № 6.
3. Совершенствование устройств по заполнению кристаллизатора УНРС жидким металлом / В. И. Одинокое, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, С. А. Кузнецов, А. И. Горнаков // *Металлург.* – 2021. – № 4. – С. 33-35.
4. Одинокое, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металла кристаллизатора с отражателем УНРС / В. И. Одинокое, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 2019. – № 10. – С. 747-755.
5. Одинокое, В. И. Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями / В. И. Одинокое, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 606-612.
6. Математическое моделирование процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установке непрерывной разливки стали / В. И. Одинокое, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев, В. А. Карпенко // *Математическое моделирование и численные методы.* – 2023. – № 3. – С. 63-87.
7. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокое, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. А. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
8. Kim, W. S. A Simplified Phenomenological Theory of Viscosity for Liquid Metals / W. S. Kim, T. S. Chair // *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2001, V. 22, No. 1, p. 43-45.

Саяпина П. О., Крупский Р. Ф.
P. O. Sayapina, R. F. Krupsky

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

ELECTROMECHANICAL MEASURING SYSTEM

Саяпина Полина Олеговна – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: em@knastu.ru.

Polina O. Sayapina – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: em@knastu.ru.

Крупский Роман Фаддеевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник – руководитель научно-производственного инжинирингового центра Филиала ПАО «ОАК» – КнААЗ им. Ю. А. Гагарина (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская 1. E-mail: roman_krupskiy@rambler.ru.

Roman F. Krupsky – PhD in Engineering, Chief Researcher – Head of the Scientific and Production Engineering Center of the Branch of PJSC «UAC» – KnAAZ named after Yu. A. Gagarin (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681018, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, st. Sovetskaya 1. E-mail: roman_krupskiy@rambler.ru.

Аннотация. Показаны значимость разработки и внедрения в производство электрических машин специального назначения, актуальность измерительной системы на базе электромеханического комплекса. Приведена методика функционального применения электромеханической системы посредством асинхронного двигателя. Описан порядок выбора выходных параметров асинхронного двигателя и показаны этапы научно-исследовательской работы. Приводится описание структурной схемы и назначение основных блоков и модулей.

Summary. The significance of development and introduction of special-purpose electric machines into production, the relevance of the measuring system on the basis of electromechanical complex are shown. The methodology of functional application of electromechanical system by means of asynchronous motor is given. The order of selection of output parameters of asynchronous motor is described and the stages of research work are shown. The description of the structural scheme and the purpose of the basic blocks and modules are given.

Ключевые слова: проектирование, электромеханическая система, система взвешивания.

Key words: design, electromechanical system, weighing system.

УДК 621.313:621.317.39

Введение. В настоящее время человек не может обойтись в своей жизни без электромеханических преобразователей (ЭМП). Быт и производство зависят от разнообразных ЭМП: синхронных и асинхронных двигателей, генераторов, машин переменного и постоянного тока и т. д.

Для каждого типа машин в современном мире можно найти полезное применение. Рассмотрим некоторые типы ЭМП:

1. Машины постоянного тока – аппараты, которые преобразовывают механическую энергию в электрическую, а также осуществляют обратные преобразования. Машины постоянного тока подразделяются на генераторы постоянного тока и двигатели постоянного тока. Генератор постоянного тока представляет собой электрическую машину, в которой происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую энергию постоянного тока. Двигатель постоянного тока – электрическая машина, в которой происходит процесс преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую. Машины постоянного тока (см. рис. 1), как и все электрические машины, обратимы, т. е. они без существенных конструктивных изменений могут рабо-

тать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Имеют широкий спектр применения, наиболее часто такие устройства применяются для приводов: подъёмников, устройств автоматики, прокатных станков.

Подобные электродвигатели характеризуются хорошими регулировочными свойствами, а также показателями перегрузочной способности.

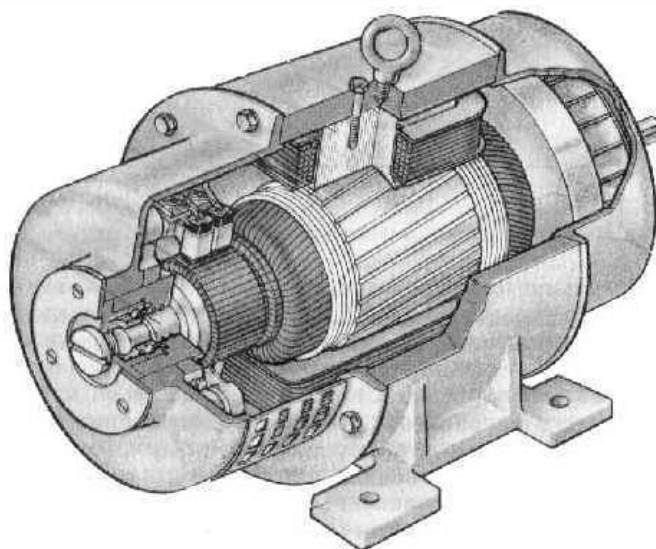


Рис. 1. Машина постоянного тока

2. Машина переменного тока – электрическая машина, применяемая для получения переменного тока (генератор) или для преобразования электрической энергии в механическую (двигатель) либо в электрическую энергию другого напряжения или частоты. Разделяют на синхронные и асинхронные.

Асинхронный двигатель – ЭМП, электрический двигатель переменного тока, частота вращения ротора которого не равна (в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора (см. рис. 2).

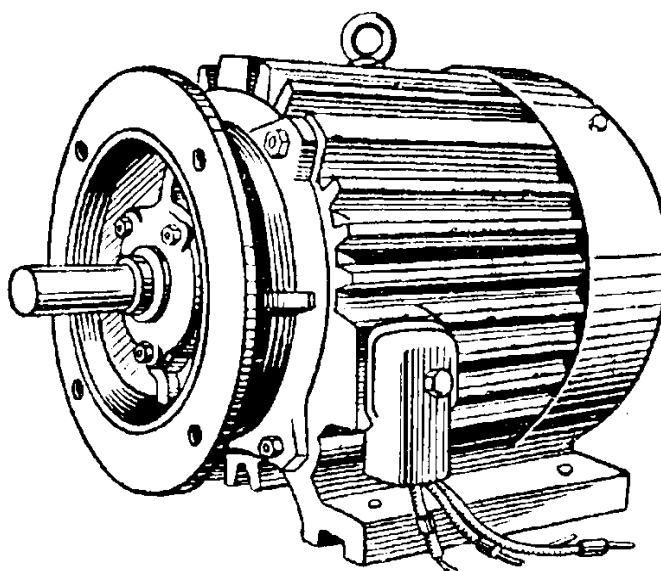


Рис. 2. Асинхронный двигатель

Синхронный двигатель – ЭМП с равной частотой вращения вала и крутящегося магнитного поля неподвижного узла (см. рис. 3). За счёт относительно сложной конструкции такие двигатели не так распространены, как асинхронные двигатели, однако в некоторых случаях являются практически незаменимыми.

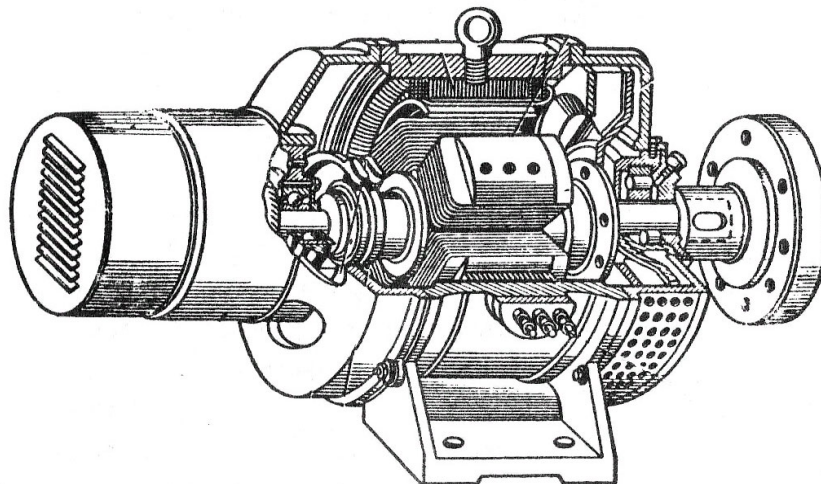


Рис. 3. Синхронный двигатель

Объектом исследования, обеспечивающим решение метрологической задачи определения весовых и/или триботехнических характеристик, является электромеханическая система на базе автоматически тарированного асинхронного электродвигателя. Целесообразность такого технического решения подтверждается исследованиями, выполненными как в нашей стране, так и за рубежом.

Целью данного исследования является разработка и моделирование электромеханической измерительной системы [1] с использованием асинхронного двигателя с приводом линейного перемещения. Были также многочисленные попытки электрифицировать известные механические соединения винт-гайка или червяк – червячное колесо. Одной из относительно недавних таких попыток является конструкция, где муфта сцепляется с винтом лишь при подаче напряжения к подводам катушки при движении вдоль направляющей, муфта может сжимать пружину, возвращающую муфту назад при снятии напряжения с подводом.

Принцип работы измерительной системы поясняет рис. 4, на котором приведены следующие обозначения: ИП – источник питания; ЧП – частотный преобразователь; Д – асинхронный двигатель с линейным перемещением исполнительного элемента; ДД – датчик движения; ДТ – датчик тока; ВЧ – программируемое вычислительное устройство (вычислитель); БВИ – блок вывода информации величин m и коэффициента трения μ объекта измерений; ПП – измерительная платформа (передвижная платформа).

Электродвигатель с линейным перемещением исполнительного элемента состоит из магнитопровода с сетевой обмоткой, подключаемой к сети через частотный преобразователь ЧП и блок управления БУ, вращающейся короткозамкнутой вторичной обмотки, на внутренней поверхности которой нанесена резьба, а на наружной поверхности – резьба с образованием между вращающейся вторичной обмоткой и тягой резьбового соединения, обеспе-

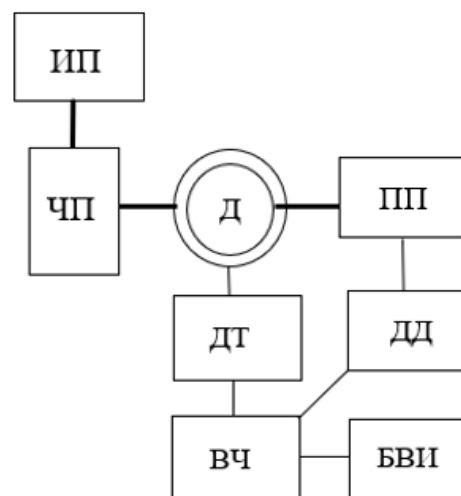


Рис. 4. Структурная схема информационно-измерительной электромеханической системы

чивающего при вращении вторичной обмотки перемещение тяги в осевом направлении, при этом один из концов тяги механически присоединён к измерительной весовой платформе.

На данный момент известны успешные варианты приводов с передачей винт-гайка и с червячной передачей, к примеру, приводы специализированных 3D-принтеров и станков с числовым программным управлением (ЧПУ). В основном в таких приводных системах используют трапецидальную нарезку винта. Такая форма нарезки винта имеет ряд преимуществ.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что данный вид соединительной передачи подходит для разрабатываемой электромеханической измерительной системы.

В рассматриваемой системе определяющими являются силы, действующие на перемещаемый объект. Тем не менее из основных положений электромеханики следует, что силы, возникающие вследствие взаимодействия переменного магнитного поля статора с током вторичной короткозамкнутой обмотки, при детерминированных размерных соотношениях электромеханического преобразователя определяются его электромагнитными параметрами.

В некоторой степени уязвимым участком данной системы при продолжительной эксплуатации является передача винт-гайка вследствие повышенных механических нагрузок. В исследовании рассматривается замена классического смазочного материала передачи винт-гайка на твёрдосмазочное покрытие (ТСП).

Описание методики. Для определения мощности двигателя и размеров компонентов системы необходимо знать максимальную рабочую нагрузку и рассмотреть возможность использования твёрдых смазочных материалов в узле привода винт-гайка. Для получения данных о свойствах винтовой гайки трибосопряжённого типа с покрытием из твёрдой смазки была использована система моделирования смазочных материалов.

Когда поверхность винта с покрытием из твердой смазки взаимодействует с шероховатой поверхностью витка гайки, объёмное напряжение витка значительно ниже контактного напряжения (см. рис. 5).

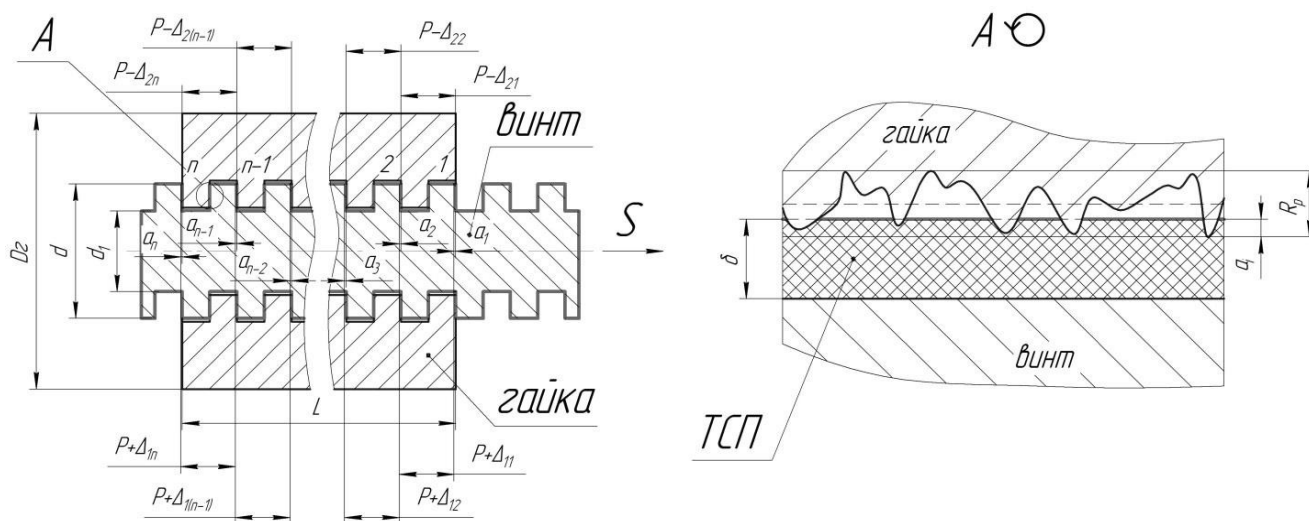


Рис. 5. Схема резьбового сопряжения с ТСП

Следовательно, в уравнении совместного перемещения [26] деформация катушки заменяется соответствующей контактной деформацией шероховатой поверхности относительно поверхности, на которую наносится ТСП. Таким образом, для представленной задачи условия уравнения и равновесия совместного взаимодействия могут быть выражены следующим образом:

$$F = F_1 + \cdots + F_i + \cdots + F_n,$$

$$a_1 - a_2 = \Delta_{11} + \Delta_{21},$$

$$a_i - a_{i+1} = \Delta_{1i} + \Delta_{2i},$$

$$a_{n-1} - a_n = \Delta_{1(n-1)} + \Delta_{2(n-1)},$$

где F – осевая нагрузка, воспринимаемая резьбовым сопряжением; F_i – осевая нагрузка, воспринимаемая i -м витком резьбового сопряжения; n – число витков гайки; a_i – контактная деформация шероховатой поверхностью i -го витка гайки ТСП, нанесённого на поверхность винта; $\Delta_{1i} = P \sum_{i+1}^n F_i / E_B A_B$ – удлинение тела винта между i -м и $(i+1)$ -м витками; $\Delta_{2i} = P \sum_{i+1}^n F_i / E_G A_G$ – укорочение тела гайки между i -м и $(i+1)$ -м витками; P – шаг резьбы; E_B, E_G – соответственно модули упругости материалов винта и гайки; A_B, A_G – соответственно минимальные площади поперечного сечения винта и гайки.

Для решения системы уравнений требуется знание контактных деформаций a_i , которые возникают при внедрении шероховатости в поверхность с ТСП. При нагрузках, температуре окружающей среды, размерах, физико-механических свойствах и качестве шероховатой поверхности вид деформаций, определяемый параметрами её микрогеометрии, может быть упругим или пластическим.

Из-за неровного распределения нагрузок по виткам может быть одновременно несколько различных видов деформаций в одном резьбовом сопряжении. Для упрощения анализа будем рассматривать только упругие ТСП, полагая, что в резьбовом сопряжении имеют место деформации лишь одного вида.

Таким образом, задача состоит в решении для случая упругого деформирования ТСП в резьбовом сопряжении. При расчётах использовались геометрические размеры, материалы и номинальная нагрузка реальной винтовой передачи, приведённой в каталоге, с ТСП на основе ПТФЭ.

Чтобы исследовать влияние чистовой обработки поверхности на распределение нагрузки при вращении соединения с использованием ТСП, были рассмотрены два встречающихся на практике случая обработки поверхности резьбы торцевой гайки: полуфинишная и тонкое точение.

Параметры R_a , полученные в процессе изготовления резьбы, также будут применены для расчётов. Тем не менее информация о других параметрах структуры поверхности, необходимых для расчётов, отсутствует.

Для исследования влияния механических свойств покрытия на распределение нагрузки на виток резьбового соединения были численно проанализированы параметры серебряного покрытия, которое обладает самыми значительными механическими свойствами среди мягких металлов, используемых в качестве ТСП. В данной работе использовались механические свойства отечественного ТСП на основе ПТФЭ марки ФБФ-74Д. Необходимо подчеркнуть, что ТСП с содержанием ПТФЭ является самым мягким среди применяемых в технике.

Таблица 1

Механические свойства ТСП

Механические свойства	Материал ТСП	
	ФБФ-74Д	Серебро
$E_{\text{п}}$, ГПа	0,7	80
$\mu_{\text{п}}$	0,43	0,4
HV , МПа	23	900

Так, результаты расчётов будут охватывать весь диапазон встречающихся в инженерной практике значений параметров геометрии гайки и механических свойств ТСП.

Для того чтобы определить взаимосвязь распределения нагрузки от многих факторов при упругой деформации ТСП с винтовым интерфейсом, необходимо решить уравнения. Однако поскольку аналитически решить эту задачу не представляется возможным, для проведения расчётов было использовано специальное программное обеспечение. На ранних этапах исследования рас-

сматривалась возможность упрощения системы уравнений, т. к. при больших значениях n (более мелкие шаги, большие длины выводов) практическая реализация решения усложняется с увеличением числа витков.

При помощи расчётных формул можно предсказать, как будет распределена нагрузка на каждый виток винтовой пары с трением при изменении физических свойств покрытия, шероховатости гайки, шага резьбы, нагрузки и толщины покрытия при упругом деформировании, что в дальнейшем скажется на качестве измерений.

Заключение. Измерительная система на базе асинхронного электродвигателя с линейным перемещением исполнительного элемента для определения весовых и/или триботехнических характеристик объектов позволяет вычислить массу и/или коэффициент трения объекта измерения относительно опорной поверхности. Предложенный подход повышает метрологические характеристики измерительной системы, расширяет функциональные характеристики электромеханических преобразователей и повышает надёжность. Использование ТСП значительно снижает внутренние механические нагрузки на передаче винт-гайка, что впоследствии влияет на точность измерений и продолжительность использования данной измерительной электромеханической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информационно-измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 94-101.
2. Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 134 с.
3. Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. А. Ткачук. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 137 с.
4. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / О. С. Амосов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 5-11.
5. Имитационная модель трёхточечного узла процесса формования листового материала электромеханического типа / В. А. Соловьев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № II. – С. 86-90.
6. Соловьев, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объектного формирования / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 54-57.
7. Гринченков, В. П. Электромагнитные приводы с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным принципом действия для клапанов / В. П. Гринченков, И. А. Павленко // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 51-57.
8. Совмещённые электрические машины для автоматики / Ю. М. Келим [и др.]; под общ. ред. Д. В. Свечарника. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
9. Kulinchenko, G. V. Research of dynamic parameters of the electric drive on the basis of rolling rotor motor / G. V. Kulinchenko, A. M. Maslennikov, V. A. Baguta // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2016. – № 6. – P. 9-14. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.6.02>.
10. Kulinchenko, G. V. Assessment of efficiency of electric drive of stop valves / G. V. Kulinchenko [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – P. 36-44. doi: 10.15587/1729-4061.2019.174203.
11. Garganeev, A. G. Design Principles of Pipeline Valve Mechatronic Systems / A. G. Garganeev, V. V. Mashinsky // XIII International Conference And Seminar On Micro/Nanotechnologies And Electron Devices EDM. – 2012. – P. 330-332.
12. Udovichenko, A. V. Electric motors for variable-speed drive of lock valves / A. V. Udovichenko [et al.] // Electronics. – 2021. – Vol. 10, iss. 21, URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/21/2727> (access date: 30.11.2022).
13. Laitwaite, E. R. Linear motors with transverse flux / E. R. Laitwaite // Proc. IEEE. Vol. 118. № 12. – 1971. – P. 1761-1767.
14. Bahke, E. Transport system Heute und Morgen Mainz / E. Bahke // Krausskopf Verlag. – 1973. – 215 p.
15. Rummich, E. Synchrone Linear maschinen / E. Rummich // Bull. SEV. – № 23. – 1972. – P. 1338-1344.
16. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.

17. Колесник, М. Б. Получение аппроксимирующих зависимостей для учёта влияния параметров нагрузки на энергетические показатели асинхронного двигателя / М. Б. Колесник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 43-47.
18. Ким, К. К. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. Б. Колесник // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.
19. Ким, К. К. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 3. – С. 71-77.
20. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
21. Патент № 2736387 Российская Федерация, МПК F16K 31/04(2006.01), F16K 37/00(2006.01). Электромеханическая система запорной арматуры: № 2020111602: заявлено 19.03.2020: опубликовано 16.11.2020 / Ким К. К., Иванов С. Н., Горбунов А. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». – 9 с.
22. Москвитин, А. И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. Электрические молотки, вибраторы, быстроходный электромагнитный привод / А. И. Москвитин. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1950. – 144 с.
23. Брук, И. С. Теория асинхронного двигателя с массивным ротором / И. С. Брук // Вестник экспериментальной и теоретической электротехники. – 1929. – № 5. – С. 175-193.
24. Вевюрко, И. А. О расчёте асинхронной машины с полым ротором методом симметричных составляющих / И. А. Вевюрко // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 5. – С. 28-32.
25. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.
26. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
27. Ким, К. К. Средства электрических измерений и их поверка / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – СПб.: Лань, 2021. – 316 с.



Носков С. И.
S. I. Noskov

**ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ МОДУЛЕЙ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ
ПРОИСШЕСТВИЙ**

**APPLICATION OF THE MULTICRITERIA METHOD OF LEAST MODULES
FOR MODELING ROAD ACCIDENT NUMBER**

Носков Сергей Иванович – доктор технических наук, 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, Information Systems and Information Protection Department, Irkutsk State University of Railway Transport (Russia, Irkutsk); Russia, 664074, st. Chernyshevsky, 15; tel. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Аннотация. Дан краткий обзор работ, посвящённых применению методов регрессионного моделирования при исследовании закономерностей, связанных с аварийностью на транспорте. Приведена вычислительная схема многокритериального метода наименьших модулей, предполагающая разделение исходной выборки данных на несколько непересекающихся подвыборок с последующей минимизацией векторной функции потерь, что приводит к необходимости решения серии задач линейного программирования. С помощью этого метода построена регрессионная модель количества дорожно-транспортных происшествий в России. В качестве независимых переменных при этом использованы: количество троллейбусов, общая численность населения, численность трудоспособного сельского населения, ежегодное потребление алкоголя, протяжённость автомобильных дорог общего назначения.

Summary. A brief review of works devoted to the application of regression modeling methods in the study of regularities related to transport accidents is given. A computational scheme of the multicriteria method of least absolute deviations is presented, which assumes the division of the initial data sample into several non-overlapping sub-samples with subsequent minimization of the vector loss function, which leads to the need to solve a series of linear programming problems. Using this method, a regression model of the number of road accidents in Russia was built. In this case, the following were used as independent variables: the number of trolleybuses, the total population, the number of able-bodied rural population, annual alcohol consumption, and the length of general roads.

Ключевые слова: регрессионная модель, многокритериальный метод наименьших модулей, вклады факторов, дорожно-транспортные происшествия, множество Парето, задача линейного программирования.

Key words: regression model, multi-criteria method of least absolute deviations, factor contributions, traffic accidents, Pareto set, linear programming problem.

УДК 330.4

Введение. Методы математического, в том числе регрессионного, моделирования активно используются в современном мире при анализе самого широкого круга различных объектов и процессов. Применяются они и при исследовании закономерностей, связанных с аварийностью на транспорте. Так, в работе [1] подтверждена эффективность моделей Пуассона, отрицательной биномиальной и отрицательной биномиальной регрессии с нулевым расширением для установления связи между дорожно-транспортными происшествиями с участием грузовиков и дорожными и геометрическими характеристиками многополосной междугородной дороги Анкара-Аксарай-Эрегли. Коэффициенты модели оценивались методом максимального правдоподобия, а отклонение и информационный критерий Акаике рассматривались как статистика согласия. Результаты

показывают, что первая модель очень хорошо соответствует данным. Предлагаемая модель турецких разделённых многополосных междугородных дорог с высоким процентом движения грузовых автомобилей может быть полезна для выявления критических факторов и снижения количества аварий. Работа [2] посвящена применению адаптивной системы нейро-нечёткого вывода для моделирования дорожно-транспортных происшествий. Набор объясняющих переменных модели включал среднюю горизонтальную кривизну, ширину обочины, ширину дороги, землепользование, точки доступа, продольный уклон и плотность горизонтальной кривой. В [3] предложена нейронная сеть обобщённой регрессии, настроенная на самоорганизующуюся карту для оценки риска дорожно-транспортных происшествий. Эта гибридная прогностическая модель оценивает риск дорожно-транспортных происшествий, рассматривая 22 различных прогностических переменных, включая географические характеристики, временные и погодные условия, характеристики дороги, характеристики транспортного средства и водителя, рассчитанные на основе авторитетных источников данных и добровольной географической информации, сформированной путём разработки стороннего приложения, которое запускалось внутри мессенджера Telegram. В статье [4] для прогнозирования серьёзности аварии применялся метод ансамблевого ранжирования, включающий три метода ранжирования на основе использования фильтров, таких как прирост информации, коэффициент усиления и симметричная неопределённость. В результате анализа были выбраны восемь важных характеристик для прогнозирования серьёзности аварий: среднегодовой трафик, ширина дороги, процент транспортных средств, поворачивающих налево, возраст водителя, процент транспортных средств, поворачивающих направо, типы задействованных транспортных средств, точечная скорость и причины аварий. Для прогнозирования тяжести аварий на городских дорогах использовались множественная логистическая регрессия и искусственная нейронная сеть. Исследование [5] направлено на выявление временных закономерностей для прогнозирования количества аварий в Пакистане путём использования одномерного анализа временных рядов, такого как модели сезонной авторегрессии, интегрированного скользящего среднего и экспоненциального сглаживания. Результаты показывают, что последняя модель лучше соответствует данным об авариях после расчёта наименьшей средней абсолютной ошибки, среднеквадратической ошибки, средней абсолютной процентной ошибки и нормализованного байесовского информационного критерия. В работе [6] метод гедонической регрессии используется для оценки стоимости обеспечения безопасности дорожного движения с использованием информации о шведском рынке автомобилей. Результаты исследования показывают, что рыночная цена автомобиля отрицательно коррелирует с присущим ему уровнем риска, т. е. шведские потребители автомобилей платят надбавку за безопасность, приобретая более безопасные автомобили. По сравнению с предыдущими шведскими исследованиями заявленных предпочтений это исследование показывает более низкую готовность платить за дополнительную безопасность автомобиля, что может быть результатом взаимодействия между государственным вмешательством и индивидуальным самострахованием и самозащитой. Представляется, что для оценки рисков дорожно-транспортных происшествий (ДТП) может быть эффективно использован подход, описанный в [7], для управления рисками энергетических компаний.

В настоящей работе моделирование количества ДТП в Российской Федерации осуществляется с помощью многокритериального метода наименьших модулей (МНМ) [8].

Вычислительная схема многокритериального МНМ. Рассмотрим кратко алгоритм работы многокритериального МНМ [8]. Пусть задано линейное регрессионное уравнение (модель):

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

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

Уравнение (1) представимо в векторном виде:

$$y = X\alpha + \varepsilon,$$

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 компонентами x_{ki} .

Пусть, руководствуясь некоторыми существенными обстоятельствами, которые могут иметь самый различный характер, исследователь при построении регрессионной модели (1) для анализируемого объекта, учитывая его характеристики или суть сформулированной при моделировании задачи, может (или обязан) разделить исходную выборку данных на s непересекающихся подвыборок (групп номеров наблюдений) $P_i, i = \overline{1, s}$:

$$\bigcup_{i=1}^s P_i = \{1, 2, \dots, n\}, P_i \cap P_j = \emptyset, i \neq j.$$

Многокритериальный МНМ состоит в решении задачи минимизации векторной функции потерь:

$$I(\alpha) = \left(\sum_{k \in P_1} |\varepsilon_k|, \sum_{k \in P_2} |\varepsilon_k|, \dots, \sum_{k \in P_s} |\varepsilon_k| \right) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Задача (2) решается в два этапа. Вначале выделяется множество паретовских вершин N^{ex} симплекса B , задаваемого по правилу

$$B = \{(\alpha, u, v) | \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + u_k - v_k = y_k, \quad u_k \geq 0, \quad v_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}\}.$$

Это может быть сделано посредством решения серии задач линейного программирования (ЛП):

$$\min_{(\alpha, u, v) \in B} \sum_{i=1}^s \gamma_i^l \sum_{k \in P_i} (u_k + v_k) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где γ_i^l – узлы равномерной γ -сети s -мерного открытого единичного куба Γ :

$$\Gamma = \{\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_s) | \gamma_i > 0, i = \overline{1, s}, \sum_{i=1}^s \gamma_i = 1\}.$$

Наконец, окончательное формирование всего множества Парето N на основе построенного множества N^{ex} в [8] предлагается базировать на подходе, описанном в фундаментальной работе Yu L. и Zeleny M. [9]. Множество N представляет собой объединение паретовских выпуклых комбинаций векторов из множества N^{ex} .

Идентификация параметров модели численности ДТП с помощью многокритериального МНМ. В работе [10] на основе обработки данных официальной статистики за 2004 – 2019 гг. построена регрессионная модель динамики ДТП в России с использованием непрерывной формы метода максимальной согласованности (НММС), которая имеет вид

$$\begin{aligned} y_k &= \alpha_0 + \alpha_1 x_{k1} + \alpha_2 x_{k2} + \alpha_3 x_{k3} + \alpha_4 x_{k4} + \alpha_5 x_{k5} + \varepsilon_k = \\ &= -584\,066.39 + 13\,468.49 x_{k1} + 2810.48 x_{k2} + 6.19 x_{k3} + 6648.59 x_{k4} + 29.32 x_{k5} + \varepsilon_k = \hat{y}_k + \varepsilon_k, \quad (4) \\ k &= \overline{1, 16}, E=2.95, M=97\,126.21, L=23\,131.46, \end{aligned}$$

где y – количество ДТП с пострадавшими, чел.; x_1 – количество троллейбусов, тыс. ед.; x_2 – численность населения в России, млн чел.; x_3 – численность трудоспособного сельского населения, тыс. чел.; x_4 – ежегодное потребление алкоголя, литры чистого спирта на человека в возрасте более 15 лет; x_5 – протяжённость автомобильных дорог общего назначения, тыс. км; \hat{y}_k – расчётные (вычисленные по модели) значения зависимой переменной; E – средняя относительная ошибка аппроксимации:

$$E = 100\% \sum_{k=1}^n \left| \frac{\varepsilon_k}{y_k} \right| / n;$$

M – максимальная по модулю ошибка:

$$M = \max_{k=1, n} |\varepsilon_k|;$$

L – непрерывное представление значения критерия согласованности поведения между расчётными и фактическими значениями зависимой переменной:

$$L = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks},$$

здесь

$$l_{ks} = \begin{cases} |\hat{y}_k - \hat{y}_s|, & (\hat{y}_k - \hat{y}_s)(y_k - y_s) < 0 \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Займёмся уточнением оценок параметров модели (4) с помощью многокритериального МНМ. Разобьём весь период наблюдений на две части – первую и вторую половины:

$$P_1 = \{1, 2, \dots, 8\},$$

$$P_2 = \{9, 10, \dots, 16\}.$$

Решая серию задач ЛП (3) с помощью специализированной программы [11] на основе перебора узлов равномерной γ -сети s -мерного открытого единичного куба Γ с шагом 0.01 сформируем множество N^{ex} паретовских векторов оценок параметров модели (4) (см. табл. 1).

Таблица 1

Множество паретовских векторов оценок параметров модели (4)

№	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
1	-2 950 323	27 625.71	13 251.83	41.860 03	-3411.23	68.224 32
2	-1 984 372	3262.132	9741.627	27.788 45	9701.109	40.175 78
3	-1 677 575	-4476.03	8626.744	23.319 15	13 865.74	31.267 24
4	-1 506 618	-4926.6	7860.18	19.567 51	16 107.97	34.515 69
5	-1 342 438	-6728.6	7178.958	16.8033	17 612.56	32.460 52
6	-874 808	1452.103	4782.644	9.731 316	12 727.76	25.158 79
7	-788 796	2555.959	4350.565	8.425 332	12 130.69	23.893 26
8	-721 368	2151.67	4039.332	7.384 977	12 617.34	23.146 62
9	-502 163	6773.093	2804.171	0.466 472	16 684.19	42.193 08
10	189 944.3	6376.066	-1579.86	3.363 961	7567.881	18.823 02
11	229 824.6	12 307.71	-1366.4	-2.719 42	7075.612	19.684 04
12	282 152.7	12 669.85	-1667.17	-2.911 99	6388.531	18.062 49
13	236 427.3	13 289.76	-1331.06	-3.7266	6994.111	19.826 59
14	139 516.7	16 823.13	-406.952	-7.285 54	7082.347	20.085 08
15	-66 526.4	24 335.49	1557.815	-14.8523	7269.947	20.634 66
16	435 440.6	7118.464	-4258.17	5.7257	5758.995	88.595 15

Проанализируем знаки компонент всех шестнадцати векторов параметров, составляющих множество N^{ex} . Будем иметь при этом в виду, что, в соответствии с содержательным смыслом независимых переменных, все коэффициенты модели, за исключением свободного члена, должны быть положительны, что, собственно, и проявилось в модели (4). Таким образом, допустимыми по знакам параметров являются пять входящих в состав N^{ex} векторов: № 2, 6, 7, 8, 9. Любой из них может быть выбран для замены коэффициентов модели (4) при решении исследователя о применении для идентификации её параметров многокритериального МНМ. Для однозначного выбора «лучшего» варианта можно воспользоваться теми же критериями адекватности, которые сопровождали построение этой модели в [10]. В табл. 2 приведены их значения для этих вариантов.



Таблица 2

Значения критериев адекватности паретовских векторов параметров модели (4)

Номер варианта	E	L	M
2	3.261	117 550	99 464
6	2.167	64 195	72 507
7	2.132	58 883	72 123
8	2.139	58 881	72 129
9	2.173	56 910	73 758

Анализ табл. 2 позволяет сделать вывод, что вариант № 7 является лучшим, т. е. регрессионная модель (4) после применения многокритериального МНМ может быть представлена в виде

$$y_k = -788\,796 + 2555.959x_{k1} + 4350.565x_{k2} + 8.425x_{k3} + 12\,130.69x_{k4} + 23.893x_{k5} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,16}, \quad (5)$$

$$E=2.132, M=72\,123, L=58\,883.$$

Отметим, что средняя относительная E и максимальная по модулю M ошибки аппроксимации модели (5) существенно меньше, чем модели (4). Тот факт, что лишь по критерию L модель (4), напротив, лучше модели (5), совершенно естественен, поскольку именно в соответствии с оптимизацией L и производилась идентификация параметров первой.

Проанализируем теперь, как изменилась значимость независимых переменных при переходе от (4) к (5). Отметим рост степени влияния почти в два раза факторов x_2 и x_4 , а также незначительный рост x_3 . Вместе с тем сильно уменьшилась значимость переменной x_1 (более чем в пять раз) и незначительно, на 22 %, переменной x_5 .

В соответствии с предложенной в работе [12] методикой оценим вклады факторов δ_i , $i = \overline{1,5}$ в модели (5):

$$\delta_1 = 2.3 \%,$$

$$\delta_2 = 67 \%,$$

$$\delta_3 = 17.5 \%,$$

$$\delta_4 = 9.3 \%,$$

$$\delta_5 = 3.9 \%.$$

Таким образом, наиболее значимым фактором, определяющим динамику количества ДТП в стране, является численность её населения. Обращает на себя внимание тот факт, что, в соответствии с моделью (5), почти 10 % роста количества ДТП объясняется потреблением алкоголя.

Заключение. Регрессионная модель (5) может быть эффективно использована для решения широкого круга аналитических и прогнозных задач. При проведении многовариантных прогнозных расчётов количества ДТП предварительно необходимо разработать соответствующие прогнозные сценарии, различающиеся будущими значениями независимых переменных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kibar T. F., Celik T., Aytac B. P. Statistical Analysis of Truck Accidents for Divided Multilane Interurban Roads in Turkey // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2018. – V. 22. – P. 1927-1936.
2. Hosseinpour M., Yahaya A. S., Ghadiri S. M., Prasetijo J. Application of Adaptive Neuro-fuzzy Inference System for road accident prediction // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2013. – V. 17. – P. 1761-1772.
3. Charandabi N. K., Gholami A., Bina A. A. Road accident risk prediction using generalized regression neural network optimized with self-organizing map // Neural Computing and Applications. – 2022. – V. 34. – P. 8511-8524.
4. Sarkar A., Sarkar S. Comparative Assessment Between Statistical and Soft Computing Methods for Accident Severity Classification // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. – 2020. – V. 101. – P. 27-40.

5. Rabbani M. B. A., Musarat M. A., Alaloul W. S. and others. A Comparison Between Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) and Exponential Smoothing (ES) Based on Time Series Model for Forecasting Road Accidents // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2021. – V. 46. – P. 11113-11138.
6. Andersson H. The Value of Safety as Revealed in the Swedish Car Market: An Application of the Hedonic Pricing Approach // *Journal of Risk and Uncertainty*. – 2005. – V. 30. – P. 211-239.
7. Ляпустина, Ю. В. Разработка алгоритма оптимизации комплекса методов управления рисками энергетических компаний / Ю. В. Ляпустина, М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2017. – № II-1 (30). – С. 26-35.
8. Носков, С. И. Многокритериальный метод наименьших модулей в регрессионном анализе / С. И. Носков // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. – 2023. – № 1. – С. 28-36.
9. Yu L., Zeleny M. The set of all nondominated solutions in linear cases and multicriteria simplex method // *J. of Math. Anal. and Applic.* – 1975. – V. 49. – № 2. – P. 430-460.
10. Носков, С. И. Регрессионная модель динамики дорожно-транспортных происшествий в Российской Федерации / С. И. Носков, Ю. А. Бычков // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2023. – № 1 (47). – С. 37-42.
11. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021613936 Программа определения паретовских оценок параметров линейной регрессии посредством применения многокритериального метода наименьших модулей / Носков С. И., Хоняков А. А. (Россия); правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС); заявка № 2022680313 28.10.2022; дата регистр. 10.11.2022.
12. Носков, С. И. Оценка динамики вкладов факторов в линейной регрессионной модели / С. И. Носков // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2021. – Т. 17. – № 5. – С. 15-19.



Григорьев Н. П., Ковалев В. А., Копай И. Г.
N. P. Grigoriev, V. A. Kovalev, I. G. Kopyay

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

INCREASING THE EFFICIENCY OF INTERACTION BETWEEN TRACTION AND EXTERNAL POWER SUPPLY SYSTEMS

Григорьев Николай Потапович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Nikolay P. Grigoriev – Ph.D. (Eng.), Professor, Electric Power Supply Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Ковалев Владимир Александрович – аспирант кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: kovalevv.a.2011@mail.ru.

Vladimir A. Kovalev – Postgraduate Student, Electric Power Supply Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: kovalevv.a.2011@mail.ru.

Копай Игорь Геннадьевич – старший преподаватель Приморского института железнодорожного транспорта – филиала Дальневосточного государственного университета путей сообщения в г. Уссурийске (Россия, Уссурийск). E-mail: kopay@primizt.ru.

Igor G. Kopyay – Senior Lecturer, Primorsky Institute of Railway Transport – a Branch of Far Eastern State Transport University in Ussuriysk (Russia, Ussuriysk). E-mail: kopay@primizt.ru.

Аннотация. Статья посвящена актуальному вопросу повышения эффективности взаимодействия системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ с системой внешнего электроснабжения. Системы тягового и внешнего электроснабжения являются динамическими электрически связанными системами и взаимодействуют в целях электрообеспечения перевозочного процесса. Программы стратегического развития железных дорог предусматривают увеличение объёмов перевозок грузов и пассажиров при условии полного и надёжного энергообеспечения электроподвижного состава с минимальными потерями электроэнергии. При этом оперативные переключения в системе внешнего электроснабжения могут оказывать влияние на показатели работы в системе тягового электроснабжения (напряжения на токоприёмниках поездов, потери электроэнергии и др.). Повышение эффективности деятельности системы тягового электроснабжения предложено выполнить переходом от существующего «реактивного» способа управления показателями работы к встречному интервальному с выбором «нормальных схем питания тяговых нагрузок» на прогнозные интервалы времени. Учёт взаимосвязи систем внешнего и тягового электроснабжения при определении перспективных интегральных показателей работы предложено выполнить входными и взаимными сопротивлениями узлов подключения тяговых подстанций к ЛЭП. В целях повышения точности результатов прогнозных показателей взаимодействия систем и синтеза рациональных схем питания тяговых нагрузок определяются действительные значения входных и взаимных сопротивлений узлов системы внешнего электроснабжения. Разработано автоматизированное рабочее место расчёта входных и взаимных сопротивлений системы внешнего электроснабжения, питающей систему тягового электроснабжения ДВЖД. Результаты расчёта показали высокую разность модулей и аргументов входных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения. Доказана целесообразность учёта действительных значений входных и взаимных сопротивлений системы внешнего электроснабжения при анализе и синтезе нормальных схем питания тяговых нагрузок.

Summary. the article is devoted to the topical issue of increasing the efficiency of interaction between the traction power supply system of electrified railways with alternating current 25 kV and the external power supply system. Traction and external power supply systems are dynamic, electrically connected systems and interact for the purpose of electrical supply of the transportation process. Strategic development programs for railways provide for an increase in the volume of transportation of goods and passengers, subject to the complete and reliable power supply of electric rolling stock with minimal power losses. At the same time, operational switching in the external power

supply system can affect the performance in the traction power supply system (voltage on train pantographs, power losses, etc.). Improving the efficiency of the traction power supply system is proposed to be performed by switching from the existing «reactive» method of managing performance indicators to the opposite interval method, choosing «normal traction load power supply schemes» for predicted time intervals. It is proposed to take into account the interconnection of external and traction power supply systems when determining promising integral performance indicators by the input and mutual resistances of the traction substations connection nodes to power transmission lines. In order to improve the accuracy of the results of predictive indicators of the interaction of systems and the synthesis of rational schemes for supplying traction loads, the actual values of the input and mutual resistances of the nodes of the external power supply system are determined. An automated workplace for calculating the input and mutual resistances of the external power supply system that feeds the traction power supply system of the Far Eastern Railway has been developed. The results of the calculation showed a high difference between the modules and arguments of the input resistances of the traction substation connection units to the external power supply system. The expediency of taking into account the actual values of the input and mutual resistances of the external power supply system in the analysis and synthesis of normal power supply circuits for traction loads is proved.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, система внешнего электроснабжения, входные сопротивления, взаимные сопротивления, встречное интервальное регулирование, нормальные схемы, потери электроэнергии.

Key words: traction power supply system, external power supply system, input resistances, mutual resistances, counter interval regulation, normal circuits, power losses.

УДК 621.331:625.1:004.9

Системы тягового (СТЭ) и внешнего (СВЭ) электроснабжения взаимодействуют в целях электрообеспечения выполнения графика движения поездов. Перспективные условия функционирования электрифицированных железных дорог (ЭлЖД), определённые стратегическими программами [1–3], предусматривают повышение эффективности деятельности СТЭ в условиях роста объёмов грузоперевозок.

Ключевым требованием программ стратегического развития железных дорог является полное и надёжное энергетическое обеспечение перевозочного процесса с минимальными потерями электроэнергии. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» [1] предусматривает снижение потерь электрической энергии при передаче её от СВЭ до электроподвижного состава (ЭПС).

Одной из главных задач участия СВЭ в процессе электрообеспечения перевозочного процесса является обеспечение соответствия фактического уровня напряжения в узлах подключения тяговых подстанций СТЭ к электрическим сетям СВЭ нормативным значениям. С другой стороны, СВЭ обеспечивает электроснабжение районных нагрузок, динамика которых, как правило, существенно отличается от однофазных тяговых нагрузок ЭПС. Регулирование напряжения в узлах подключения районных потребителей выполняется независимо от ситуации в СТЭ.

Изменение топологии и сопротивлений ветвей СВЭ выполняется изменением положения коммутационных аппаратов [4; 5] и учитывается регулированием напряжения в узлах подключения тяговых подстанций СТЭ и подстанций районных потребителей к СВЭ.

В целях обеспечения нормативного уровня напряжения в узлах подключения нагрузок к электрическим сетям в СТЭ может применяться встречное регулирование напряжения. Встречное регулирование является перспективным и выполняется устройствами автоматики в соответствии с графиком движения поездов и прогнозных значений напряжений узлов. Выбор прогнозных ступеней устройств регулирования напряжения выполняется таким образом, чтобы обеспечивать нормативный уровень напряжения в узлах подключения потребителей к электрическим сетям и токоприёмников ЭПС.

В целях повышения эффективности деятельности СТЭ в работах [7–9] предлагается осуществить переход от существующего способа управления показателями работы СТЭ к прогнозному, при котором обеспечивается выполнение графика движения поездов выбором «нормальных схем

питания тяговых нагрузок» на перспективные интервалы времени. Алгоритм определения интервалов времени при переходе от реактивного управления показателями работы ЭлЖД к встречному интервальному представлен в работе [7]. Целесообразность нового понятия «нормальные схемы питания тяговых нагрузок» и критерии их определения предложены и обоснованы в работах [8; 9].

Обеспечение электроснабжения выполнения графика движения поездов осуществляется регулированием напряжения в тяговой сети на прогнозные интервалы времени выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок. Нормальная схема питания тяговых нагрузок в интервале времени учитывает следующие факторы, влияющие на показатели работы СТЭ:

1. Степень устройств регулирования напряжения силовых трансформаторов тяговых подстанций (РПН).
2. Ступени устройств продольной (УПК) и поперечной (КУ) ёмкостной компенсации.
3. Количество силовых трансформаторов для питания ЭПС (тяговых трансформаторов), включённых на параллельную работу.
4. Схему питания тяговой сети.

Поскольку системы тягового и внешнего электроснабжения являются электрически связанными, оперативные переключения в СВЭ оказывают влияние на показатели работы СТЭ (напряжение в тяговой сети, потери электрической энергии и др.) и значения входных и взаимных сопротивлений в узлах подключения тяговых подстанций к электрическим сетям СВЭ [5].

Узел СВЭ определяется точкой присоединения вводов распределительных устройств электростанции, тяговой или районной подстанции к электрическим сетям СВЭ. Входные и взаимные сопротивления СВЭ являются одним из показателей взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения и определяют влияние топологии, сопротивлений ветвей и нагрузок СВЭ на напряжения в узлах подключения тяговых подстанций к электрическим сетям.

Входное сопротивление узла i Z_{ii} соответствует отношению падения напряжения $\Delta \dot{U}_i$ от тока нагрузки \dot{I}_i этого же узла и характеризует влияние нагрузок, подключённых к узлу i , на напряжение узла. Взаимное сопротивление узлов i и j Z_{ij} соответствует отношению падения напряжения в узле i $\Delta \dot{U}_i$ от тока узла j \dot{I}_j и характеризует влияние нагрузок смежных узлов на напряжение в узле i .

Передача электроэнергии от электрических станций до СТЭ обеспечивается трёхфазными ЛЭП и силовыми трансформаторами (автотрансформаторами) подстанций, комплексные сопротивления фаз которых, как правило, симметричны. В этой связи входные и взаимные сопротивления узлов подключения тяговых подстанций к электрическим сетям СВЭ имеют одинаковые значения модулей и аргументов по фазам А, В и С. Падения напряжения в узлах подключения тяговых подстанций к СВЭ зависят от модулей и аргументов токов плеч подстанций и значений входных сопротивлений узлов.

Токи плеч питания тяговых нагрузок тяговых подстанций распределяются в обмотках тяговых трансформаторов в соотношении $2/3$ и $-1/3$, причём $2/3$ относится к обмотке, напряжение которой совпадает с напряжением плеча [6]. Однофазные тяговые нагрузки СТЭ создают несимметрию токов обмоток тяговых трансформаторов и фаз СВЭ [6]. Несимметрия токов в СВЭ от тяговых нагрузок СТЭ повышает потери электроэнергии в электрических сетях при передаче её от электростанций до ЭПС и увеличивает несимметрию напряжений в узлах подключения потребителей к СВЭ.

Токи обмоток тягового трансформатора определяют токи фаз узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ. Падение напряжения в фазе узла подключения тяговой подстанции i к СВЭ определим по формуле

$$\Delta \dot{U}_i = \dot{I}_i Z_{ii},$$

где \dot{I}_i – ток фазы в узле подключения тяговой подстанции i к СВЭ; Z_{ii} – входное сопротивление узла подключения тяговой подстанции i к СВЭ, приведённое к базисному напряжению.

Падения напряжения в узлах подключения тяговых подстанций к СВЭ понижают модуль напряжения на тяговых шинах подстанций. Пониженное напряжение на тяговых шинах создаёт риск нарушения нормативного уровня напряжения на токоприёмниках ЭПС.

Несимметричные токи фаз от тяговых подстанций создают несимметричные падения напряжений на симметричных входных сопротивлениях узлов подключения подстанций к электрическим сетям и повышают несимметрию напряжений в узлах СВЭ. Неравенство модулей и (или) аргументов входных сопротивлений смежных тяговых подстанций и токов фаз приводит к возникновению разности напряжений узлов подключения смежных тяговых подстанций к фазам ЛЭП и повышает потери в фазах ЛЭП, стали и меди силовых трансформаторов и обуславливает протекание уравнильных токов в СТЭ и СВЭ.

Уравнильные токи распределяются по фазам обмоток тяговых трансформаторов и электрических сетей СВЭ в соотношении $2/3$ и $-1/3$ [6], повышают несимметрию токов и напряжений, потери электроэнергии в ЛЭП и силовых трансформаторах СВЭ и тяговой сети СТЭ. Протекание уравнильных токов в СВЭ вызывает дополнительный нагрев проводов ЛЭП и обмоток силовых трансформаторов, что снижает пропускную способность линий, повышает интенсивность износа изоляции и сокращает срок службы электрооборудования.

Применение входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ при выборе рациональных ступеней устройств регулирования показателей работы СТЭ рассмотрено в работах отечественных учёных и специалистов в области электроснабжения железных дорог [10–12].

Методика выбора ступеней РПН с учётом значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ предложена в работе [13]. Доказано, что рациональный выбор ступени РПН с учётом входных и взаимных сопротивлений узлов обеспечивает снижение потерь электроэнергии в тяговой сети.

Влияние входных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ на выбор ступени КУ рассмотрено в работе [10]. Доказано, что выбор рациональной ступени КУ с учётом входного сопротивления снижает негативное влияние однофазных тяговых нагрузок на качество электрической энергии в СВЭ и обеспечивает снижение потерь электрической энергии в СТЭ. Влияние входных сопротивлений узлов СВЭ на выбор ступени УПК в интервалах времени, а также на напряжение и уравнильный ток в контактной сети рассмотрено в работах [14; 15].

В работе [16] представлена методика расчёта уравнильного тока в контактной сети межподстанционных зон СТЭ переменного тока 25 кВ. Для расчёта значения уравнильного тока в данной методике предложен системный подход и применение в исходных данных значений входных и взаимных сопротивлений узлов СВЭ.

В работах [11; 12] отмечено, что неучёт значений взаимных сопротивлений тяговых подстанций может вносить существенную погрешность при расчётах показателей работы СТЭ (при расчёте напряжений 3-15 %, уравнильного тока – 15-50 %, потерь мощности – 5-20 %, токов короткого замыкания – до 50 %). Таким образом, применение перспективных значений входных и взаимных сопротивлений узлов СВЭ повышает точность анализа и синтеза нормальных схем питания тяговых нагрузок при встречном интервальном регулировании.

Значения входных и взаимных сопротивлений узлов СВЭ зависят от топологии действительных схем и сопротивлений ветвей, прогнозное состояние которых известно оперативным работникам, как правило, на перспективный период. Оперативные переключения, выполняемые в целях выполнения ремонтных работ, технического обслуживания электрооборудования и организации рационального режима работы СВЭ, выполняются по плану. Перспективная топология и сопротивления ветвей могут быть определены с высокой точностью на прогнозные интервалы времени.

В целях повышения точности результатов анализа перспективного взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения ДВЖД и синтеза рациональных схем питания тяговых нагрузок разработано автоматизированное рабочее место (АРМ РВВС), позволяющее определять

комплексные динамические значения входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций ДВЖД к СВЭ [17].

АРМ РВВС содержит базу данных (БД) ЛЭП и силовых трансформаторов (автотрансформаторов) подстанций СВЭ, а также паспортных данных проводов и трансформаторов, эксплуатируемых в СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД. Принятая расчётная схема СВЭ включает трансформаторные подстанции 110 кВ (182 ед.), 220 кВ (41 ед.), 500 кВ (5 ед.), звенья ЛЭП 110 кВ (326 ед.), 220 кВ (93 ед.), 500 кВ (6 ед.).

БД АРМ обеспечивает хранение и актуализацию параметров 425 звеньев из 520 цепей ЛЭП СВЭ, а также данные 73 автотрансформаторов и 419 трансформаторов, эксплуатируемых на 228 трансформаторных подстанциях и 13 электростанциях.

Информация о состоянии звеньев ЛЭП и силовых трансформаторов (автотрансформаторов) СВЭ хранится в БД в виде матриц. Матрицы содержат следующие данные о состоянии электрооборудования СВЭ во времени расчётной мгновенной схемы:

1. Для звеньев ЛЭП: номера звеньев ЛЭП j , начального n_j и конечного k_j номеров узлов, класс напряжения U_j , тип провода $T_{прj}$, протяжённость l_j и состояние ОС $_{лj}$ (включено в работу – 1, отключено – 0) j -го звена ЛЭП, количество цепей в j -м звене q_j , количество проводов в фазе q -й цепи j -го звена $N_{прj,q}$, ($q=1,...,q_j$), температуру q -й цепи j -го звена $t_{лэпj,q}$.

2. Для силовых трансформаторов (автотрансформаторов) подстанций: порядковые номера подстанций i , количество трансформаторов i -й подстанции q_i , индекс трансформатора q , тип трансформатора $T_{трi,q}$, температуру нагрева обмоток $t_{трi,q}$, ступень РПН $n_{рпнi,q}$ и состояние q -го трансформатора i -й подстанции ОС $_{трi,q}$ (включён в работу – 1, отключён – 0).

Матрицы паспортных данных электрооборудования СВЭ содержат данные 64 типов проводов ЛЭП, 44 типов трансформаторов и 6 типов автотрансформаторов СВЭ питающей СТЭ ДВЖД, классов напряжения 110, 220 и 500 кВ.

В целях учёта сетевого развития СВЭ в БД предусмотрена возможность актуализации количества ЛЭП, трансформаторных подстанций, силовых трансформаторов (автотрансформаторов) действующих подстанций, а также номенклатуры проводов и трансформаторного оборудования при применении новых типов проводов и трансформаторов в СВЭ.

Система управления базой данных (СУБД) АРМ обеспечивает возможность обмена данными с системным оператором СВЭ в целях определения перспективных топологии и сопротивлений ветвей СВЭ в интервалах времени при расчёте значений входных и взаимных сопротивлений [17]. В качестве системного оператора, например, для Дальневосточного региона, выступает ОДУ Востока, которое обеспечивает оперативно-диспетчерское управление режимами работы энергосистем Хабаровского, Приморского краёв, Амурской области и ЕАО, в границах которых расположена СТЭ ДВЖД.

В целях учёта динамики топологии и сопротивлений ветвей СВЭ в перспективных интервалах времени при встречном интервальном регулировании АРМ обеспечивает определение значений сопротивлений ветвей СВЭ с учётом прогнозных количества ЛЭП и трансформаторов подстанций в работе, температуры нагрева проводов ЛЭП и обмоток трансформаторов (автотрансформаторов), а также коэффициентов трансформации трансформаторов (автотрансформаторов).

АРМ РВВС позволяет определять прогнозные комплексные значения входных и взаимных сопротивлений узлов СВЭ с учётом действительных перспективных топологии и сопротивлений ветвей СВЭ. Статистическая обработка данных позволяет определить динамику изменения значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к ЛЭП СВЭ в интервалах времени при встречном интервальном регулировании в целях энергообеспечения выполнения графика движения поездов и снижения потерь электрической энергии [5].

По результатам расчётов значений входных и взаимных сопротивлений 32 тяговых подстанций ДВЖД установлено:

1. Диапазон изменения модулей входных сопротивлений (приведённые к тяговому напряжению) составил от 0,216 до 3,26 Ом, аргументов – от 60,23 до 84 град. эл. Среднее значение мо-

дулей входных сопротивлений тяговых подстанций ДВЖД составляет 1,15 Ом, аргументов – 73,7 град. эл.

2. Отклонение модуля входного сопротивления превышает 20 % для 22 (68 %) тяговых подстанций ДВЖД. Наибольшее отклонение модуля от среднего значения определено для ТП «Дальнереченск» (в 1,8 раза).

3. Отклонение аргумента входного сопротивления превышает 5 % для 29 (90 %) тяговых подстанций ДВЖД. Наибольшее отклонение аргумента от среднего значения определено для ТП «Первая речка» (18 %).

Полученные результаты свидетельствуют о высокой разности модулей и аргументов входных сопротивлений смежных тяговых подстанций ДВЖД. Определение действительных значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ с учётом действительных топологии и сопротивлений ветвей повышает точность определения интегральных показателей работы СТЭ при анализе и синтезе нормальных схем питания тяговых нагрузок.

Выводы:

1. Выполнен анализ взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ. Доказано, что изменение значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к электрическим сетям системы внешнего электроснабжения может оказывать влияние на показатели работы СТЭ (напряжение на токоприёмниках ЭПС, потери электроэнергии и др.).

2. Обоснована необходимость учёта действительных значений входных и взаимных сопротивлений при анализе и синтезе нормальных схем питания тяговых нагрузок при встречном интервальном регулировании показателей работы системы тягового электроснабжения. Применение прогнозных входных и взаимных сопротивлений обеспечивает учёт взаимосвязи систем внешнего и тягового электроснабжения при определении прогнозных интегральных значений показателей работы в расчётных интервалах.

3. Разработанный АРМ РВВС позволяет учесть динамику топологии и сопротивлений ветвей системы внешнего электроснабжения при определении прогнозных значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к электрическим сетям.

4. На примере системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги доказана высокая разность модулей и аргументов входных сопротивлений узлов подключения смежных тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения. Полученные результаты подтверждают необходимость учёта комплексных значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к фазам ЛЭП при нормализации схем питания тяговых нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от «15» декабря 2011 г. № 2718р // Инновационный дайджест РЖД. – URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (дата обращения: 01.08.2022). – Текст: электронный.
2. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года (Белая книга) / ОАО «РЖД». – URL: <https://clck.ru/35fyhQ> (дата обращения: 30.08.2023). – Текст: электронный.
3. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. №3363-р // Правительство России, официальный сайт. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения: 01.08.2022). – Текст: электронный.
4. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчётов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
5. Grigoriev N. P. An algorithm of calculating the input and mutual resistances of the external electric power supply system / N. P. Grigoriev, V. A. Tikhomirov, P. N. Trofimovich [et al.] // Proceedings II International Scien-



- tific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021): Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 28 октября 2021 года. Vol. 2647 A. – Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2021. – P. 60023.
6. Марквардт, К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1965. – 464 с.
7. Власьевский, С. В. Встречное регулирование показателей работы в системе тягового электроснабжения переменного тока / С. В. Власьевский, Н. П. Григорьев, П. Н. Трофимович // Электротехника. – 2019. – № 7. – С. 50-53.
8. Григорьев, Н. П. Нормальные схемы питания тяговых нагрузок / Н. П. Григорьев, С. А. Власенко, А. П. Парфианович // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. В 3 т. Т. 2 / Под ред. С. М. Гончарука. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 63-69.
9. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ / Н. П. Григорьев, М. С. Клыков, А. П. Парфианович, В. И. Шестухина // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 58-60.
10. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
11. Герман, Л. А. Матричный метод расчёта системы тягового электроснабжения переменного тока с учётом системы внешнего электроснабжения / Л. А. Герман // Наука и техника транспорта. – 2004. – № 4. – С. 70-77.
12. Герман, Л. А. Сравнение методов расчёта системы тягового электроснабжения при разных способах учёта параметров внешней сети / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 1. – С. 16-21.
13. Герман, Л. А. Автоматическое регулирование напряжения трансформаторов тяговых подстанций переменного тока / Л. А. Герман, Д. А. Куров // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 1. – С. 19-26.
14. Герман, Л. А. Регулируемые установки ёмкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие / Л. А. Герман. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 316 с.
15. Григорьев, Н. П. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения устройствами продольной компенсации / Н. П. Григорьев, П. Н. Трофимович // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – № 3. – С. 64-68.
16. Марквардт, Г. Г. Расчёт уравнивающих токов в тяговой сети / Г. Г. Марквардт, Н. П. Григорьев, М. Г. Демин // Электричество. – 1984. – Вып. 10. – С. 50-52.
17. Григорьев, Н. П. Автоматизированное рабочее место расчёта входных и взаимных сопротивлений системы внешнего электроснабжения / Н. П. Григорьев, В. А. Ковалев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 1 (26). – С. 54-60.

Челухин В. А., Васильев А. В., Абрамсон Е. В., Пьей Зон Аунг
V. A. Chelukhin, A. V. Vasiliev, E. V. Abramson, Pyae Zone Aung

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ
СУТОЧНОГО ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР**

**EXPERIMENTAL STUDY OF ENERGY CONVERSION OF DAILY TEMPERATURE
DIFFERENCE**

Челухин Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

Vladimir A. Chelukhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Security Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

Васильев Александр Владимирович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: astrgan@gmail.com.

Alexander V. Vasiliev – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: astrgan@gmail.com.

Абрамсон Елизавета Владимировна – старший преподаватель кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Elizaveta27@bk.ru.

Elizaveta V. Abramson – Senior Lecturer, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: Elizaveta27@bk.ru.

Пьей Зон Аунг – аспирант кафедры прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: pyaythar87@gmail.com.

PyayZone Aung – a Post-graduate Student, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: pyaythar87@gmail.com.

Аннотация. В последнее время всё больше внимания уделяется возобновляемой энергетике. Зелёная энергетика, или возобновляемая энергетика, в последнее время всё больше и больше начинает теснить традиционную энергетику, основанную на сжигании ископаемых топлив: угля, нефти и т. д. В основном развитие возобновляемых источников энергии идёт за счёт ветроэнергетики и солнечной энергетике. Однако, как показали последние ситуации в Германии, США и других странах, ветроэнергетика имеет свои недостатки. Это прежде всего нестабильность подачи энергии, а также сложности преобразования непостоянной энергии ветра в ток промышленного назначения. Солнечная энергетика тоже имеет свои недостатки. Это необходимость больших площадей, необходимость именно солнечных районов и очистка солнечных панелей от снега, пыли и других осадков. Сегодня идёт поиск возобновляемых источников энергии по всем направлениям, рассматриваются самые незначительные варианты, такие как, например, тепловая энергия океанов. «Теплоокеанная» электростанция будет вырабатывать энергию за счёт разницы температур между поверхностными тёплыми и придонными холодными водами. В работе рассматривается метод получения энергии с помощью перепада температур между днём и ночью. В любой точке земного шара днём температура всегда выше, чем ночью. Этот перепад температуры может быть от 3 и до 12, 15 и более градусов, например, в Уренгое зимой он может достигать и 60 °С. То же самое происходит и на других планетах, особенно на Марсе. Там перепад температуры между днём и ночью порядка 60...80 °С, поскольку Марс не имеет атмосферы.



Summary. Recently, renewable energy has received more and more attention. Green energy, or renewable energy, has recently started to overtake traditional energy based on burning fossil fuels: coal, oil, etc., more and more. The development of renewable energy sources is mainly driven by wind power and solar energy. However, as recent situations in Germany, the United States and other countries have shown, wind power has its disadvantages. These are, first, the instability of energy supply, as well as the difficulties of converting the erratic wind energy into a current for industrial purposes. Solar energy also has its disadvantages. These are the necessity of large areas, the need for solar areas and the cleaning of solar panels from snow, dust and other precipitations. Today there is a search for renewable energy sources in all directions; the most non-significant options are being considered, such as, for example, the thermal energy of the oceans. "Warm-ocean" power plant would generate energy from the temperature difference between surface warm water and benthic cold water. This paper considers a method of energy generation using the temperature difference between day and night. In any point of the globe, the temperature during the day is always higher than at night. This temperature difference can be from 3 and up to 12, 15 and more degrees, for example, in Urengoy in winter it can reach 60 °C. The same thing happens on other planets, especially on Mars. There the temperature difference between day and night is about 60...80 °C, because Mars has no atmosphere.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, перепад температур, преобразователь энергии, разность температур, конденсатор, диэлектрическая проницаемость, источник питания.

Key words: renewable energy, temperature difference, energy converter, temperature difference, capacitor, dielectric constant, power supply.

УДК 621.362

Введение. В работах [1–3] рассмотрены методы работы, физические принципы способа получения энергии от перепада температур день-ночь и его технологии. Как известно, если конденсатор зарядить до некоторого напряжения, отключить от источника питания, затем с помощью дополнительной энергии уменьшить ёмкость, то вследствие постоянного заряда на ёмкости напряжение пропорционально вырастет. Другими словами, потенциальная энергия заряда вырастет за счёт притока этой дополнительной энергии.

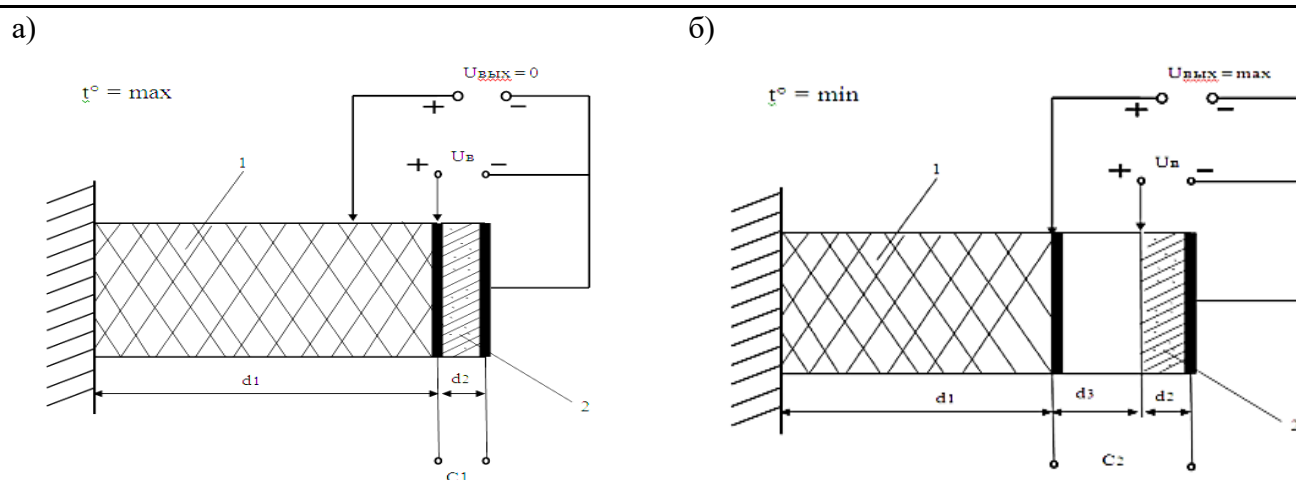
Физико-технические основы работы такого преобразователя энергии на основе перепада температур сводятся к следующему. Если зарядить конденсатор и отключить его от источника питания, то заряд на нём остаётся постоянным. Увеличивая расстояние между пластинами за счёт внешних сил, получим прибавку энергии в виде роста напряжения. Общая схема такого преобразователя ёмкостного типа показана на рис. 1.

При высокой температуре брусок увеличивает свою длину и плотно прижимает подвижную пластину к диэлектрику, ёмкость будет максимальной. В этом состоянии конденсатор заряжается до напряжения возбуждения (см. рис. 1, а). При понижении температуры брусок уменьшает свои линейные размеры и отодвигает подвижную пластину, создавая зазор между ней и диэлектриком (см. рис. 1, б). В этом случае ёмкость устройства скачком падает вследствие появления воздушного зазора, а напряжение вырастает до максимума и разряжается на нагрузку. Далее процесс повторяется.

В данной работе ставилась задача экспериментально подтвердить преобразование энергии с помощью перепада температур между днём и ночью на примере ёмкости с двумя пластинами.

Соберём конденсатор из 2 односторонних фольгированных текстолитов. В качестве диэлектрика между ними будем использовать лист бумаги (см. рис. 2). Для эксперимента бралось два листа фольгированного стеклотекстолита размером примерно 200×200 мм. Между пластинами прокладывался бумажный лист с диэлектрической проницаемостью, равной приблизительно единице.

Пластины конденсатора сначала заряжались от источника питания, затем источник питания отключался. Для этого конденсатор подключался к АЦП микроконтроллера Arduino и заряжался до 3.3 В. Для более плотного прилегания пластин друг к другу и уменьшения расстояния между пластинами сверху на пластины помещался значительный груз. Вид графика напряжения на конденсаторе показан на рис. 3.



1 – диэлектрик, изменяющий свой линейный размер при изменении температуры; 2 – диэлектрик с большим значением диэлектрической проницаемости; C_1 – ёмкость, имеющая максимальное значение при зарядке от напряжения возбуждения; C_2 – ёмкость, имеющая минимальное значение при разрядке на нагрузку

Рис. 1. Схемы преобразователя ёмкостного типа при максимальной (а) и минимальной (б) внешней температуре (днём и ночью)

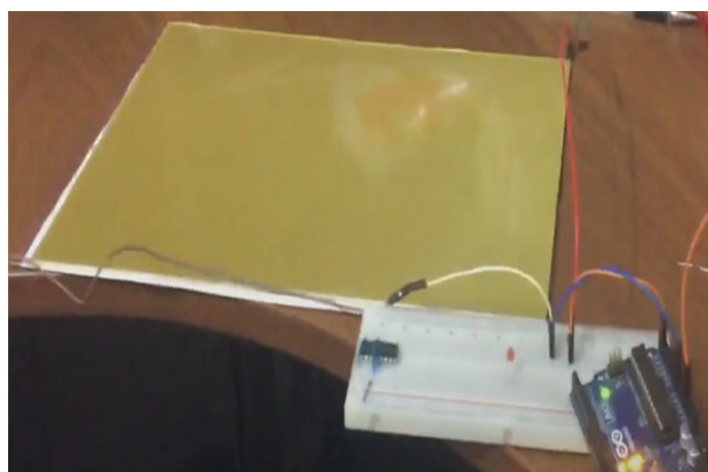


Рис. 2. Два листа из односторонних фольгированных текстолитов

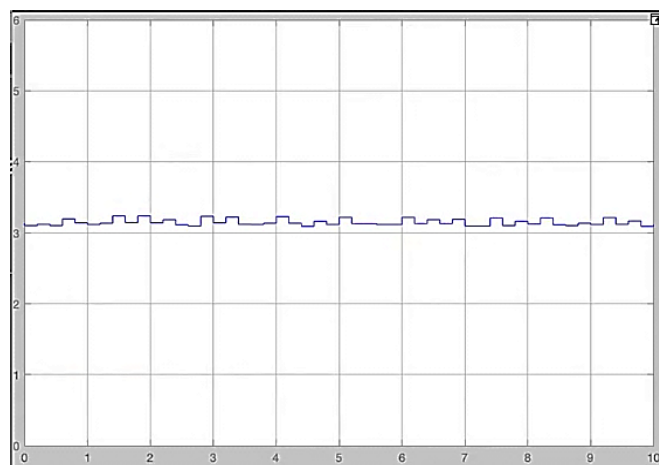


Рис. 3. График значения напряжения на ёмкости после заряда

Как видно из рис. 3, напряжение стабильно на уровне 3 В.

После зарядки источник питания отключался и груз снимался. Ёмкость при этом падала. Поскольку ёмкость была отключена от питания, а заряд оставался постоянный, то при уменьшении ёмкости напряжение возрастало (см. рис. 4).

Напряжение во время разряда конденсатора на АЦП фиксировалось с помощью осциллографа. На рис. 4 видно, как подскакивает напряжение на конденсаторе.



Рис. 4. Скачок напряжения на ёмкости при её уменьшении

Предел измерения для этого микроконтроллера составляет 5 В, хотя напряжение может возрасть сильнее.

Рассмотрим работу конденсатора в таком режиме, при котором его заряд будет происходить с меньшим расстоянием между обкладками, чем его разряд. Ёмкость конденсатора и его напряжение зависят от расстояния между обкладками:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l},$$

$$U_C = U \frac{d_2}{d_1} \exp\left(\frac{-t}{RC}\right),$$

где S – площадь пластин ёмкости, м^2 ; ε – диэлектрическая проницаемость материала между пластинами; ε_0 – диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Ток I_c будет зависеть от значения накопленного ёмкостью заряда, т. е.

$$I_1 = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C_1 U_1)}{dt},$$

где Q – заряд, накопленный ёмкостью при её зарядке источником возбуждения; C_1 – ёмкость устройства при заряде; U_1 – напряжение источника возбуждения.

Напряжение на выходе ёмкости после срабатывания одного цикла устройства U_2 будет равно напряжению возбуждения U_1 , умноженному на величину изменения ёмкости устройства.

Построим график напряжения, изменяя τ от 0 до 0,14, $R = 10$ МОм, $E = 1$, $d_1 = 0,1$ мм, $d_2 = 0,66$ мм (см. рис. 5).

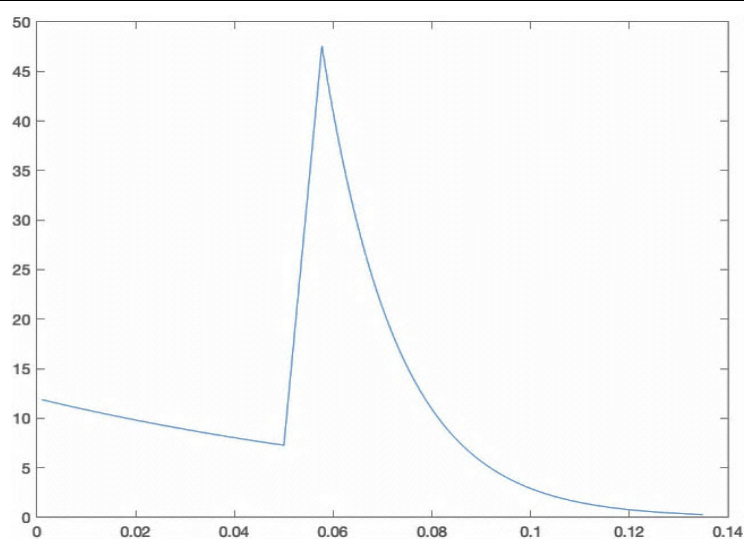


Рис. 5. Напряжение разряда конденсатора на резистор

В момент времени 0,05 с мы увеличиваем расстояние между обкладками для повышения напряжения. Вид тока получим следующий (см. рис. 6).

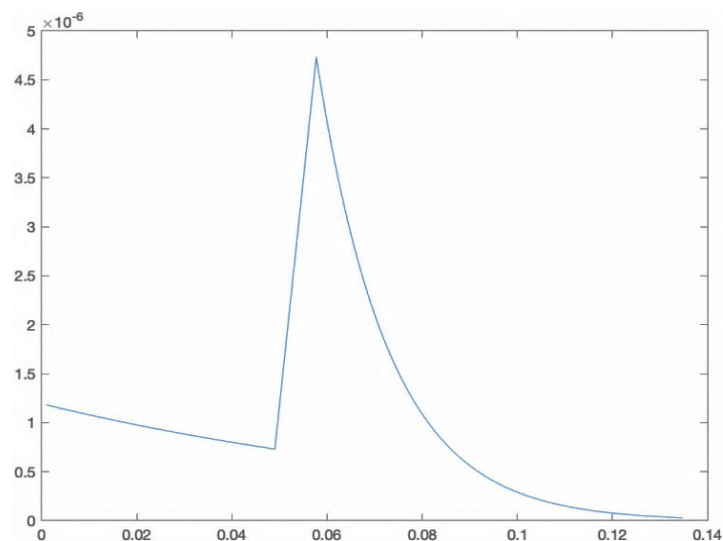


Рис. 6. Ток разряда конденсатора на резистор

Смоделируем работу конденсатора с раздвигающимися обкладками в пакете прикладных математических программ Matlab Simulink. Описать поведение нового физического объекта на основе этих уравнений можно на языке Simscape и подключить его через элемент «Simscape Component». Для изучения его поведения соберём схему с такими же параметрами, которые использовались выше (см. рис. 7).

Здесь Step1 – источник сигнала, который представляет собой прямоугольный импульс длительностью 3 с. Этот сигнал используется для управления ключами Switch1 и Switch2. Чтобы эти ключи открывались в разное время, сигнал для Switch2 инвертируется с помощью логического элемента. Элемент distance изменяет расстояние между обкладками на конденсаторе. Это подсистема, которая содержит стандартный элемент Signal Builder. Напряжение на конденсаторе фиксировалось также на осциллографе (см. рис. 8).

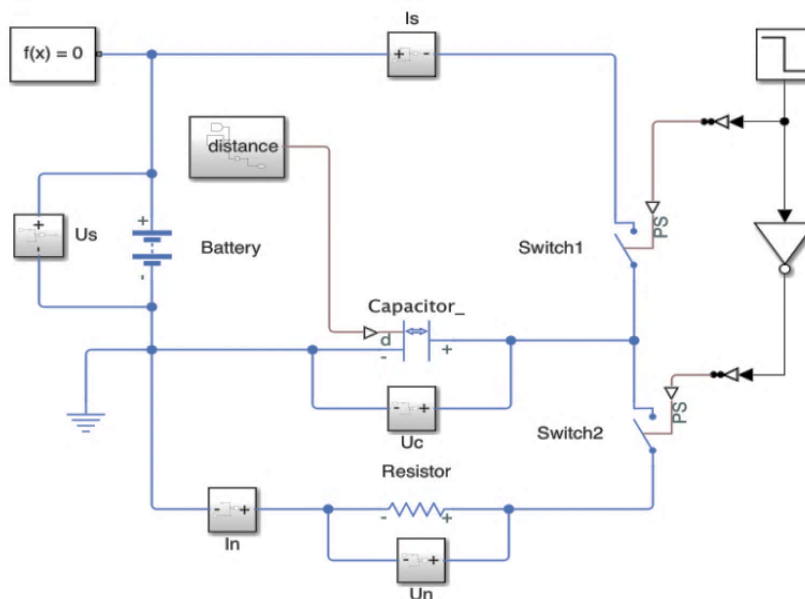


Рис. 7. Модель Simulink с использованием конденсатора с изменяемым расстоянием между его пластинами

Рассмотрим энергию, которая затрачивается на заряд и разряд этого конденсатора, причём заряжать мы его будем с расстоянием между обкладкам d_1 , а разряжать – с расстоянием d_2 . Интеграл от мгновенной мощности за промежуток времени равен полной переданной энергии за это время:

$$W = \int_0^T P(t) dt.$$

Единицы измерения. В Международной системе единиц (СИ) единицей измерения мощности является ватт, равный одному джоулю, делённому на секунду.

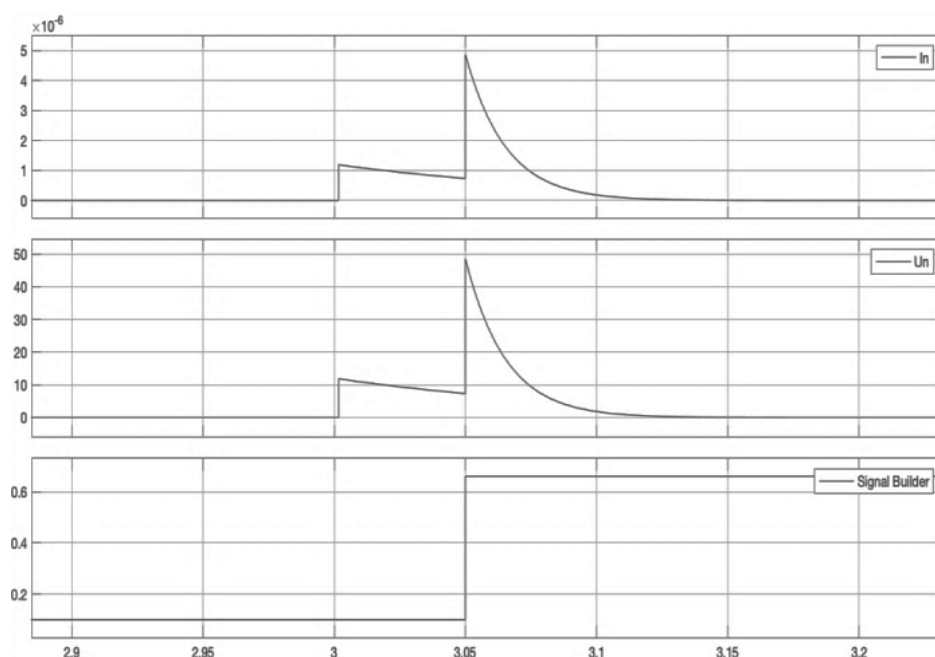


Рис. 8. Напряжение на конденсаторе в модели Simulink

В Matlab Simulink, используя стандартную библиотеку «Specialized Power Systems», можно с помощью элемента «power measurement» получить мощность. Далее проинтегрировав её стандартным элементом, получаем энергию. Схема для подсчёта энергии показана на рис. 9.

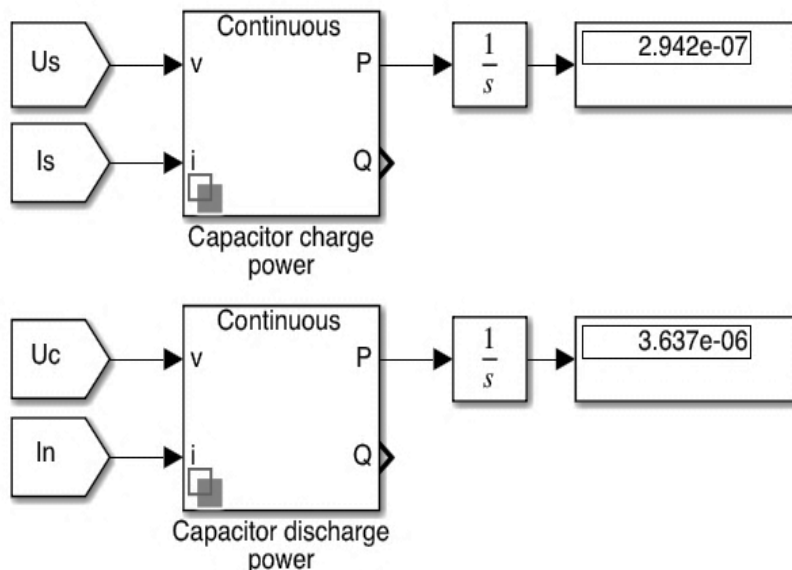


Рис. 9. Измерение энергии заряда и разряда конденсатора в модели Simulink

Видно, что высвобождаемая энергия конденсатора больше, чем та энергия, которая тратится на его заряд.

Применение такого устройства для получения энергии от перепада температур между днём и ночью возможно в автономной гибридной электротехнической системе, где используются солнечная энергия, энергия ветра. Недостатком таких систем является сильная зависимость от погодных условий, что снижает надёжность электроснабжения. Поэтому если такие автономные гибридные электротехнические системы снабдить преобразователем энергии на основе перепада температур, то это повысит надёжность работы гибридного комплекса. Возможность получения энергии с помощью использования суточного перепада температур отличается стабильностью, т. к. перепад температур в течение суток всегда есть в любой точке земного шара.

Блок-схема такого гибридного комплекса с шиной постоянного тока показана на рис. 10.

Проблема. При разработке систем управления автономного комплекса электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии с устройством перепада температур приходится сталкиваться с проблемой подбора электрической прочности диэлектрика между пластинами конденсатора: при срабатывании преобразователя напряжение на выходе будет больше напряжения зарядки в несколько раз. Это создаёт проблему электрической прочности промежутка воздушного зазора и ограничивает значение диэлектрической проницаемости диэлектрика.

Решение. Для подбора значения электрической прочности необходимо вначале рассчитать выходное напряжение.

Заряд Q на ёмкости можно выразить через ёмкость C_1 и напряжение V_1 :

$$Q = C_1 V_1,$$

где C_1 – ёмкость в начальном состоянии, V_1 – напряжение возбуждения.

При появлении воздушного зазора между пластинами конденсатора имеем

$$Q = C_2 V_2,$$

где C_2 – ёмкость с зазором, V_2 – напряжение выхода. Отсюда

$$V_2 = Q/C_2.$$



ВЭУ – ветрогенератор; СП – солнечные панели; СПТ – система перепада температур; АГП – бензиновый агрегат питания; СУ – система управления; КНТ – контроллеры управления; АКБ – аккумуляторные батареи; ИНВ – инверторы; ТР – трансформатор; НГ – нагрузка

Рис. 10. Упрощённая модель автономного комплекса электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии с устройством перепада температур и шиной постоянного тока

Так как заряд постоянный и не меняется, $Q = \text{const}$, то тогда получим, что

$$C_2 \ll C_1, \quad V_2 \gg V_1.$$

Если C_2 уменьшается в n раз, то напряжение выхода будет $n \cdot V_1$.

Электрическая прочность материала между пластинами конденсатора рассчитывается из условия

$$nV_1 < V_{\text{пр}},$$

где $V_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя диэлектрика, помещённого между пластинами конденсатора.

Для автоматизации расчёта была создана программа, алгоритм которой показан на рис. 11.

Программа работает следующим образом. Вначале вводятся геометрические параметры ёмкости и её относительная диэлектрическая проницаемость. После того как все эти данные будут введены, программа переходит к выбору среды: воздух, масло или газ.

Если выбран воздух, то водится условие эксплуатации системы, затем электрическая прочность из условий, заданных по воздуху. После этого программа рассчитывает ёмкость и вводит параметры зазора. Программа рассчитывает уже вторую ёмкость после изменения соотношения первичной ёмкости к вторичной. Как только значение получено, программа начинает рассчитывать напряжение возбуждения, после расчёта напряжение возбуждения получается с учётом найденного коэффициента напряжения на выходе.

Затем программа сравнивает напряжение на выходе и напряжение диэлектрической прочности. Если они не совпадают, то программа отдаёт указания на изменение каких-то параметров; если совпадают, то даётся команда на переход к расчёту материала активного диэлектрика.

В дальнейшем, если, допустим, выбран газ, программа повторяет почти все те же операции, которые выбраны для воздуха.

Если выбрано масло, то вначале выбирается значение напряжения пробоя, и в дальнейшем проводится тот же расчёт.

Данная разработанная программа зарегистрирована как программа для ЭВМ под номером RU 2023612776.

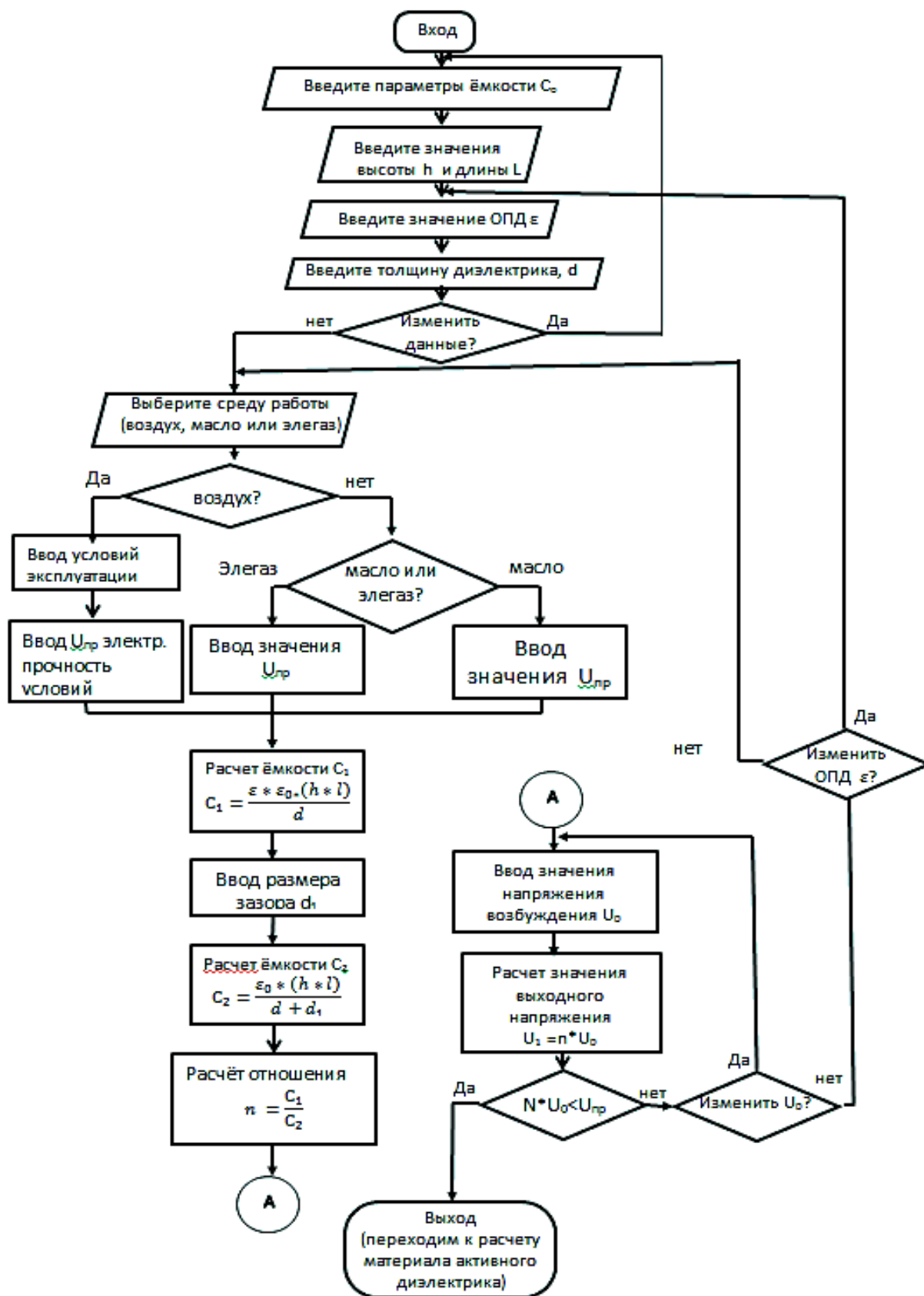


Рис. 11. Алгоритм подбора напряжения зарядки и электрической прочности диэлектрика между пластинами конденсатора



Вывод. Можно заметить, что способ получения энергии с помощью перепада температур или изменения ёмкости между пластинами конденсатора вполне реален и может применяться в более широких масштабах. В данном случае прибавка энергии получается за счёт изменения температуры и её воздействия на физические тела, в частности за счёт изменения линейных размеров любого физического тела при уменьшении или увлечении температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Челухин, В. А. Электротепловой преобразователь низкопотенциальной энергии перепада температур / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон // Вестник ТОГУ. – 2014. – № 4 (35). – С. 93-98.
2. Челухин, В. А. Об электроснабжении возможных поселений на Марсе / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон // Электричество. – 2016. – № 5. – С. 45-52.
3. Челухин, В. А. К вопросу создания общей классификации электрических машин / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 46-53.
4. Челухин, В. А. Оценка эффективности использования перепада температур день-ночь для целей энергетики / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон, М. С. Кружаев // Промышленная энергетика. – 2018. – № 6. – С. 45-49.
5. Математическое моделирование процесса получения энергии при использовании перепада температур день-ночь на основе нейронных сетей и искусственного интеллекта / В. А. Челухин, М. А. Кружаев, Пьей Зон Аунг, Е. В. Абрамсон // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 18-24.
6. Челухин, В. А. Теоретическая оценка величины отклонения разности между минимальным и максимальным значениями температуры окружающей среды / В. А. Челухин, М. А. Кружаев, Пьей Зон Аунг, Е. В. Абрамсон // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 81-92.
7. Преобразователь энергии суточного перепада температур для энергоснабжения удалённых сельскохозяйственных объектов / Е. В. Абрамсон, Пьей Зон Аунг, В. А. Челухин и др. // Электротехнологии и электрооборудование АПК. – 2022. – Т. 69. – № 2 (47). – С. 54-58.
8. Разработка схем автономного гибридного электротехнического комплекса на основе возобновляемых источников энергии с системой перепада температур для электроснабжения удалённых сельскохозяйственных объектов / Е. В. Абрамсон, Пьей Зон Аунг, В. А. Челухин и др. // Электротехнологии и электрооборудование АПК. – 2022. – Т. 69. – № 4 (49). – С. 93-97.
9. Челухин, В. А. Применение «умных» материалов для решения вопроса эффективности преобразователя перепада температур / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон, М. С. Кружаев // Инновации в науке. – 2017. – № 13 (74). – С. 34-38.
10. Патент № 2557066 Российская Федерация, МПК H02M 3/04 (2006.01). Преобразователь энергии перепада температур с электронным управлением: № 2014112479/07: заявлено 31.03.2014: опубликовано 20.07.2015 / Челухин В. А., Челухин И. В., Абрамсон Е. В.; заявитель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ». – 6 с.
11. Патент № 2564994 Российская Федерация, МПК H02N 11/00 (2006.01), H02M 3/04 (2006.01). Низкопотенциальный преобразователь энергии перепада температур с элегазом: № 2014112477/07: заявлено 31.03.2014: опубликовано 10.10.2015 / Челухин В. А., Абрамсон Е. В. – 6 с.

Черный С. П., Хрульков В. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСОСТАВНЫМ ТРАЛОВЫМ МЕХАНИЗМОМ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА СЛОЖЕНИЯ

Черный С. П., Хрульков В. Н.

S. P. Cherniy, V. N. Khrulkov

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСОСТАВНЫМ ТРАЛОВЫМ МЕХАНИЗМОМ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА СЛОЖЕНИЯ

MODELING OF MULTI-CASCADE FUZZY LOGIC REGULATOR FOR CONTROL OF MULTICOMPONENT TRAWL GEAR BASED ON ADDITION OPERATOR

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: kepapu@knastu.ru.

Sergei P. Cherniy – PhD 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: kepapu@knastu.ru.

Хрульков Владимир Николаевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Vladimir N. Khrulkov – Postgraduate, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. В работе рассматривается синтез нечёткого логического регулятора внешнего каскада одной четвёртой системы управления комбинированного тралового механизма для перемещения высокотоннажных крупногабаритных объектов, получающего информацию от гироскопического датчика об отклонении платформы от горизонтального положения на определённый угол. Сгенерированный сигнал от внешнего регулятора передаётся на интеллектуальные модули внутреннего каскада, которые управляют положением золотника пропорционального гидравлического распределителя. Представленный подход, учитывающий сгенерированную информацию с внешнего каскада и передающий синтезированный сигнал управления на внутренний каскад нечёткого логического регулятора, позволяет в условиях недетерминированных возмущающих воздействиях плавно регулировать перемещение гидравлического привода, стабилизируя транспортную платформу в пространстве, и уменьшает возможность возникновения гидроудара в гидравлической системе. Приведены графики переходных процессов в гидроприводах с различными формами возмущающих воздействий на объект управления.

Summary. The paper discusses the synthesis of a fuzzy logic controller of the external cascade of one fourth of the control system of a combined trawl mechanism for moving high-tonnage large-sized objects, receiving information from a gyroscopic sensor about the deviation of the platform from a horizontal position at a certain angle. The generated signal from the external controller is transmitted to the intelligent modules of the internal cascade, which control the position of the proportional hydraulic valve spool. The presented approach, which takes into account the generated information from the external cascade and transmits a synthesized control signal to the internal cascade of the fuzzy logic controller, allows, under conditions of non-deterministic disturbing influences, to smoothly regulate the movement of the hydraulic drive, stabilize the transport platform in space and reduce the possibility of water hammer occurring in the hydraulic system. Graphs of transient processes in hydraulic drives with various forms of disturbing influences on the control object are presented.

Ключевые слова: нечёткий логический регулятор, терм-множество, нечёткое множество, лингвистическая переменная, интеллектуальная система управления.

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

УДК 681.5.01:658.5

Ввиду сложности функционирования системы управления высокотоннажного модульного трала использовать классические методы настройки системы для стабилизации перемещаемого груза не представляется возможным, т. к. объект управления действует в условиях недетермини-

рованных нагрузок. Применение интеллектуального подхода, основанного на аппарате нечёткой логики, позволяет на основе экспертных знаний добиться необходимого функционирования системы управления. Использование многокаскадного способа нечёткого вывода является одним из направлений развития нечётких систем управления. Реализация принципов многокаскадности позволяет повысить интеллектуальную составляющую системы, что положительно скажется на расширении диапазона применения нечётких систем управления.

Нечёткий логический регулятор внешнего каскада гидравлической передвижной платформы, управляющий внутренними интеллектуальными модулями, осуществляющий контроль над положением пропорциональных гидравлических распределителей, реализован следующим образом:

1. Нечёткий логический регулятор, формирующий уставки внутренних модулей за счёт суммирования значений сигналов управления.

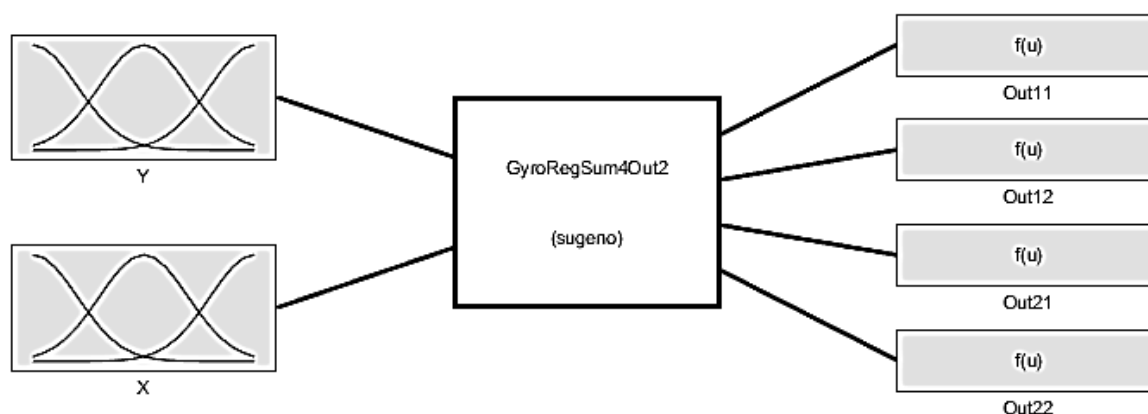


Рис. 1. Нечёткий модуль управления, формирующий уставки внутренних модулей за счёт суммирования значений сигналов управления

2. Настройка нечёткого логического регулятора с алгоритмом вывода Такаги – Сугено для управления гидравлической системой многосоставного тралового механизма, формирующего уставки внутренних модулей за счёт суммирования значений сигналов управления, представлена на рис. 1 – 3. Входные лингвистические переменные «X» и «Y» имеют треугольную функцию принадлежности и состоят из пяти элементов терм-множеств, определяющих горизонтальное отклонение транспортировочного аппарата. Выходные переменные представляют константы – сигнал управления на модули внутреннего каскада.

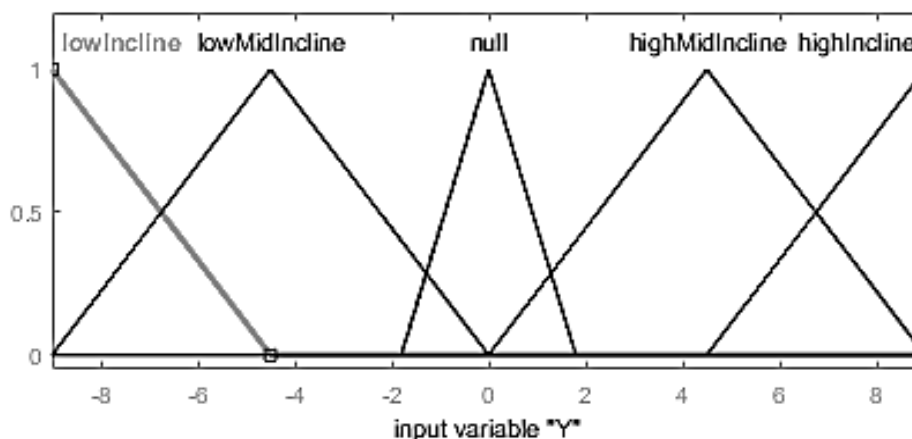


Рис. 2. Входная лингвистическая переменная «Y»

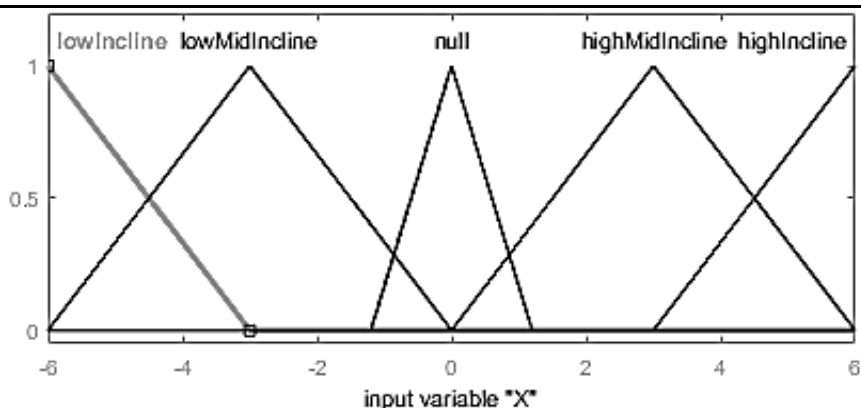


Рис. 3. Входная лингвистическая переменная «X»

База знаний нечёткого логического регулятора внешнего каскада состоит из 25 правил и имеет следующую форму представления:

1. If (Y is null) и (X is null) then (Out11 = 0) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = 0);
2. If (Y is low_Incline) and (X is null) then (Out11 = -0,25) (Out12 = 0) (Out21 = -0,25) (Out22 = 0);
3. If (Y is low_MidIncline) and (X is null) then (Out11 = -0,125) (Out12 = 0) (Out21 = -0,125) (Out22 = 0);
4. If (Y is high_MidIncline) and (X is null) then (Out11 = 0) (Out12 = -0,125) (Out21 = 0) (Out22 = -0,125);
5. If (Y is high_Incline) and (X is null) then (Out11 = 0) (Out12 = -0,25) (Out21 = 0) (Out22 = -0,25);
6. If (Y is null) and (X is low_Incline) then (Out11 = -0,25) (Out12 = -0,25) (Out21 = 0) (Out22 = 0);
7. If (Y is null) and (X is low_MidIncline) then (Out11 = -0,125) (Out12 = -0,125) (Out21 = 0) (Out22 = 0);
8. If (Y is null) and (X is highMidIncline) then (Out11 = 0) (Out12 = 0) (Out21 = -0,125) (Out22 = -0,125);
9. If (Y is null) and (X is high_Incline) then (Out11 = 0) (Out12 = 0) (Out21 = -0,25) (Out22 = -0,25);
10. If (Y is high_Incline) and (X is high_Incline) then (Out11 = 0,25) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = -0,25);
11. If (Y is high_Incline) and (X is high_MidIncline) then (Out11 = 0,25) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = -0,25);
12. If (Y is high_MidIncline) and (X is high_Incline) then (Out11 = 0,25) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = -0,25);
13. If (Y is high_MidIncline) and (X is high_MidIncline) then (Out11 = 0,125) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = -0,125);
14. If (Y is high_Incline) and (X is low_Incline) then (Out11 = 0) (Out12 = -0,25) (Out21 = 0,25) (Out22 = 0);
15. If (Y is high_MidIncline) and (X is low_Incline) then (Out11 = 0) (Out12 = -0,25) (Out21 = 0,25) (Out22 = 0);
16. If (Y is high_Incline) and (X is low_MidIncline) then (Out11 = 0) (Out12 = -0,25) (Out21 = 0,25) (Out22 = 0);
17. If (Y is high_MidIncline) and (X is low_MidIncline) then (Out11 = 0) (Out12 = -0,125) (Out21 = 0,125) (Out22 = 0);
18. If (Y is low_Incline) and (X is high_Incline) then (Out11 = 0) (Out12 = 0,25) (Out21 = -0,25) (Out22 = 0);

19. If (Y is low_MidIncline) and (X is high_Incline) then (Out11 = 0) (Out12 = 0,25) (Out21 = -0,25) (Out22 = 0);
20. If (Y is low_Incline) and (X is high_MidIncline) then (Out11 = 0) (Out12 = 0,25) (Out21 = -0,25) (Out22 = 0);
21. If (Y is low_MidIncline) and (X is high_MidIncline) then (Out11 = 0) (Out12 = 0,125) (Out21 = -0,125) (Out22 = 0);
22. If (Y is low_Incline) and (X is low_Incline) then (Out11 = -0,25) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = 0,25);
23. If (Y is low_MidIncline) and (X is low_Incline) then (Out11 = -0,25) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = 0,25);
24. If (Y is low_Incline) and (X is low_MidIncline) then (Out11 = -0,25) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = 0,25);
25. If (Y is low_MidIncline) и (X is low_MidIncline) then (Out11 = -0,125) (Out12 = 0) (Out21 = 0) (Out22 = 0,125).

На рис. 4 представлен график переходного процесса в гидроприводах с использованием нечётким модулем управления внешнего каскада, формирующего уставки внутренних модулей за счёт суммирования значений сигналов управления.

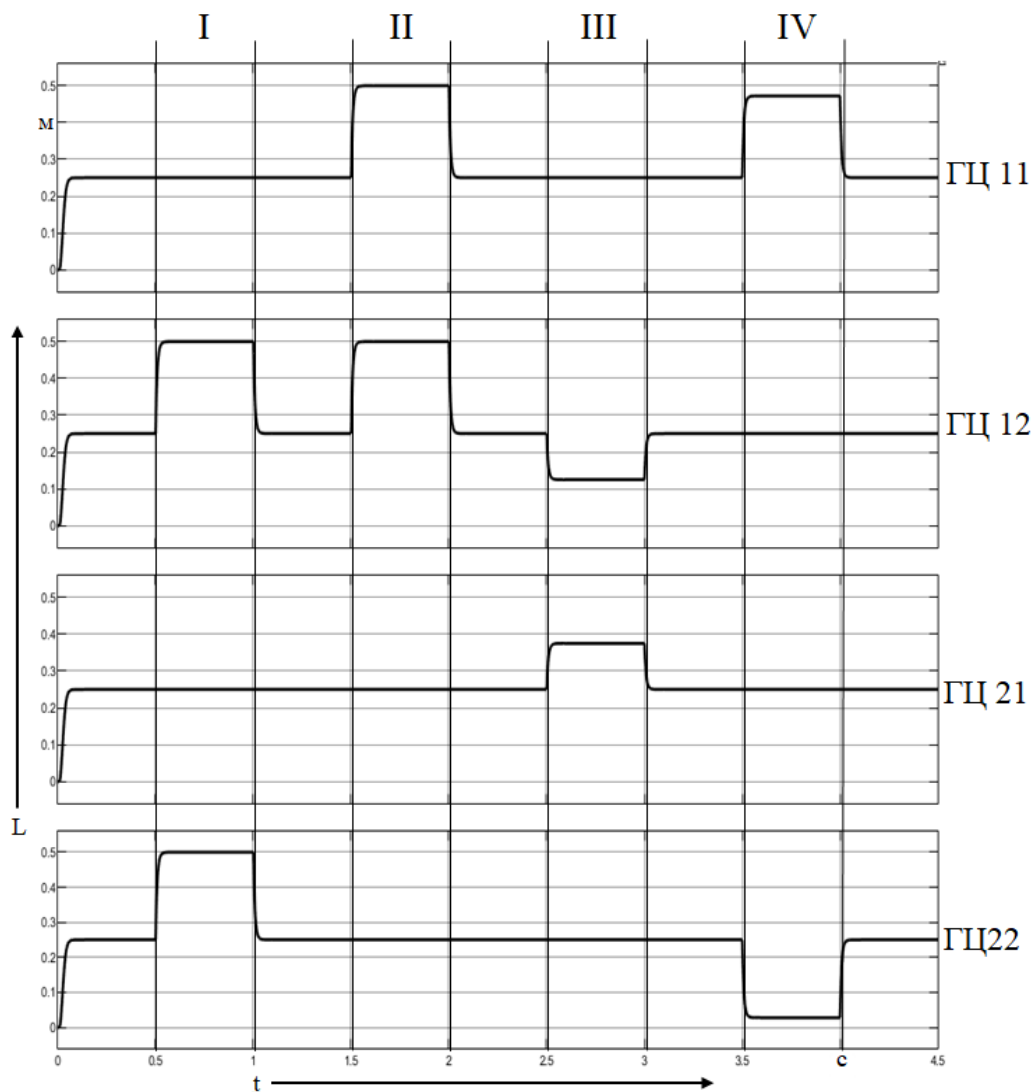


Рис. 4. Графики переходных процессов в гидроприводах при воздействии на систему ступенчатым возмущающим воздействием

Графики переходных процессов в гидроприводах при подаче на систему возмущающих воздействий в виде синусоидального сигнала и синусоидального сигнала с белым шумом, что позволит смоделировать неровность дорожного покрытия, а также локальные экстремумы представлены на рис. 5 и 6.

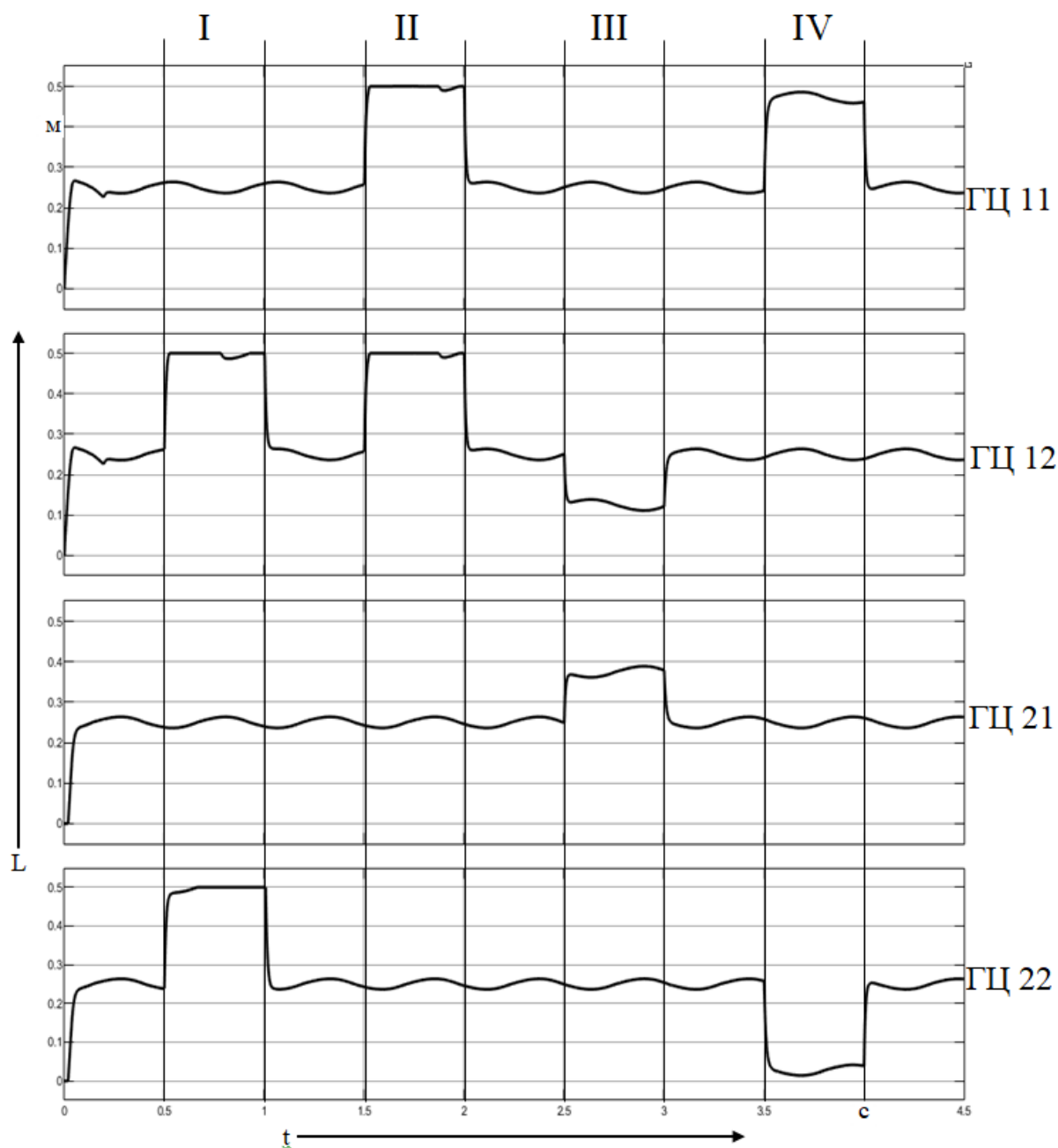


Рис. 5. Графики переходного процесса в гидроцилиндрах при воздействии на систему ступенчатым и синусоидальным возмущающим воздействием

На рис. 7 представлен график переходного процесса в гидроприводах с использованием нечётким модулем управления внешнего каскада, формирующего уставки внутренних модулей за счёт суммирования значений сигналов управления при подаче на систему синусоидального сигнала с белым шумом, имитирующего неровность дорожного покрытия.

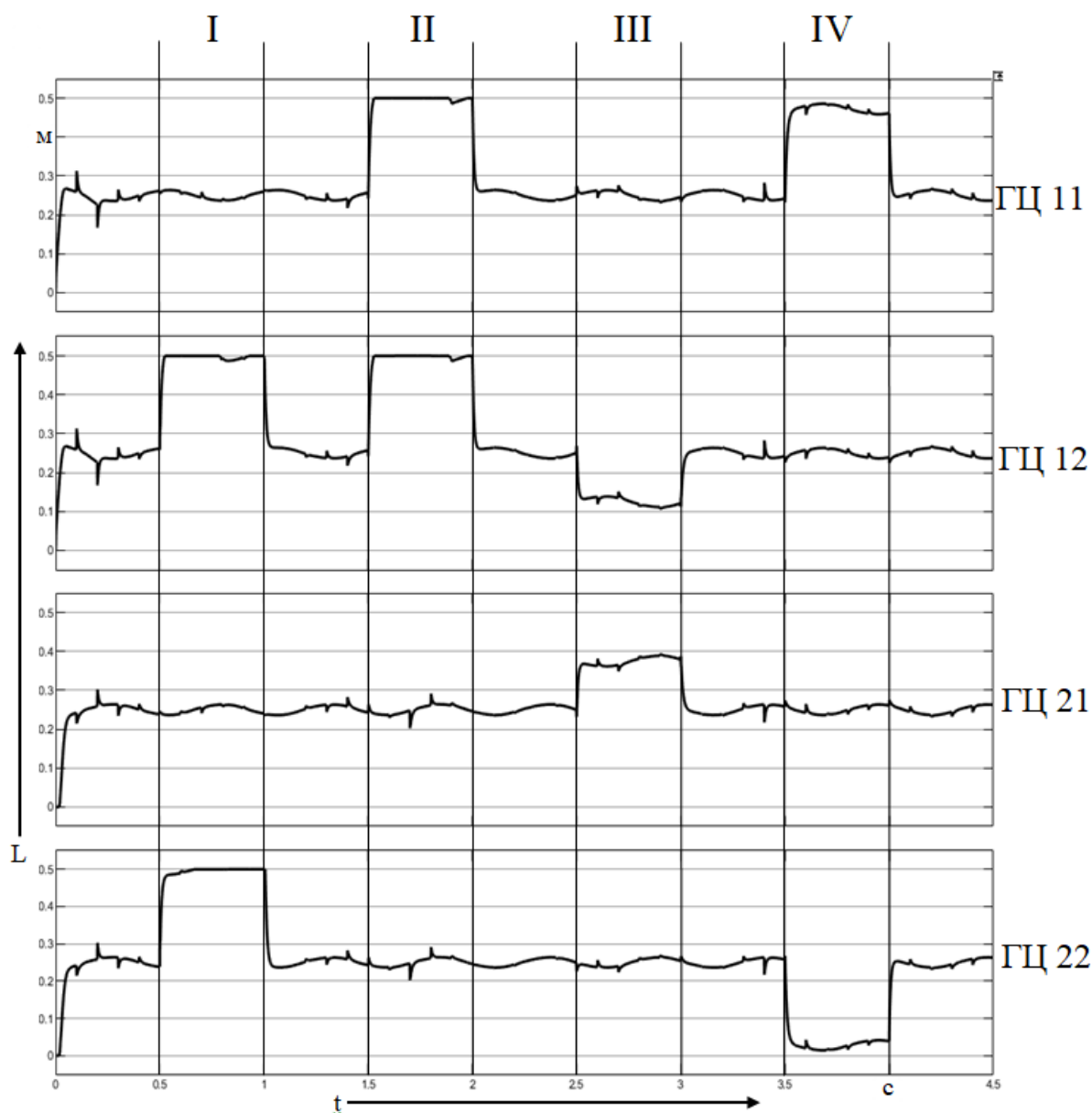


Рис. 6. Графики переходного процесса в гидроцилиндрах при воздействии на систему ступенчатым и синусоидальным возмущающим воздействием с белым шумом

Рассмотрим графики переходных процессов в гидроцилиндрах после работы нечёткого логического регулятора внешнего каскада:

1. Временной период I (время с 0,5 до 1 с): на вход нечёткого логического регулятора поступают сигналы от гироскопического датчика, представленного в виде ступенчатой функции, со следующими показателями: $X = 0^\circ$, $Y = +9^\circ$, указывающими на отклонение платформы от горизонтального положения на определённый угол. Данные датчика представляются интеллектуальной системой как «появление крена на транспортировочном аппарате относительно оси Y ». Реагируя на полученные от гироскопического датчика значения, интеллектуальная система синтезирует управляющее выходное воздействие для внутреннего интеллектуального модуля, отвечающего за работу пропорциональных гидравлических распределителей, выдвигая гидропривода 12 и 22 (см. рис. 7), которые корректируют положение транспортного аппарата в пространстве.

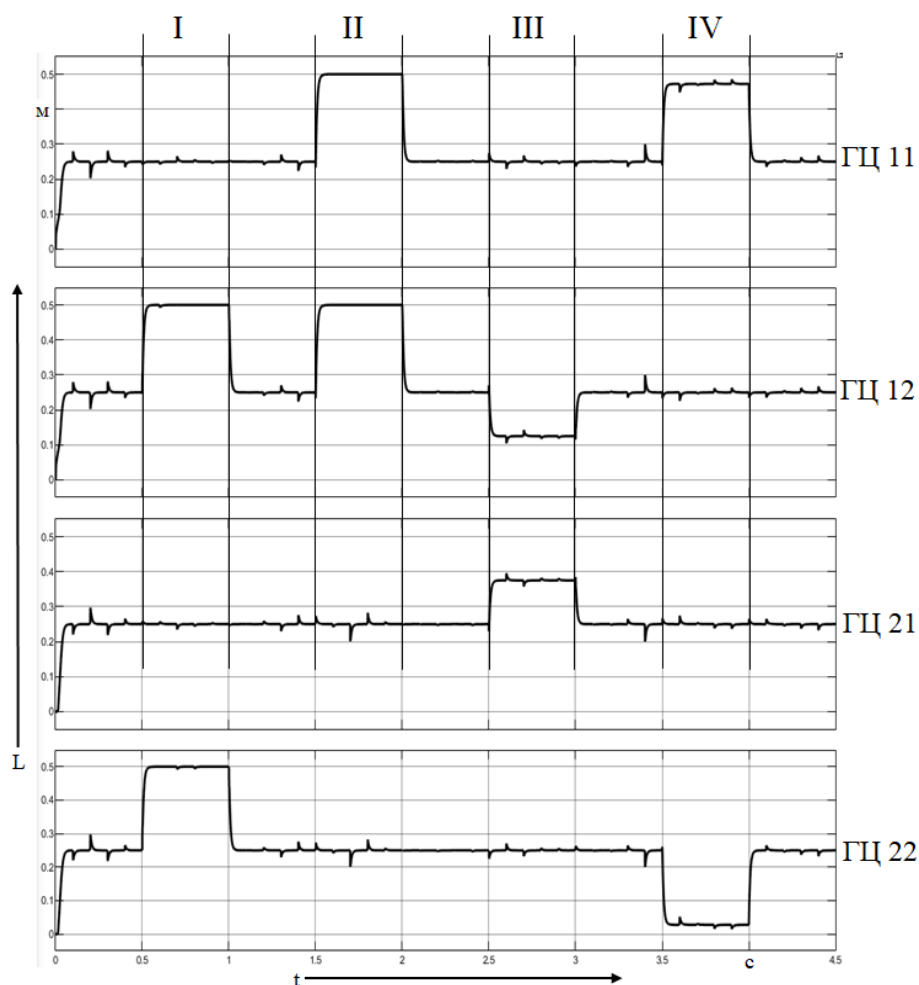


Рис. 7. Графики переходного процесса в гидроцилиндрах при воздействии на систему сигналом в виде белого шума

2. Временной период II (время с 1,5 до 2 с): на вход нечёткого логического регулятора поступают сигналы от гироскопического датчика, представленного в виде ступенчатой функции, со следующими показателями: $X = -6^\circ$, $Y = 0^\circ$, указывающими на отклонение платформы от горизонтального положения на определённый угол. Данные датчика представляются интеллектуальной системой как «появление крена на транспортировочном аппарате относительно оси X ». Реагируя на полученные от гироскопического датчика значения, интеллектуальная система синтезирует управляющее выходное воздействие для внутреннего интеллектуального модуля, отвечающего за работу пропорциональных гидравлических распределителей, выдвигая гидропривод 11 и 12 (см. рис. 7), которые корректируют положение транспортного аппарата в пространстве.

3. Временной период III (время с 2,5 до 3 с): на вход нечёткого логического регулятора поступают сигналы от гироскопического датчика, представленного в виде ступенчатой функции, со следующими показателями: $X = +3^\circ$, $Y = -4,5^\circ$, указывающими на отклонение платформы от горизонтального положения на определённый угол. Данные датчика представляются интеллектуальной системой как «появление крена на транспортировочном аппарате относительно оси X и Y ». Реагируя на полученные от гироскопического датчика значения, интеллектуальная система синтезирует управляющее выходное воздействие для внутреннего интеллектуального модуля, отвечающего за работу пропорциональных гидравлических распределителей, выдвигая гидропривод 21 и втягивая гидропривод 12 (см. рис. 7), корректируя положение транспортного аппарата в пространстве.



4. Временной период IV (время с 3,5 до 4 с): на вход нечёткого логического регулятора поступают сигналы от гироскопического датчика, представленного в виде ступенчатой функции со следующими показателями: $X = -5^\circ$, $Y = -6^\circ$, указывающими на отклонение платформы от горизонтального положения на определённый угол. Данные датчика представляются интеллектуальной системой как «появление крена на транспортировочном аппарате относительно оси X и Y ». Реагируя на полученные от гироскопического датчика значения, интеллектуальная система синтезирует управляющее выходное воздействие для внутреннего интеллектуального модуля, отвечающего за работу пропорциональных гидравлических распределителей, выдвигая гидропривод 11 и втягивая гидропривод 22 (см. рис. 7), корректируя положение транспортного аппарата в пространстве.

Анализируя модели предложенных многокаскадных регуляторов с различными операторами при сопряжении каскадов, можно сделать вывод, что применение функции суммирования позволяет реализовать необходимые законы управления с более высокой точностью, адаптивностью к ряду внешних возмущающих факторов, а также с упрощённой понятийной составляющей при настройке интеллектуальной системы. Кроме того, можно отметить, что качество настройки развитой интеллектуальной системы управления в меньшей степени зависит от выбора сочетания механизмов выводов и скорее продиктовано особенностями функционирования самого объекта регулирования. Предложенный подход к реализации модели развитой нечёткой системы управления гидравлической системой высокотоннажного модульного трала представляет собой нижний локальный уровень. Дальнейшее развитие такой системы будет направлено на реализацию процедур позиционирования и стабилизации всех четырёх платформ под управлением иерархически верхнего уровня системы, реализующей набор метапроцедур на основе дополнительного надстроенного каскада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шмитт, А. Учебный курс гидравлики: пособие по гидравлике / А. Шмитт. – Лор-на-Майне: Германия, 2012. – 226 с.
2. Руппель, А. А. Моделирование гидравлических систем в MATLAB: учеб. пособие / А. А. Руппель, А. А. Сагандыков, М. С. Корытов. – Омск: Федеральное агентство по образованию ГОУ ВПО «СибАДИ», 2009. – 174 с.
3. Кингсеп, А. С. Основы физики. Курс общей физики: учеб. В 2 т. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика / А. С. Кингсеп, Г. Р. Локшин, О. А. Ольхов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 560 с.
4. Стельмашук, С. В. Работа рулевого привода в следящем и позиционном режиме / С. В. Стельмашук // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (5). – С. 73-79.
5. Хрульков, В. Н. Один из подходов к моделированию процесса стабилизации высокотоннажной платформы / В. Н. Хрульков, С. П. Черный, А. В. Охотников // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., г. Комсомольск-на-Амуре, 6-11 декабря 2021 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. – С. 100-103.
6. Черный, С. П. Моделирование развитой нечёткой системы управления с интеграцией внутренних модулей на основе оператора умножения / С. П. Черный, А. В. Охотников // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 102-108.

Табаров Б. Д., Соловьев В. А.
B. D. Tabarov, V. A. Solovyev

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕМИСТУПЕНЧАТОГО КОМПЕНСАТОРА
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ**

**CONTROL STUDY OF A SEVEN-STAGE REACTIVE POWER COMPENSATOR UNDER
DISCRETE REACTIVE POWER CONTROL**

Табаров Бехруз Довудходжаевич – кандидат технических наук, доцент 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: behruz.tabarov@mail.ru.

Bekhruz D. Tabarov – PhD in Engineering, Associate Professor, 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: behruz.tabarov@mail.ru.

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор 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: epapu@knastu.ru.

Vyacheslav A. Solovyev – Doctor of Technical Sciences, Professor, 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: epapu@knastu.ru.

Аннотация. В статье исследуются режимы работы семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при дискретном переходе с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую без возникновения флуктуации тока, потребляемого из сети, и динамических усилий. Для проведения данного исследования в среде MATLAB была разработана имитационная модель семиступенчатого компенсатора реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов. Полученные результаты этого физического процесса в стационарных и динамических режимах работы показали целесообразность применения предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности в различных областях применения систем электроснабжения.

Summary. The paper studies the operating modes of a seven-stage reactive power compensator at discrete transition from one stage of reactive power control to another without fluctuations of the current consumed from the network and dynamic forces. To carry out this study, a simulation model of a seven-stage reactive power compensator based on three capacitor bank units was developed in MATLAB environment. The obtained results of this physical process in stationary and dynamic modes of operation have shown the feasibility of the proposed seven-stage reactive power compensator in various applications of power supply systems.

Ключевые слова: семиступенчатый компенсатор реактивной мощности, регулирование реактивной мощности, тиристорный ключ, дискретное управление, формирование импульсов управления, имитационная модель.

Key words: seven-stage reactive power compensator, reactive power regulation, thyristor switch, discrete control, control pulse generation, simulation model.

Научно-исследовательская работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (номер гранта: МК-3799.2022.4).

УДК 621.314

Введение. Передача электрической энергии на большие расстояния и распределение её между потребителями с наименьшими потерями являются актуальными задачами проектирования и эксплуатации систем электроснабжения [1–3]. Несмотря на возрастающие тенденции развития новых технологий и совершенствование путей по решению задач, связанных со снижением потерь электроэнергии при производстве, передаче и распределении, на сегодняшний день существуют проблемы, которые не нашли окончательного решения, особенно в динамических режимах работы энергетических систем [4; 5]. Как известно, одним из путей решения этой проблемы является применение конденсаторной компенсирующей установки [6; 7]. Опыт эксплуатации систем электроснабжения с такими установками показывает, что при индивидуальной компенсации реактивной мощности, когда величина активно-индуктивной нагрузки постоянна, использование такого подхода является своевременным и эффективным [8; 9]. Анализ результатов исследования информационных источников и опыт эксплуатации существующих систем электроснабжения с устройствами многоступенчатой компенсации реактивной мощности позволили оценить эффективность их работы в электротехнических системах [10]. На основании этих результатов можно констатировать, что существующие многоступенчатые компенсаторы реактивной мощности разгружают электрические сети от потребления реактивной мощности, но обеспечение потребителей реактивной энергии происходит со сравнительно низкими технико-экономическими показателями. Это связано с тем, что, во-первых, в качестве коммутационных аппаратов используются механические аппараты, которые обладают низкими показателями по быстродействию. Кроме того, большое количество коммутационных аппаратов при многоступенчатом регулировании создаёт проблемы при включении и выключении блоков батареи конденсаторов, а также при их переключении. Во-вторых, низкая точность регулирования реактивной мощности приводит к перекомпенсации или недокомпенсации [11; 12]. Эти факторы не только сказываются на эффективности работы предлагаемых систем, но и влияют на нормальную работу и срок службы элементов систем электроснабжения, в результате чего возникают приостановки технологических процессов и выходит из строя электрооборудование [12].

Использование технического решения, описанного в [13; 14], позволяет ослабить влияние вышеотмеченных недостатков многоступенчатых компенсаторов реактивной мощности и обеспечить непрерывное и точное регулирование реактивной мощности при плавном и дискретном изменении тока нагрузки. Кроме того, указанное техническое решение позволяет сохранить высокое значение энергетических показателей при включении и выключении блоков батареи конденсаторов, а также при переключении ступеней компенсатора.

Цель работы – выявление возможности сохранения эффективности работы и расширения функциональных возможностей предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при возникновении необходимости дискретного регулирования реактивной мощности в системах электроснабжения.

Для достижения поставленной цели на разработанном программном комплексе [15] в среде MATLAB создана имитационная модель предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов. Функциональная схема имитационной модели предлагаемого компенсатора показана на рис. 1 и содержит трёхфазную сеть (U_a , U_b и U_c), линию электропередачи (ЛЭП), блок сетевого выключателя (СВ), первую (БК-1), вторую (БК-2) и третью (БК-3) батареи конденсаторов, модули первого (ТК-1), второго (ТК-2) и третьего (ТК-3) тиристорных ключей с синхронизированным и фазированным с сетью блоком формирования импульсов управления (ФИУ), активно-индуктивную нагрузку (Z_n), измерительные датчики тока и напряжения и другие вспомогательные элементы.

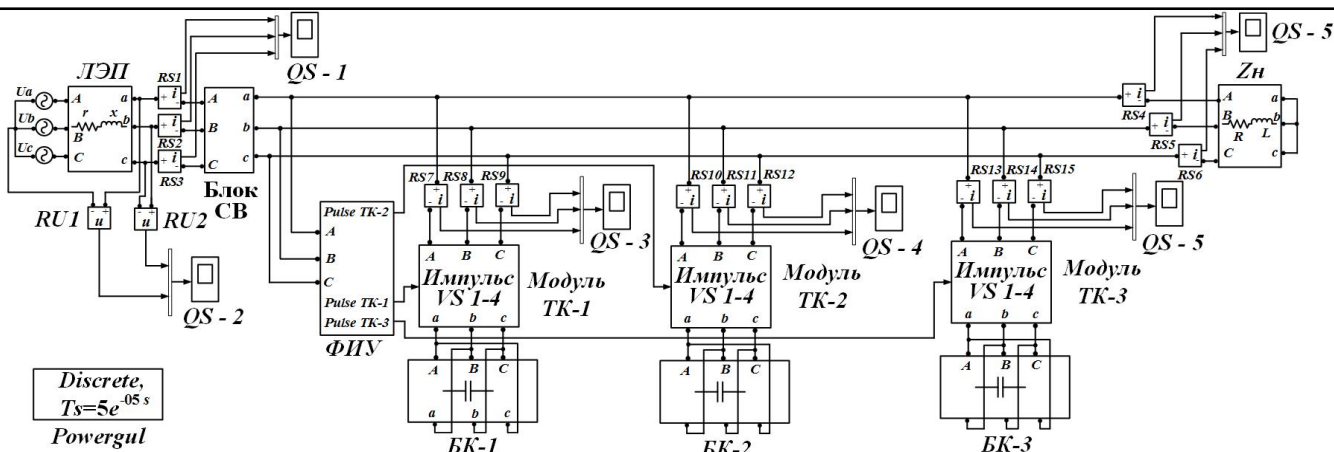


Рис. 1. Блочно-модульная модель семиступенчатого компенсатора реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов

Ниже (см. рис. 2 и 3) приведены полученные результаты исследования при дискретном изменении реактивной мощности в анализируемой схеме семиступенчатого компенсатора реактивной мощности. Важно отметить, что данные исследования выполнялись в соответствии с алгоритмом нового способа непрерывного регулирования реактивной мощности [13].

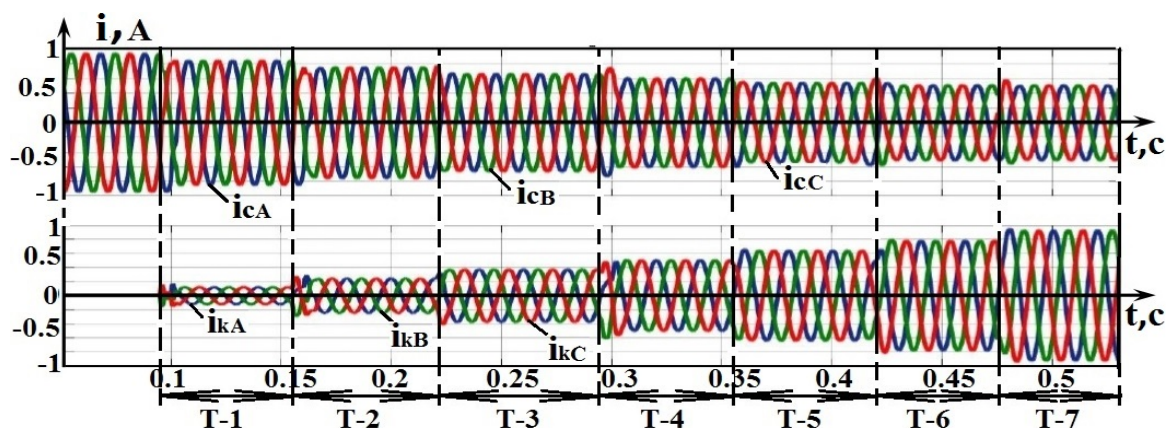


Рис. 2. Осциллограммы токов сети (сверху) и предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности (снизу) при плавном регулировании реактивной мощности

На осциллограммах (см. рис. 2 и 3) введены следующие обозначения: фазных токов сети (i_{cA} , i_{cB} и i_{cC}), токов конденсаторов (i_{kA} , i_{kB} и i_{kC}) и интервалов работы компенсатора реактивной мощности на семи ступенях (T-1, T-2 ... T-7). Следует отметить, что полученные результаты исследования, показанные на рис. 2 и 3, приведены в относительных единицах. Осциллограммы, приведённые на рис. 2, иллюстрируют работу предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при плавном изменении (повышении) тока нагрузки и непрерывном регулировании реактивной мощности предлагаемого компенсатора. Анализ кривых токов, приведённых на осциллограммах, наглядно иллюстрирует, что предлагаемый семиступенчатый компенсатор реактивной мощности при плавном изменении тока нагрузки обеспечивает плавное и непрерывное регулирование реактивной мощности, не создавая при этом бросков токов, просадки напряжения и появления электродинамических усилий в сети и на нагрузке, а также в самих конденсаторах [14]. Это и служит гарантом нормального функционирования системы электроснабжения и сохранения срока службы электрооборудования.

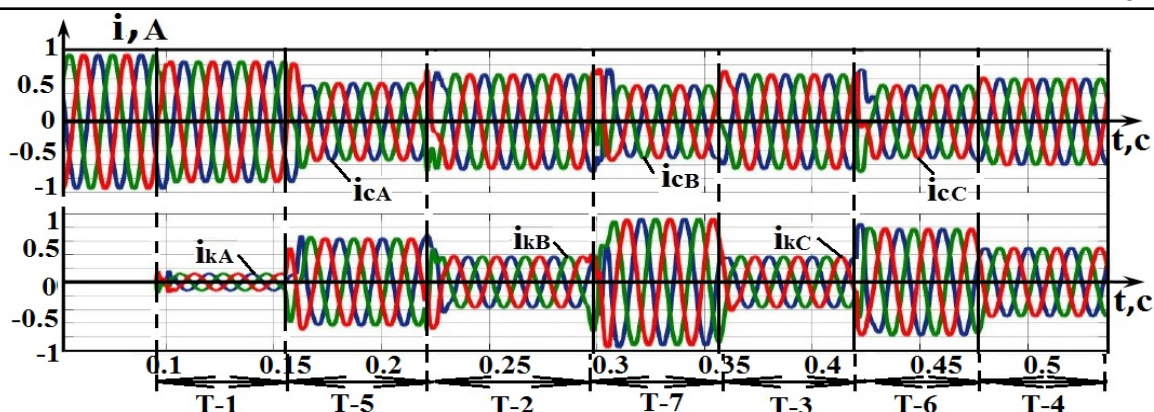


Рис. 3. Осциллограммы токов сети (сверху) и предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности (снизу) при дискретном регулировании реактивной мощности

Рассмотрим результаты исследования дискретного регулирования реактивной мощности при скачкообразном изменении тока нагрузки, имеющей активно-индуктивный характер. Как следует из кривых осциллограмм, приведённых на рис. 3, на интервалах времени $T-1 \dots T-4$ нагрузка претерпевает скачкообразное изменение относительно номинального значения, что приводит к необходимости регулирования реактивной энергии в системах электроснабжения для того, чтобы сохранить эффективность работы установки. Алгоритм функционирования состоит из следующих управляющих действий. В начале интервала времени $T-1$ предлагаемый компенсатор реактивной мощности вводит в работу первый блок батареи конденсаторов при выключенных блоках БК-2 и БК-3, который реализует первую ступень регулирования реактивной мощности. Как видно из осциллограмм на рис. 3, в конце интервала времени $T-1$ и начале интервала времени $T-5$ нагрузка скачкообразно возрастает в несколько раз, что создаёт нехватку реактивной мощности в системах электроснабжения. Такое изменение активно-индуктивной нагрузки приводит к формированию блоком ФИУ управляющих импульсов, подаваемых на входы тиристорного ключа ТК-3 для включения в работу блока БК-3. Включение блока БК-3 приводит к генерированию дополнительной реактивной мощности, которая необходима для обеспечения питания потребителей реактивной энергии и снижения потерь электроэнергии в системах электроснабжения. Стоит отметить, что на интервале времени $T-5$ в работе находятся блоки БК-1 и БК-3 при выключенном блоке БК-2. Интервал времени $T-2$ иллюстрирует работу предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности на второй ступени регулирования реактивной мощности. Здесь, в конце интервала времени $T-5$ и начале интервала времени $T-2$, нагрузка резко снижается, а это, как известно из опыта работы существующих компенсаторов реактивной мощности, в системах электроснабжения приводит к перекомпенсации, в результате чего возникают перенапряжения и генерируется дополнительная реактивная энергия, что в конечном результате приводит к снижению эффективности работы системы и сокращению срока службы электрооборудования систем электроснабжения. На данном интервале времени предлагаемый семиступенчатый компенсатор реактивной мощности получает с блока ФИУ команды на снижение уровня генерируемой реактивной мощности. Управляющие сигналы с блока ФИУ подаются на тиристорные ключи ТК-1 и ТК-3 для отключения блоков БК-1 и БК-3, и параллельно с этим формируются импульсы, которые подаются на управляющие входы тиристорного ключа ТК-2 для включения блока БК-2, в результате чего одновременно с отключением блоков БК-1 и БК-3 вводится в работу блок БК-2, который и генерирует необходимую реактивную мощность. Интервал времени $T-7$ иллюстрирует работу предлагаемого компенсатора при максимальном уровне тока нагрузки. Здесь, в конце интервала времени $T-2$ и начале интервала времени $T-7$, происходит внезапное повышение тока нагрузки до максимального уровня, в результате чего блок ФИУ реагирует на это изменение и подаёт команды на управляющие входы тиристорных ключей ТК-1 и ТК-3 для включения в работу первого БК-1 и

третьего БК-3 блоков батареи конденсаторов. Блоки БК-1 и БК-3 в начале интервала времени Т-7 включаются, на протяжении всего интервала времени работают вместе с блоком БК-2 и генерируют необходимую реактивную мощность. Стоит отметить, что на этом уровне (седьмая ступень регулирования) предлагаемый компенсатор реактивной мощности работает на полной мощности. Фрагменты из результатов исследования дискретного управления на третьей ступени регулирования реактивной мощности представлены на рис. 3 на интервале времени Т-3. Как видно из осциллограмм в конце интервала времени Т-7 и начале интервала времени Т-3, нагрузка в системах электроснабжения резко падает и предлагаемое устройство снижает уровень генерируемой реактивной мощности до необходимого значения. На это изменение нагрузки также реагирует блок ФИУ – и подаёт импульсы на управляющие входы тиристорного ключа ТК-3 для отключения блока БК-3, в результате чего выводится из работы блок БК-3 и в работе остаются батареи конденсаторов БК-1 и БК-2. На рис. 3 фрагменты осциллограмм, приведённые на интервале времени Т-6, иллюстрируют шестую ступень регулирования реактивной мощности при дискретном повышении тока нагрузки с третьей ступени на шестую. На этом интервале времени к работе приступает третий блок батареи конденсаторов БК-3 и параллельно с этим выключается первый блок батареи конденсаторов БК-1, но в работе по-прежнему остаётся второй блок батареи конденсаторов БК-2. Интервал времени Т-4 иллюстрирует работу на четвёртой ступени регулирования реактивной мощности при резком снижении тока нагрузки с шестой ступени на четвёртую. Здесь, на этом интервале времени, блок ФИУ формирует одновременные импульсы на тиристорные ключи ТК-1, ТК-2 и ТК-3 для включения третьего блока батареи конденсаторов БК-3 и выключения первого БК-1 и второго БК-2 блоков конденсаторов.

Областью применения предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности являются не только системы электроснабжения с протяжёнными линиями электропередач, но и системы электроснабжения, где электрическая нагрузка плавно или дискретно меняется.

Заключение. Результаты исследования работы нового семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при дискретном регулировании реактивной мощности подтвердили, что предлагаемое устройство при разработанном алгоритме управления сохраняет эффективность функционирования систем электроснабжения, несмотря на нестабильность и колебания нагрузки в широких пределах, за счёт повышения точности регулирования реактивной мощности, генерируемой блоками конденсаторных батарей. Кроме того, предлагаемое устройство благодаря новому способу управления семиступенчатым компенсатором реактивной мощности при переключении блоков батареи конденсаторов между ступенями регулирования реактивной мощности позволяет повысить надёжность работы и срок службы систем электроснабжения благодаря исключению всплесков тока, просадки напряжения, снижению коммутационных потерь и исключению электрической дуги на контактах коммутационных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E. Modified Thyristor Controlled Reactors for Static VAR Compensators // 2016 IEEE 6th International Conference on Power and Energy (PECON 2016), Melaka, Malaysia, 2016.
2. Солодуха, Я. Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для её компенсации / Я. Ю. Солодуха. – М.: Информэлектро, 1981. – 67 с.
3. Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E., Astashev, M. G. Design and Optimization of New Thyristors Controlled Reactors with Zero Harmonic Content // 18th International Conference of Young Specialists on Micro. Nanotechnologies and Electron Devices, 2017.
4. Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E., Astashev, M. G. Thyristors Controlled Reactors for Reactive Power Control with Zero Harmonics Content // 17th IEEE International Conference on Smart Technologies IEEE EUROCON 2017, Ohrid, Macedonia, 2017.
5. Dionise, T. J., Morello, S. Comprehensive Analysis to Specify a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade // IEEE IAS Annual Meeting Conference Record, 2014.



6. Dionise, T. J. Assessing the Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Las Vegas, NV, 2012.
7. Kawamura, A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace // IEEE Transactions of Industry Applications, 1983, vol. 1A-19, iss. 3. P. 414-423. doi: 10.1109/TIA.1983.4504217.
8. Кабышев, А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учеб. пособие / А. В. Кабышев; под. ред. Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 234 с.
9. Компенсирующие и регулирующие устройства в электротехнических системах / Г.Е. Поспелов [и др.]. – СПб.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
10. Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits // IPEC 83 – Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, p. 1375-1386.
11. Edson, H. W., Richard, M. S., Mauricio, A. New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power in Electrical Systems With Generic Loads // IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. Vol. 8.
12. Дерюжкова, Н. Е. Нечёткие алгоритмы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с переменной нагрузкой / Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова, В. А. Соловьёв // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 51-58.
13. Патент 2746796 РФ, МПК H02M 3/18 (2006.01). Способ регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой: № 2020133987/07: заявлено 15.10.2020; опубликовано 21.04.2021 / Климаш С. В., Константинов А. М., Табаров Б. Д., Климаш В. С.; заявитель ФГБОУ ВО «ДВГУПС». – 13 с.
14. Климаш, С. В. Повышение точности регулирования реактивной мощности конденсаторной установки / С. В. Климаш, Б. Д. Табаров, В. С. Климаш // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 40. – Т. 4. – С. 27-43.
15. Блочно-модульная модель для исследования физических процессов электротермической установки с компенсацией реактивной мощности / В. С. Климаш, Б. Д. Табаров: св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. – М.: ФИПС, 2021. – № 2021614296 от 22 марта 2021 г.

Абарникова Е. Б., Кортун В. С.
E. B. Abarnikova, V. S. Kortun

ПАРАДИГМА ЦИФРОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

PARADIGM OF DIGITAL EDUCATION AND THE USE OF DIGITAL LEARNING TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Абарникова Елена Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: dir_2010@mail.ru.

Elena B. Abarnikova – PhD in Engineering, Associate Professor, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: dir_2010@mail.ru.

Кортун Варвара Сергеевна – студент магистратуры Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: dfhzdfhz2000@gmail.com.

Varvara S. Kortun – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: dfhzdfhz2000@gmail.com.

Аннотация. Использование цифровых технологий в обучении является одним из основных дискуссионных вопросов современного педагогического сообщества, но инструментарий и область его применения в сфере образовательных технологий всё ещё не определены. В данной статье описываются инструменты цифровых технологий, подходящие для образовательного процесса, и предлагаются варианты применения данных инструментов к образовательным технологиям. Также в статье приведены результаты опроса обучающихся в вопросе применения информационных технологий (ИТ) в обучении.

Summary. The use of digital technologies in teaching is one of the main debatable issues of the modern pedagogical community, but the tools and the scope of its application in the field of educational technologies are still not defined. This article describes the tools of digital technologies suitable for the educational process, and offers options for applying these tools to educational technologies. The article also presents the results of a survey of students on the use of information technology (IT) in education.

Ключевые слова: электронное обучение, технологии цифрового образования, информационные технологии, проектное обучение, чат-боты, тренинги.

Key words: e-learning, digital education technologies, information technologies, project-based learning, chatbots, trainings.

УДК 004:378

Введение. Цифровая эпоха – это время, в котором всё больше влияния на людей, на многие аспекты социальной и культурной жизни современного общества оказывают цифровые технологии [1].

В связи с этим цифровая трансформация системы образования становится необходимой, поскольку именно образование является фундаментальной составляющей любого общества, определяющей его экономическое состояние и конкурентоспособность.

Однако использование цифровых технологий в образовании и развитие технологий цифрового образования – далеко не одно и то же.

С появлением цифровых технологий в образовании возникают два термина: «цифровое образование» (digital education) и «цифровое обучение» (digital learning). В первом случае преподава-



ние и управление образовательными процессами переведены в формат цифровых практик, которые осуществляются с помощью нового программного обеспечения и соответствующих им стандартов, кодов, инфраструктуры баз данных и цифровых технологий. Во втором случае подразумеваются цифровые технологии, повышающие эффективность учебного процесса за счёт контроля времени, места, траектории и темпа учебной деятельности [2].

Развитие технологий цифрового образования влечёт за собой изменение качества обучения при внедрении новых цифровых технологий, появление новой парадигмы образования в цифровом обществе [3].

Таким образом, основная задача современного преподавателя состоит в том, чтобы «...не только дать обучающимся определённую сумму знаний, но и развить у них личностно значимые компетенции, интерес к учению, активизировать самостоятельную познавательную и мыслительную деятельность».

Принципиальные различия классической и новой парадигм образования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Парадигмы образования

Критерии	Классическая парадигма	Новая парадигма
Основная цель	Подготовка человека к жизни и труду	Обеспечение условий самоопределения и самореализации личности
Человек	Простая система	Сложная система
Знания	«Школа памяти» (из прошлого)	«Школа мышления» (из будущего)
Образование	Передача обучаемому известных образцов знаний, умений, навыков	Созидание человеком образа мира в себе самом. Полагание себя в мир предметной, социальной и духовной культуры
Обучающийся	Объект педагогического воздействия, обучаемый	Субъект познавательной деятельности, обучающийся
Отношения преподавателя и обучающегося	Субъект-объектные, монологические	Субъект-субъектные, диалогические
Вид деятельности учащегося	«Ответная», репродуктивная	«Активная», творческая

Преимущества цифровой парадигмы образования можно обозначить следующим образом:

1. Персонализированное обучение – выбор и изучение материала в собственном темпе. Это может быть особенно полезно для студентов, которые имеют различные уровни знаний.

2. Самостоятельное обучение – развитие навыков самостоятельного поиска, анализа и представления необходимой информации, критического мышления, самоорганизации и самодисциплины.

3. Стимулирование учащихся – высокая степень интерактивности, вовлечённости и заинтересованности в развитии своей базы знаний.

4. Расширенные возможности обучения – доступность изображений, видеоконтента, виртуальная реальность, интерактивные сеансы, геймификация.

Однако, несмотря на все преимущества цифровой трансформации образования, существует множество проблем, основные из которых обозначены ниже.

Во-первых, бездумное внедрение цифровых технологий в учебный процесс приводит к обратному эффекту. Президент Высшей школы методологии, научный руководитель Лаборатории нейронаук и поведения человека ПАО Сбербанк Андрей Курпатов в своём докладе «Трансформация человека в цифровую эпоху» отметил, что «...трансформация человека в цифровую эпоху уже

происходит, он меняется: интеллектуально уплощается, личностно не развивается, социально дезориентирован». Появляется новое понятие – «цифровой аутизм».

Во-вторых, неготовность педагогического сообщества к внедрению и использованию новых цифровых подходов, к изменению методики преподавания в цифровую эпоху. Согласно результатам международного исследования TALIS-2018 в высшей школе [4], среди профессорско-преподавательского состава российских вузов лица старше пенсионного возраста составляют 19,5 %, лица в возрасте от 50 до 65 лет – около 30 %. Таким образом, почти половину педагогического сообщества составляют люди старше 50 лет, для которых использование ИКТ является принуждением, а не необходимостью.

При этом из результатов проведённого опроса обучающихся следует, что большинство опрошенных (79,45 %) предпочитает использовать информационные технологии и ресурсы вместо других источников (см. рис. 1), 11 % отдаёт предпочтение печатной литературе, а 7,89 % считает достаточными лекции преподавателя. И только 1,66 % обучающихся равномерно сочетает использование различных материалов.

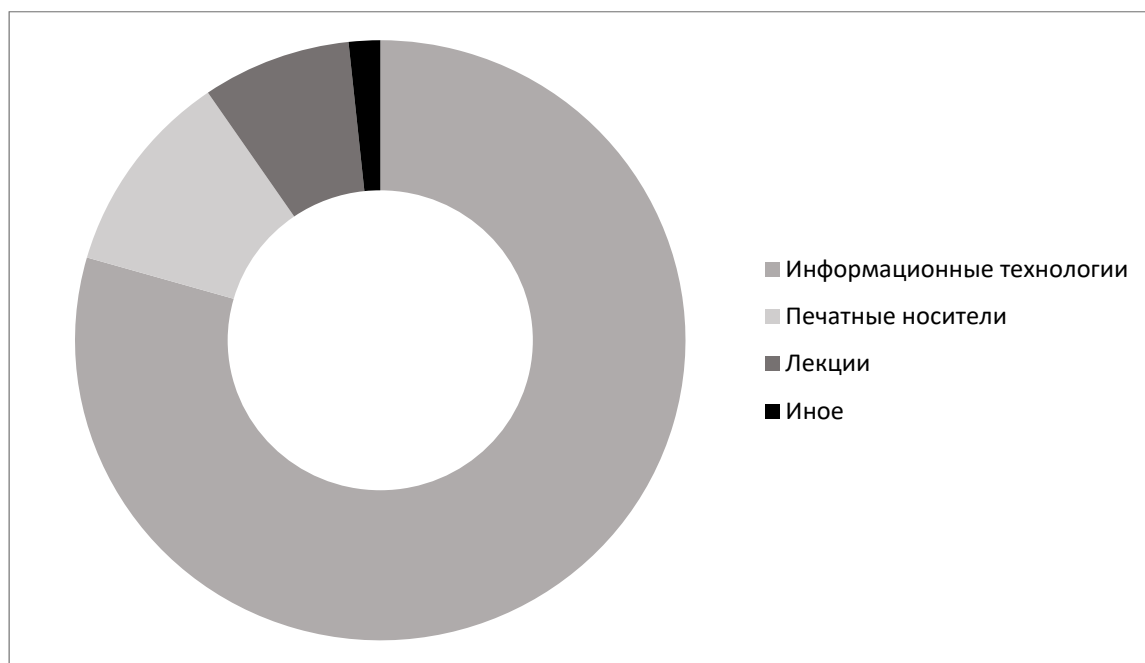


Рис. 1. Использование ИТ в обучении

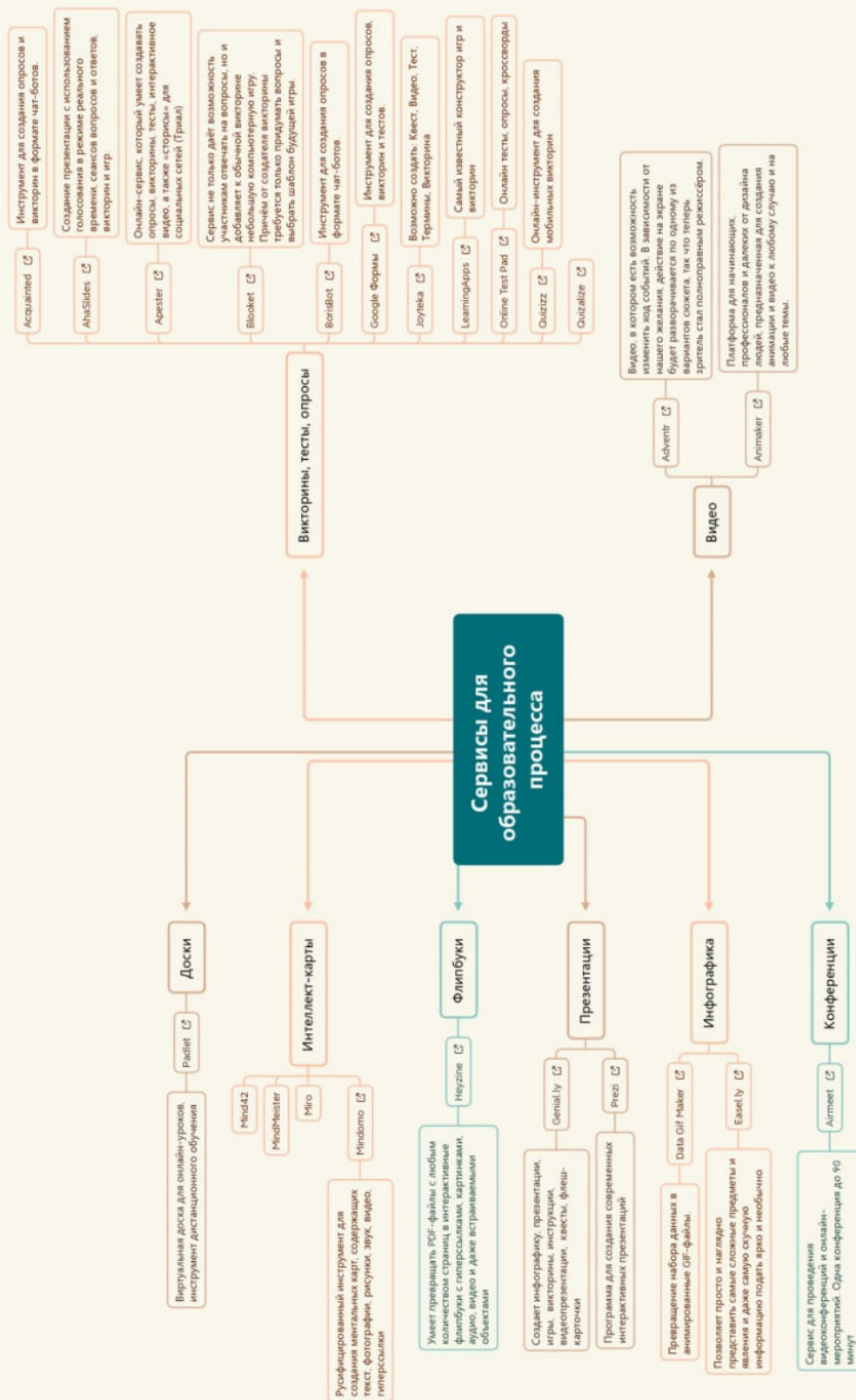
Из всего изложенного следует, что стратегическим направлением цифровой трансформации в высшем образовании является внедрение инновационных методов обучения, основанных на парадигме цифрового образования, и использование цифровых образовательных технологий.

К основным инновационным методам обучения можно отнести: смешанное обучение, проектное обучение, обучение на основе запросов, «перевернутый» класс, обучение сверстников, перекрестное обучение и многие другие [5].

Остановимся чуть подробнее на одном из них. Проектное обучение – это ориентированная на студента педагогика, которая включает в себя динамичный классный подход. Считается, что студенты приобретают более глубокие знания путём активного изучения реальных проблем и задач.

Для качественной реализации проектного обучения необходимо понимать, какие цифровые сервисы-инструменты целесообразнее применить.

Исходя из анализа областей применения цифровых технологий, можно составить общую картину инструментов (см. рис. 2), используемых в образовательном процессе.



Presented with xMind

Рис. 2. Сервисы для образовательного процесса

На сегодняшний момент использование инструментов цифровых технологий описано в статьях Осляковой И. В., Могилевской Н. С. и Заславского А. А. [6; 7; 8], где в качестве инструмента используются чат-боты, а также в статье Климашиной Н. Н. [9], где инструмент – мобильное приложение.

В качестве приоритетных цифровых сервисов и технологий проектного обучения можно использовать канбан-доски, интеллект-карты, чат-боты, тренинги-имитаторы и игровые тренинги (см. рис. 3).



Рис. 3. Применение технологий цифрового образования в проектном обучении

Технологии цифрового образования нашли практическое применение при реализации проектного обучения студентов студенческого проектного бюро (СПБ) «DeCode» ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Канбан-доска – это инструмент, который визуализирует задачи, показывает, кто и чем занимается и как движется работа над проектом. Она используется для наглядного представления всех задач, которые нужно сделать: и тех, что уже в работе, и тех, что пока не начаты, и тех, что уже выполнены, уменьшая количество незавершённых задач и увеличивая скорость работы.

В образовательном процессе канбан-доски могут быть использованы для организации и контроля учебного процесса, а также для мотивации и самоорганизации учащихся.

При использовании канбан-досок в образовательном процессе можно учитывать следующие аспекты:

1. Разбиение учебного материала на небольшие задачи или этапы.
2. Визуализация работы над каждой задачей или этапом.
3. Отслеживание прогресса каждого студента или проектной группы студентов.

Существуют различные онлайн-сервисы для реализации канбан-досок: Jira, Asana, Trello и др. Пример организации проектного обучения с помощью Trello показан на рис. 4.

Тренинги являются важным инструментом в обучении, поскольку они позволяют получать практические умения и формировать навыки за счёт имитации работы с реальным объектом/программой/процессом.

Создание тренинга – процесс трудоёмкий, примеры программного обеспечения на рынке практически отсутствуют. Поэтому создание тренингов-имитаторов осуществлялось с помощью собственного конструктора VisualTrening. Примером реализации тренинга может служить процесс создания документа с не редактируемыми полями в текстовых процессорах, как показано на рис. 5 и 6. Такой тренинг позволяет поэтапно научиться работать с программным обеспечением.

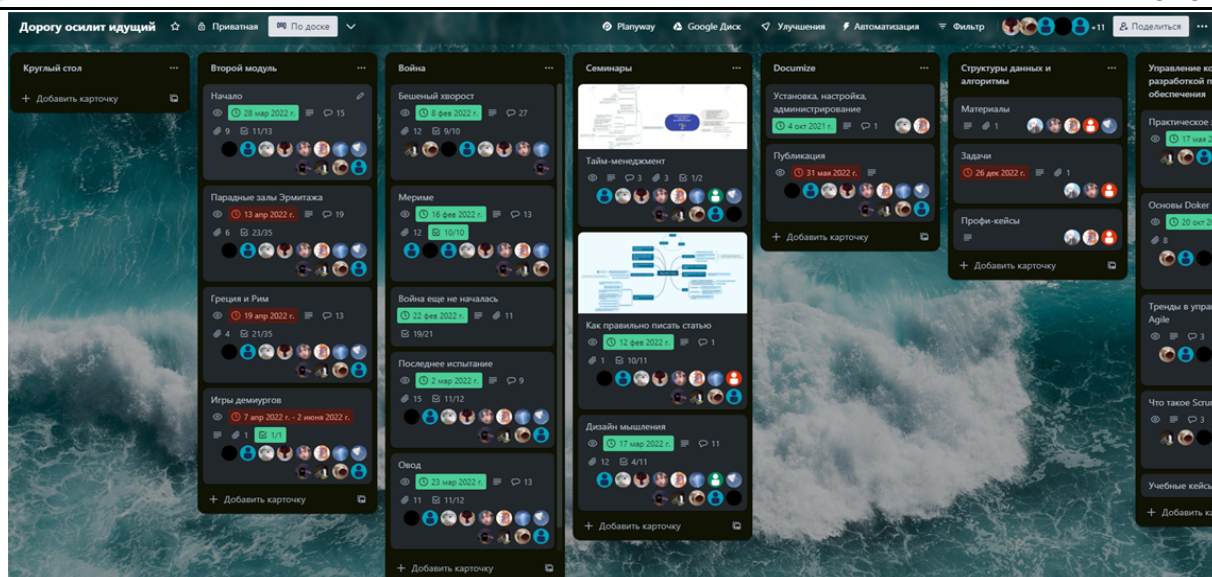


Рис. 4. Использование досок в обучении

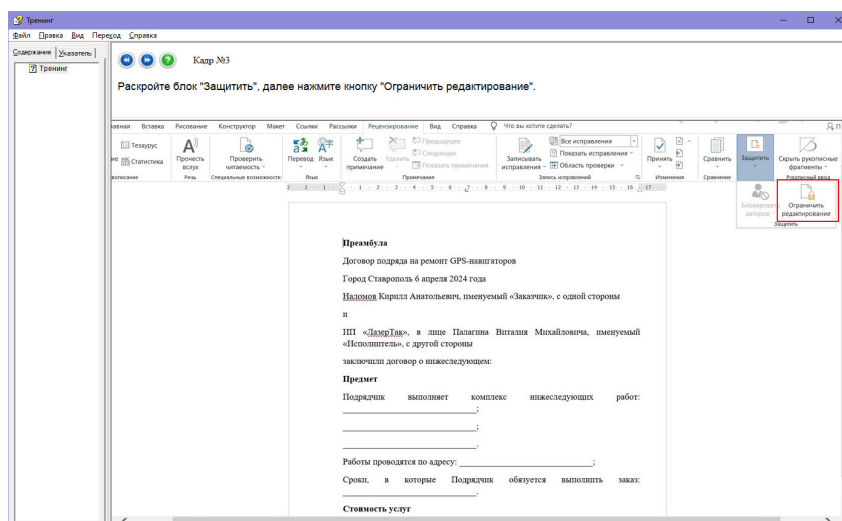


Рис. 5. Задание с подсказкой

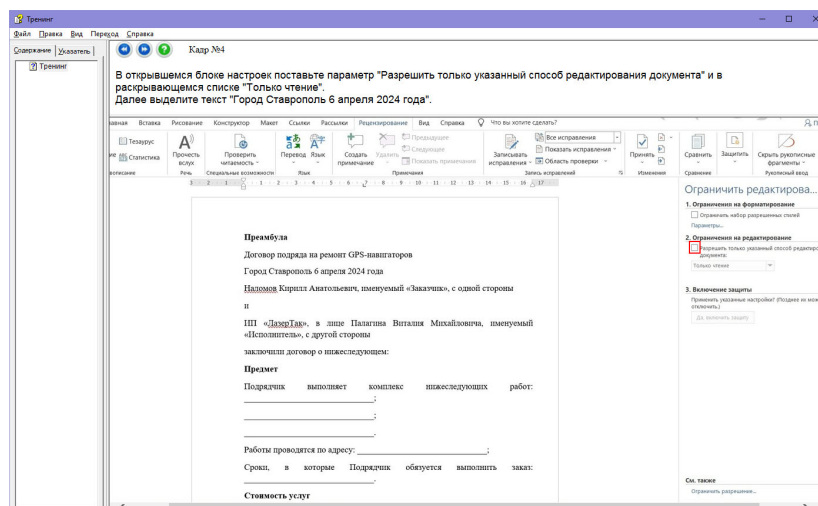


Рис. 6. Следующий шаг с подсказкой

Согласно новой парадигме образования, обучение – процесс активный, а не пассивный; особую роль в активном обучении играет использование ботов. С помощью конструктора ботов можно реализовать учебные микропроекты как отдельными студентами, так и малыми группами; таким образом, преподаватель достигает сразу нескольких целей. Во-первых, процесс сбора и анализа информации для будущего бота студент проводит самостоятельно; задачи преподавателя – проконсультировать, направить, подсказать. Во-вторых, при структурировании материала студент вынужден повторять информацию несколько раз, что способствует её лучшему усвоению. В-третьих, студент осваивает новые информационные технологии направления No-Code – работу с конструктором ботов. И, в-четвёртых, чат-бот должен быть опубликован, т. е. результат работы достаточно быстро получит оценку одноклассников, преподавателя или просто стороннего подписчика/специалиста.

Для создания чат-ботов доступны многие конструкторы и сервисы (Botmother, Flow XO, Botpress и др.).

На рис. 7 показана реализация бота с помощью конструктора Botmother.

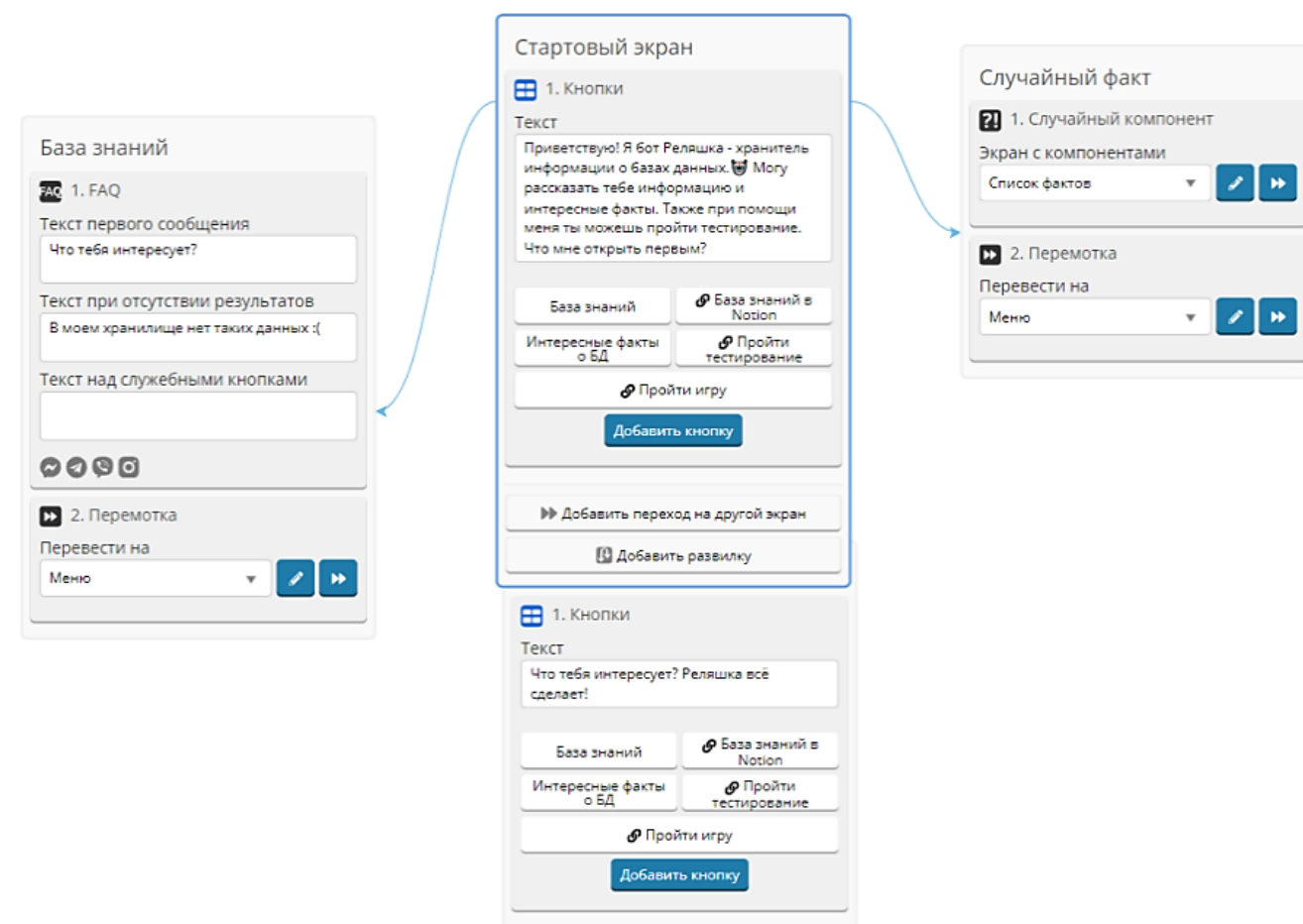


Рис. 7. Создание бота

Пример готового бота, реализованного студентом, показан на рис. 8.

Интеллект-карты являются мощным инструментом для визуализации и структурирования информации и процессов в обучении. С их помощью студент может лучше понять и запомнить материал за счёт структурирования и анализа данных. В качестве сервисов для создания интеллект-карт можно использовать Miro, Xmind, MindMeister, Venngage и др. На рис. 9 изображён пример оформления информации студентом по выданной теме.

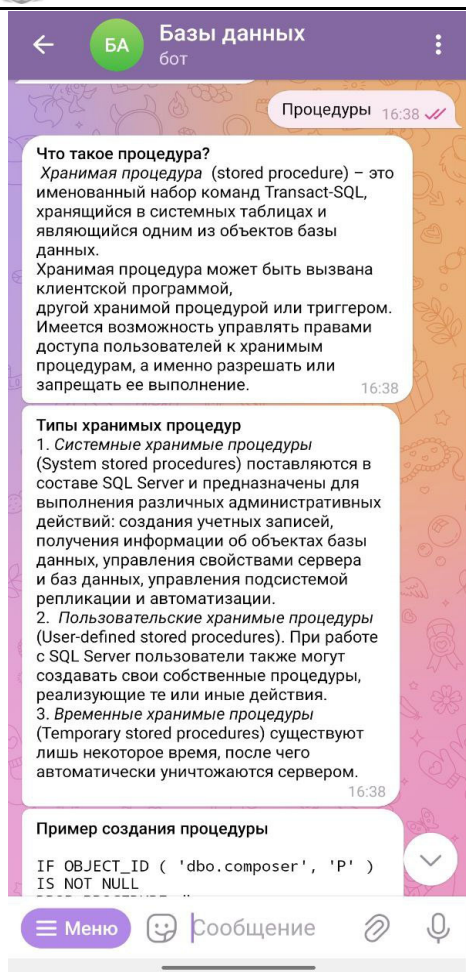


Рис. 8. Информационный чат-бот

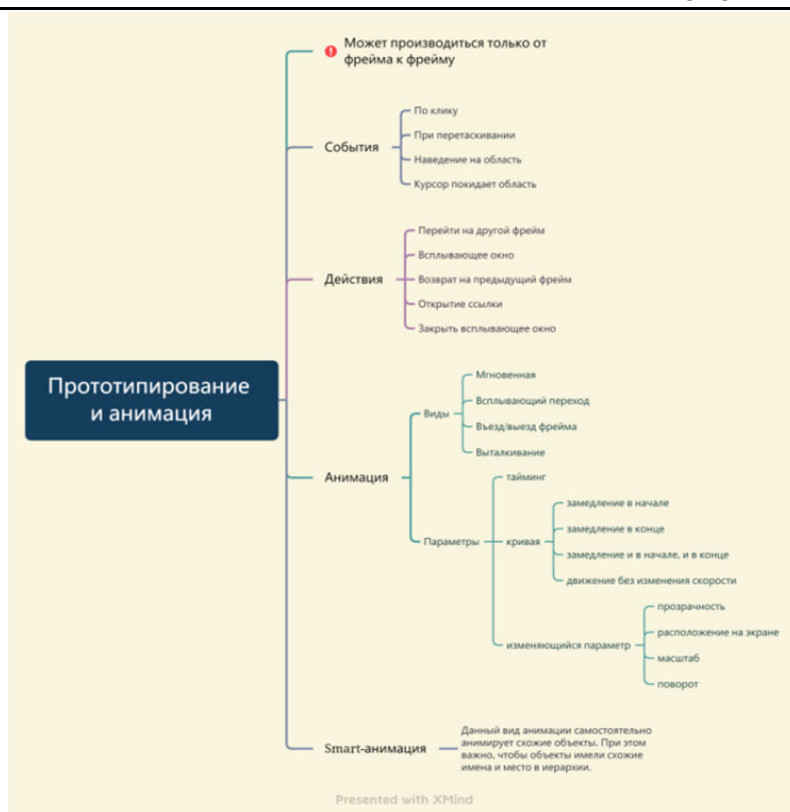


Рис. 9. Интеллект-карта

Заключение. Дискуссии на тему технологий цифрового образования и использования цифровых технологий в образовании, очевидно, будут продолжаться довольно долго. На опыте внедрения этих технологий в процесс проектного обучения студентов – участников СПБ «DeCode» можно с уверенностью утверждать, что новая парадигма образования и разумное, обоснованное использование цифровых сервисов позволяют повысить качество образования. С развитием цифрового общества профессии будут меняться, но уже сейчас необходимо изучать и использовать цифровые технологии и сервисы, позволяющие преподавать компетенции, которые сохраняют актуальность и помогут самореализоваться нашим студентам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уразгалиева, Р. Век цифровизации. Цифровая грамотность – важный и главный навык в XXI веке / Р. Уразгалиева // The Scientific Heritage. – 2022. – № 95. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vek-tsifrovizatsii-tsifrovaya-gramotnost-vazhnyy-i-glavnyy-navyk-v-xxi-veke> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.
2. Психология образования: современный вектор развития: моногр. / науч. ред. С. Б. Малых, Т. И. Тихомирова; отв. ред. И. А. Ершова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2020. – 790 с.
3. Матвиенко, С. В. Образование XXI: плюсы и минусы цифрового образования / С. В. Матвиенко, Е. В. Васильева // Образование и право. – 2022. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrazovanie-xxi-plyusy-i-minusy-tsifrovogo-obrazovaniya> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.
4. Рудаков, В. Различия в положении профессорско-преподавательского состава вузов по возрастным группам. Мониторинг экономики образования (Информационно-аналитические материалы по результатам

статистических и социологических обследований) // НИУ ВШЭ. – 2020. – № 13. – URL: https://www.hse.ru/data/2020/12/03/1354616421/release_13_2020.pdf (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.

5. Цифровые технологии в образовательном пространстве / О. И. Ваганова, А. В. Гладков, Е. Ю. Конова-лова, И. Р. Воронина // БГЖ. – 2020. – № 2 (31). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovyye-tehnologii-v-obrazovatelnom-prostranstve> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.

6. Осякова, И. В. Перспективы обучения языкам с применением Телеграм-бота и пользовательского контента / И. В. Осякова // Образование и право. – 2023. – № 7. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-obucheniya-yazykam-s-primeneniem-telegram-bota-i-polzovatelskogo-kontenta> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.

7. Могилевская, Н. С. Чат-бот для тестирования знаний на платформе мессенджера Telegram / Н. С. Могилевская, Г. П. Самойленко // Молодой исследователь Дона. – 2022. – № 3 (36). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chat-bot-dlya-testirovaniya-znaniy-na-platforme-messendzhera-telegram> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.

8. Заславский, А. А. Иерархическая структура способов применения чат-ботов при автоматизации построения индивидуальных образовательных траекторий / А. А. Заславский // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. – 2022. – № 2 (60). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ierarhicheskaya-struktura-sposobov-primeneniya-chat-botov-pri-avtomatizatsii-postroeniya-individualnyh-obrazovatelnyh-traektoriy> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.

9. Климашина, Н. Н. Мобильные приложения в процессе обучения / Н. Н. Климашина // Вестник магистратуры. – 2020. – № 1-5 (100). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mobilnye-prilozheniya-v-protsesse-obucheniya> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.



Младова Т. А., Муллер Н. В., Младов А. С.
T. A. Mladova, N. V. Muller, A. S. Mladov

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ХАБАРОВСКОМ КРАЕ

MODELING OF FOREST FIRE CONDITIONS IN Khabarovsk Krai

Младова Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

Tatyana A. Mladova – PhD in Engineering, Associate Professor, Cadasters and Technosphere Security Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

Муллер Нина Васильевна – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: only_nina@mail.ru.

Nina V. Muller – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Cadasters and Technosphere Security, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: only_nina@mail.ru.

Младов Алексей Сергеевич – магистрант кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

Aleksey S. Mladov – Master's Degree Student, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

Аннотация. В статье проведены исследования и анализ причин возникновения лесных пожаров, в том числе и травяных пожаров в Хабаровском крае. В ходе исследования проанализированы зависимости возникновения пожаров от различных причин природного и антропогенного происхождения, сформированы модели расчёта на основе корреляционной зависимости. Применительно к лесным пожарам предложенная модель в соответствии с выявленной приоритетной причиной поможет определить вероятную площадь возгорания и принять соответствующие меры.

Summary. The article studies and analyzes causes of forest fires, including grass fires in the Khabarovsk Territory. In the course of the study, the dependences of the fire occurrence on various causes of natural and anthropogenic origin were analyzed, calculation models based on correlation dependence were formed. In relation to forest fires, the proposed model, in accordance with the identified priority cause, will help determine the likely area of ignition and take appropriate measures.

Ключевые слова: лесной пожар, загрязнение окружающей природной среды, статистика, зависимость, корреляционная связь.

Key words: forest fire, environmental pollution, statistics, dependence, correlation.

УДК 504.054

Проблема лесных пожаров на сегодняшний день остаётся по-прежнему актуальной. Лишь в начале 2022 г. в Хабаровском крае ликвидировано более 400 пожаров растительного происхождения. В некоторых случаях палы угрожали местным жителям. Среди основных причин возникновения пожара можно выделить человеческий фактор (беспечное обращение с огнём, выжигание солом, травы, непотушенные окурки и костры) и природные явления. Ввиду сложной пожарной ситуации правительство Хабаровского края выпустило Распоряжение о создании особого противопожарного режима от 22 апреля 2022 г. № 498-ПП.

К решающим факторам для успешной ликвидации пожаров можно отнести: подготовку личного состава пожарной части, повышенный уровень готовности подразделений, новые технологии в проведении аварийно-спасательных работ и модернизацию систем пожаротушения. Одними из условий производимого пожарного надзора и прогноза неблагоприятных ситуаций являются анализ и изучение статистики произошедших пожаров.

Для выявления зависимости сложившейся экологической ситуации от пожаров проведём анализ статистических данных за период с 2017 по 2020 гг. в Хабаровском крае (см. табл. 1).

Таблица 1

Основные показатели обстановки с пожарами за 2017-2020 гг. по Хабаровскому краю

Количество пожаров	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Всего, ед.	3061	2874	11 530	8228
Количество лесных пожаров, ед.	483	461	479	430

Статистика по количеству пожаров, в том числе лесных, за период 2017 по 2020 гг. представлена на рис. 1.



Рис. 1. Сравнительный анализ пожаров в Хабаровском крае

Резкий всплеск пожаров был зафиксирован в 2019 г. Однако количество лесных пожаров при этом значительно не выросло, а находилось на протяжении рассматриваемых лет почти на одном уровне. Для составления математической модели причин возникновения лесных пожаров необходимо исследовать приоритетный вид пожара – травяной, который является источником возникновения масштабных возгораний.

Проведём анализ влияния травяных пожаров на экологию лесных сообществ. Приведём статистику о травяных пожарах и причинах их развития на основе экологических отчётов и рассчитанные в данной работе коэффициенты корреляции (см. табл. 2).

Независимой переменной является площадь, а зависимой переменной – молнии. Для расчёта коэффициента корреляции необходимо использовать данные, представленные в табл. 3.

Выявим корреляционную связь между показателями: количеством причин пожаров от молнии X и количеством пожаров Y , ед.

На основе данных по табл. 3 произведём расчёт:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{109,57}{10} = 10,957;$$



$$Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = \frac{6,31}{10} = 0,631;$$

$$SS_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 = 1307,0911 - \frac{109,57^2}{10} = 106,532 \text{ 61};$$

$$SS_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 = 4,5058 - \frac{6,31^2}{10} = 0,526 \text{ 89};$$

$$SS_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i Y_i \right)^2 = 71,405 - 109,57 \frac{6,31}{10} = 2,266 \text{ 33}.$$

Таблица 2

Статистические данные по причинам возникновения лесных пожаров

Год	Площадь, млн га	Причины возникновения			
		Человеческие	Молния	Температура	Ветер
2022	16,51	9,7	1	32	2,4
2021	12,8	98,7	0,8	35	2,4
2020	9,27	91,7	0,9	34	3,2
2019	10,05	89,4	0,7	28	3,5
2018	13,84	96,4	0,3	30	2,4
2017	8,6	99	0,4	28	2,1
2016	14,2	87,9	0,4	23	2,1
2015	11,5	95,8	0,5	30	2,7
2014	7,5	92,1	0,77	34	2,3
2013	5,3	94,7	0,34	32	2,64
Коэффициент корреляции		0,78	0,302	0,8	0,55
Степень связи между переменными		Сильная	Умеренная	Сильная	Умеренная

Таблица 3

Статистические данные по причинам возникновения лесных пожаров от молнии

Площадь возгорания S , млн га		Причина Молнии M	$S \cdot M$	S^2 , млн га ²	M^2
16,51		1	16,51	272,5801	1
12,8		0,8	10,24	163,84	0,64
9,27		0,9	8,343	85,9329	0,81
10,05		0,7	7,035	101,0025	0,49
13,84		0,3	4,152	191,5456	0,09
8,6		0,4	3,44	73,96	0,16
14,2		0,5	7,1	201,64	0,25
11,5		0,77	8,855	132,25	0,5929
7,5		0,34	2,55	56,25	0,1156
5,3		0,6	3,18	28,09	0,36
Sum =	109.57	6.31	71.405	1307.0911	4.5085

На основе вышеприведённых расчётов коэффициент корреляции равен

$$r = \frac{SS_{XY}}{\sqrt{SS_{XX} * SS_{YY}}} = 0,302.$$

Таким образом, на основании информации, представленной выше, коэффициент корреляции составляет $r = 0,302$. Составим диаграмму рассеяния (см. рис. 2), изображающую значения двух переменных в виде точек на декартовой плоскости.

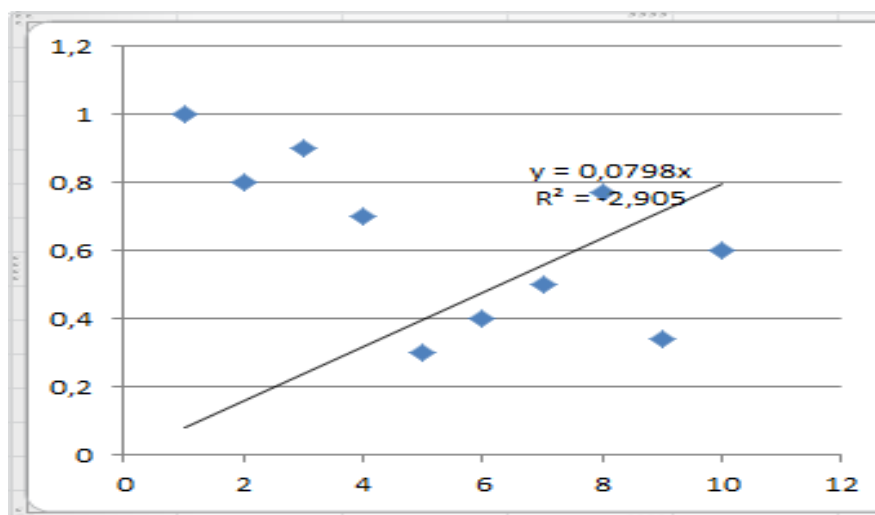


Рис. 2. Зависимость травяных пожаров от молний

В качестве вывода установим, что корреляционная зависимость пожаров от молний умеренная.

Проведём анализ влияния травяных пожаров от изменения температуры окружающего воздуха (см. табл. 4 и рис. 3).

В качестве вывода установим, что корреляционная зависимость температуры и пожаров сильная.

По аналогии рассчитана зависимость пожаров от ветра (умеренная) и от человеческого фактора (сильная).

Таблица 4

Статистические данные по причинам возникновения лесных пожаров от температуры окружающей среды

Площадь возгорания S , млн га		Причина тем- пература T	$S*T$	S^2 , млн га ²	T^2
16,51		0,9	14,859	272,5801	1
12,8		1,2	15,36	163,84	0,81
9,27		0,8	7,416	85,9329	1,44
10,05		0,65	6,5325	101,0025	0,4225
13,84		1,4	19,378	191,5456	1,96
8,6		1,4	12,04	73,96	1,96
14,2		1,4	19,88	201,64	1,96
11,5		0,87	10,005	132,25	0,7589
7,5		0,99	7,425	56,25	0,9801
5,3		0,78	4,134	28,09	0,6084
Sum =	109,57	10,39	117,0275	1307,0911	11,5370

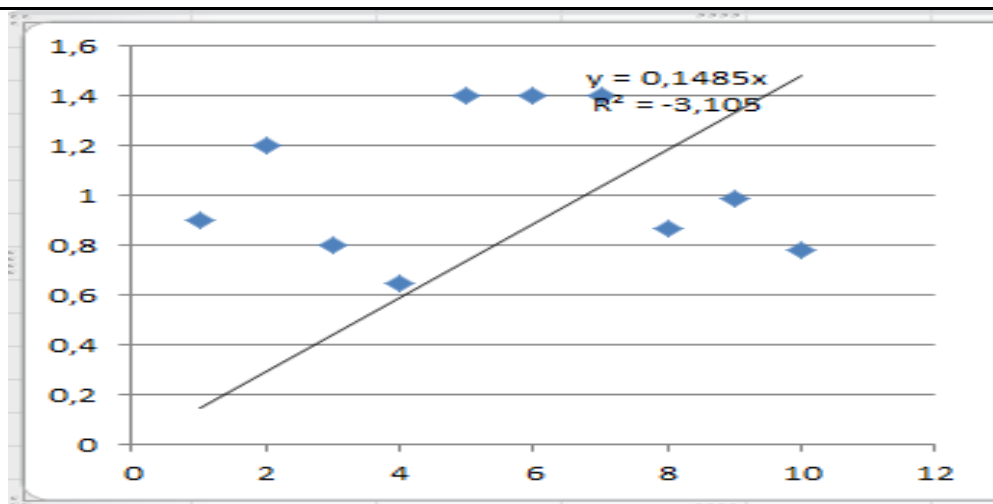


Рис. 4. Зависимость травяных пожаров от температуры окружающей среды

Можно предположить, что площадь травяных палов увеличится от температуры на 1,482 млн га, от человеческого фактора – на 0,989 млн га, от молний – на 0,0798 млн га, от ветра – на 0,1485 млн га.

Большой процент пожаров приходился на Комсомольский район, поэтому для выполнения оценки загрязнения воздуха в г. Комсомольске-на-Амуре разработана информационная модель загрязнения воздушной среды выбросами лесных пожаров (ЛП). Прежде всего учитывались вещества токсического действия, вред воздействия которых на организм подтверждён: оксид углерода; диоксид углерода; метан; азот; сера; диоксид серы; сероводород; бенз(а)пирен.

Для анализа пожаров используем статистические данные, представленные в табл. 5.

Таблица 5

Показатели причин лесных пожаров в Комсомольском районе

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Зарегистрировано возгораний	18 010	10 200	13 400	12 350	10 200	15 160	11 400	11 025	11 100	10 300	10 200
Площадь возгораний S , млн га	2,3	1,4	2,8	3,7	1,3	1,8	2,5	1,8	1,5	1,1	1,2
Причина возгорания	Процент от общего числа										
Человеческий фактор	10	20	15	19	25	14	13	10	11	16	10
Природный фактор	25	20	25	14	20	11	17	40	30	14	15
Сельскохозяйственные палы	10	10	15	25	20	23	25	20	25	19	20
Поджоги	15	20	19	15	25	23	13	19	20	20	19
Грозовые разряды	5	8	10	11	7	10	14	7	10	20	10
Пройдено огнём, млн га	2,3	1,4	2,8	3,7	1,3	1,8	2,5	1,8	1,5	1,1	1,2
Ущерб, млрд р.	2,1	3	3,4	3,8	2,6	1,1	2,7	2	2	2,1	3,8

По результатам статистических данных построены графики, где видны общая тенденция уменьшения количества пожаров в рамках 10-летнего интервала (см. рис. 5), причины пожаров (см. рис. 6) и ущерб от пожаров (см. рис. 7).

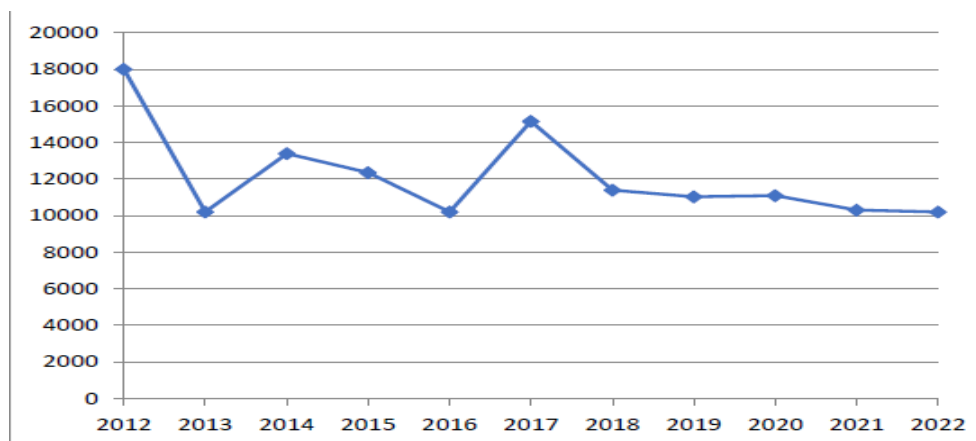


Рис. 5. Общее количество пожаров в Комсомольском районе

Процентное соотношение причин возгораний в среднем находится в интервале от 4 до 25 % от общего количества, за исключением 2019 г., когда было зафиксировано рекордное количество возгораний по причинам природного фактора.

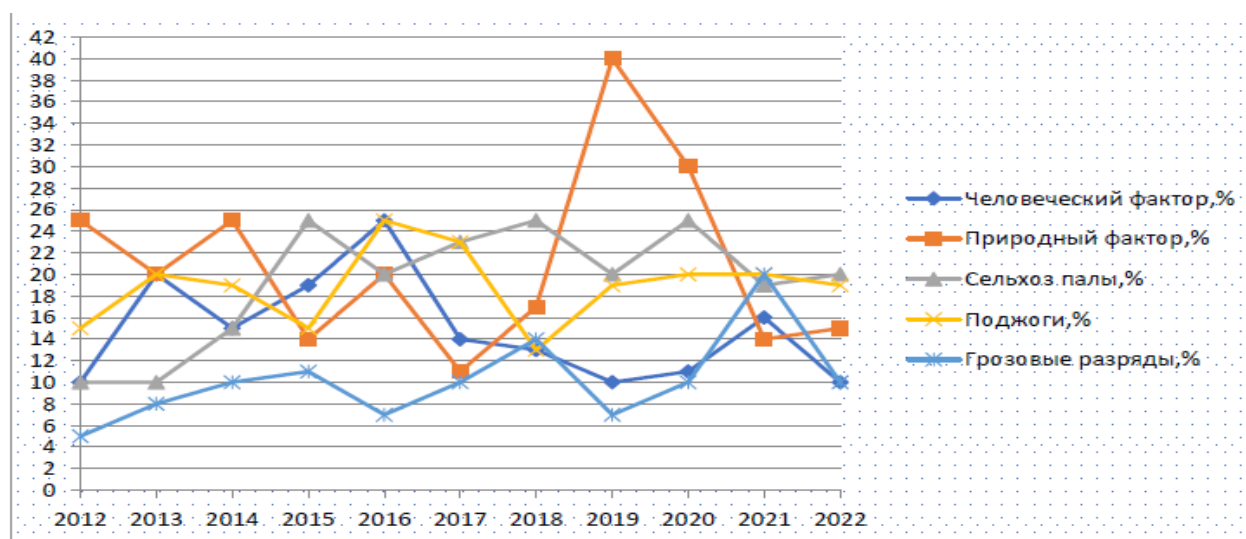


Рис. 6. Причины возгорания пожаров в Комсомольском районе

При графическом сравнении зависимостей пройденного огнём пути и нанесённого, как следствие, ущерба наблюдается прямая взаимосвязь данных событий, однако исключением является 2022 г., когда была зафиксирована относительно небольшая площадь пройденного расстояния огнём, сопровождающаяся рекордным ущербом, зафиксированным ранее только в 2015 г.

В результате исследований были установлены зависимости влияния пожаров на экологическую ситуацию с указанием первоочередных причин возникновения пожаров.

Полученные коэффициенты данной математической модели применительно к лесным пожарам позволяют определить вероятную площадь возгорания в зависимости от причин.

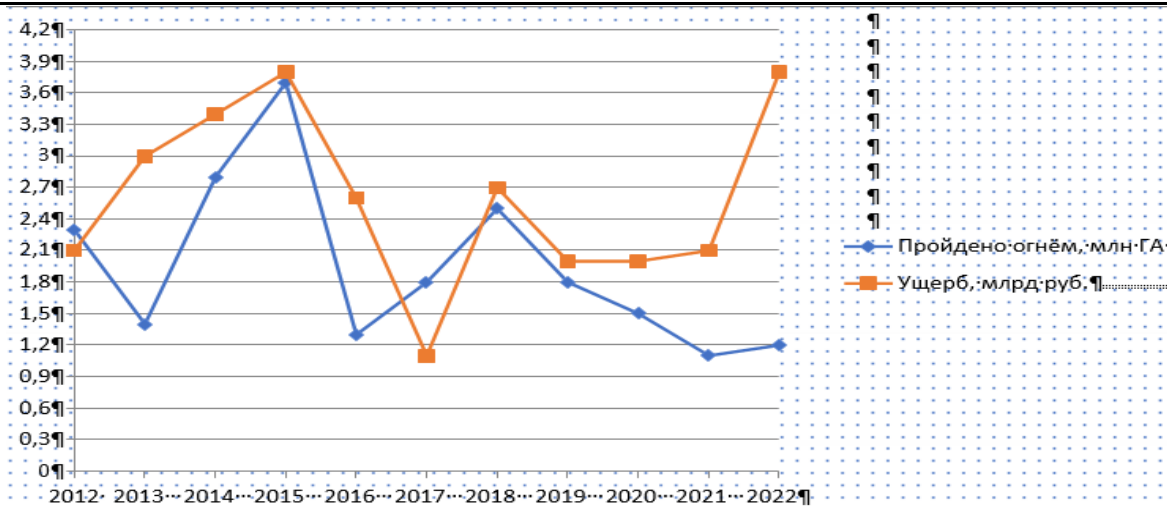


Рис. 7. Ущерб от пожаров возгорания

Моделирование является полезным инструментом предвидения и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Модель, представленная в данной работе, позволяет минимизировать вероятность возникновения пожаров и их последствий с помощью предвидения событий, значительно снизить площади возгораемой территории, уменьшая экологический ущерб и повышая экономическую эффективность затрат на тушение пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев, А. М. Роль лесных пожаров как экологического фактора / А. М. Матвеев, Т. А. Матвеева // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие», январь, 2018 г. – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2018. – С. 100-105.
2. Епринцев, С. А. Изучение очагов лесных пожаров на европейской территории России по данным дистанционного зондирования как фактора экологической безопасности / С. А. Епринцев, М. А. Дорофеева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 12-8. – С. 89-92.
3. Несговорова, Н. П. Изучение проблемы лесных пожаров как фактора экологической опасности: региональный аспект / Н. П. Несговорова, В. Г. Савельев, Г. В. Иванцова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-6. – С. 1207-1211.
4. Медведева, А. В. Лесные пожары как экологическая проблема / А. В. Медведева // Молодой учёный. – 2020. – № 18 (308). – С. 223-224.
5. Исаева, Л. К. Экология пожаров, техногенных и природных катастроф: учеб. пособие / Л. К. Исаева. – М.: Академия ГПС МВД России, 2001. – 301 с.
6. Телицын, Г. П. К оценке экологических последствий лесных пожаров / Г. П. Телицын, В. В. Острошенко // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2008. – № 21-3. – С. 130-133.
7. МЧС России, сайт. – URL: <http://www.mchs.gov.ru> (дата обращения: 27.03.2023). – Текст: электронный.
8. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статист. сб. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 114 с.
9. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Хабаровского края в 2020 году / Министерство природных ресурсов Хабаровского края, 2021. – 255 с. – URL: <https://www.dtu.net.ru/media/Государственный%20доклад%20о%20состоянии%20.pdf> (дата обращения: 27.03.2023). – Текст: электронный.

Бахматов П. В., Старцев Е. А.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ФЛЮСА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ОБРАЗЦАХ, ВЫЯВЛЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛОВ

Бахматов П. В., Старцев Е. А.

P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ФЛЮСА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ОБРАЗЦАХ, ВЫЯВЛЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛОВ

INFLUENCE OF ARC WELDING MODES UNDER A LAYER OF EXPERIMENTAL FLUX ON THE DISTRIBUTION OF INTERNAL STRESSES IN WELDED SAMPLES REVEALED BY MAGNETIC METAL MEMORY METHOD

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 Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Старцев Егор Андреевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Egor A. Startsev – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Аннотация. Рассмотрено влияние режимов автоматической дуговой сварки под слоем экспериментального флюса, полученного при переработке техногенных отходов металлургического производства (шлака электросталеплавильных печей), на деформацию и распределение остаточных напряжений в плоских тонкостенных сварных образцах низкоуглеродистой стали в условиях принудительного однократного формирования корня шва на керамических подкладках. Измерение градиента концентрации внутренних напряжений проведено методом магнитной памяти металла, визуализирующим их распределение по поверхности сварного образца.

Summary. The influence of modes of automatic arc welding under a layer of experimental flux obtained by processing of technogenic wastes of metallurgical production (slag of electric steel melting furnaces) on deformation and distribution of residual stresses in flat thin-walled welded samples of low-carbon steel under conditions of forced single-pass formation of weld root on ceramic pads is considered. Measurement of the gradient of internal stress concentration was carried out by the method of magnetic metal memory, visualizing their distribution on the surface of the welded specimen.

Ключевые слова: сварка под слоем флюса, остаточные внутренние напряжения, зоны концентрации напряжений, деформации.

Key words: welding under a flux layer, residual internal stresses, stress concentration zones, deformations.

Работа выполнена за счёт средств ФГБОУ ВО «КнАГУ» по проекту НИР № ВН001/2020 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки» (2020-2023 гг.).

УДК 621.791.753.5

Введение. Процедура дуговой сварки плавлением связана с расплавлением кромок основного и присадочного материала в процессе создания сварочной ванны, кристаллизацией ограниченного объёма металла сварочной ванны по мере продвижения дуги по стыку при формировании шва, прохождением фазовых превращений с изменением объёма металла, совместным охлаждением.



ем общего объема металла сварного шва. При этом зона термического влияния (ЗТВ) также подвергается нагреву до температур фазовых превращений и изменению структуры металла [1]. Интенсивность охлаждения металла шва и зоны термического влияния приводит к появлению закалочных структур, увеличению пластической деформации свариваемых заготовок, как продольных, так и поперечных, образованию значительных остаточных напряжений. В процессе сварки под слоем флюса за счёт его низкой теплопроводности и высокой теплоёмкости удаётся снизить скорость охлаждения металла шва и ЗТВ, провести релаксацию напряжений и снизить уровень деформации свариваемых конструкций [2; 3]. Также этому способствует использование оптимальных параметров режима сварки, комплексно обеспечивающих как стабильность геометрических параметров сварного шва, так и механические свойства сварного соединения, обусловленные однородностью структуры претерпевающего изменения металла [4–6]. Имеются сведения и о технологиях, способствующих полному исключению деформаций при сварке под флюсом [7], требующих специальные мероприятия и дополнительное оборудование.

Тем не менее для общей оценки напряжённого состояния сварных конструкций необходим способ оперативного и наглядного определения уровня внутренних остаточных напряжений. Из всех известных методов [8; 10] таким требованиям наиболее отвечает метод магнитной памяти металла (МПМ) [11].

Метод МПМ – это метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) на поверхности изделий с целью определения зон концентрации напряжений, дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений.

Собственное магнитное поле рассеяния изделия – это магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности изделия в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений или в зонах максимальной неоднородности структуры металла на новых изделиях.

Для отдельных деталей и изделий, а также для сварных соединений метод МПМ основан на регистрации собственных магнитных полей рассеяния, возникающих в зонах концентрации остаточных напряжений после их изготовления и охлаждения в магнитном поле Земли. В процессе изготовления любых ферромагнитных изделий (плавка,ковка, термическая и механическая обработка) механизм формирования реальной магнитной текстуры происходит одновременно с кристаллизацией при охлаждении, как правило, в магнитном поле Земли. В местах наибольшей концентрации дефектов кристаллической решётки (например, скоплений дислокаций) и неоднородностей структуры образуются доменные границы с выходом на поверхность изделия в виде линий смены знака нормальной составляющей СМПР. Эти линии соответствуют сечению детали с максимальным магнитным сопротивлением и характеризуют зону максимальной неоднородности структуры металла и, соответственно, зону максимальной концентрации внутренних напряжений (ЗКН) [12; 13].

Материалы и методы. Исследования проводили на восьми плоских сварных образцах из углеродистой конструкционной стали ВСт3сп размером 195×440×5 мм (см. рис. 1, а), имеющих тип сварного соединения С4 по ГОСТ 8713-79 – стыковое одностороннее однопроходное соединение без разделки кромок на плоских керамических подкладках, приклеиваемых к обратной стороне стыка через металлизированный скотч (см. рис. 1, б). Заготовки собирались без зазора; чтобы не допустить смещения кромок, приваривались технологические планки (100×40×5 мм, ВСт3сп) с проставлением двух коротких прихваток (10...15 мм).

Сварка образцов выполнялась проволокой Св-08А по ГОСТ 2246-70, диаметром 3 мм. В качестве защиты при автоматической сварке использовался разработанный сварочный флюс [14] грануляцией 1,0...4,0 мм.

Сварка производилась на автомате АДФ-1250 с источником питания ВДУ-1250 на режимах, указанных в табл. 1. Образец 8 для проведения сравнительного анализа выполнен с применением стандартного сварочного флюса АН-42.

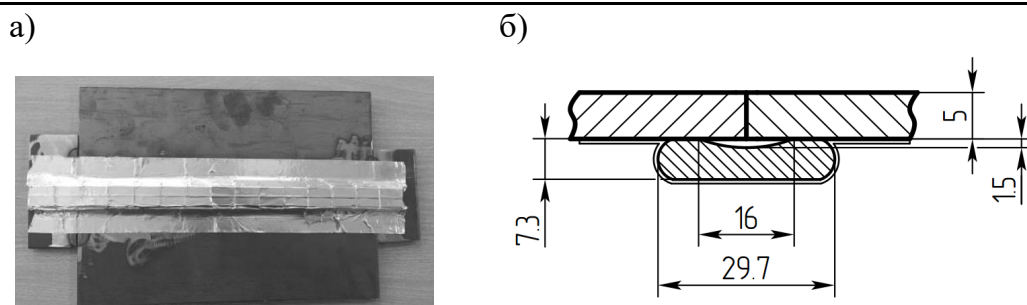


Рис. 1. Собранный под сварку образец с приклеенной керамической подкладкой:
а – общий вид собранного образца; б – профиль образца и керамической подкладки

Таблица 1

Режимы автоматической сварки под слоем флюса

Образец	Сила сварочного тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, см/мин
1	600	37	54
2	600	37	
3	500	37	
4	400	37	
5	450	37	
6	450	27	
7	500	27	
8	500	27	

Следует отметить, что при сварке образца 1 выявлено интенсивное порообразование, вызванное газообразованием по реакции раскисления при плавлении флюса и повышением давления в пространстве между поверхностями керамической подкладки и образца. Для предотвращения негативного влияния этого фактора в остальных образцах в фольгированном скотче сделаны отверстия длиной 10 мм и шагом 15 мм вдоль линии перехода от керамической подкладки к поверхности детали. Поэтому в табл. 1 образцы 1 и 2 имеют одинаковые режимы.

Задачей проведения исследований являлось установление характера воздействия полученного флюса на изменение напряжённо-деформированного состояния в объёме сваренных образцов с применением стандартных и экспериментальных флюсов.

Проведение измерений концентрации напряжений методом магнитной памяти по ГОСТ Р ИСО 24497-3-2009 «Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Контроль сварных соединений» осуществляли с помощью прибора ИКН-3М-12 (см. рис. 2, а) и сканирующего устройства № 2 2М-190, имеющего четыре феррозондовых преобразователя в двухкомпонентном их расположении – датчики ХУ (см. рис. 2, б) для измерения одновременно нормальной и тангенциальной составляющих магнитного поля. Расстояние между центрами датчиков 8 мм. Преимуществом устройства является соосное размещение датчиков с колесиком счётчика длины, позволяющее производить сканирование по криволинейным поверхностям с сохранением стабильности расстояния между датчиками и сканируемой поверхностью.

Обработку результатов сканирования производили в программе ММП-система 3.0, поставляемой совместно с ИКН-3М-12 (см. рис. 2, в), позволяющей преобразовывать результаты сканирования по отдельным линиям в единый график.

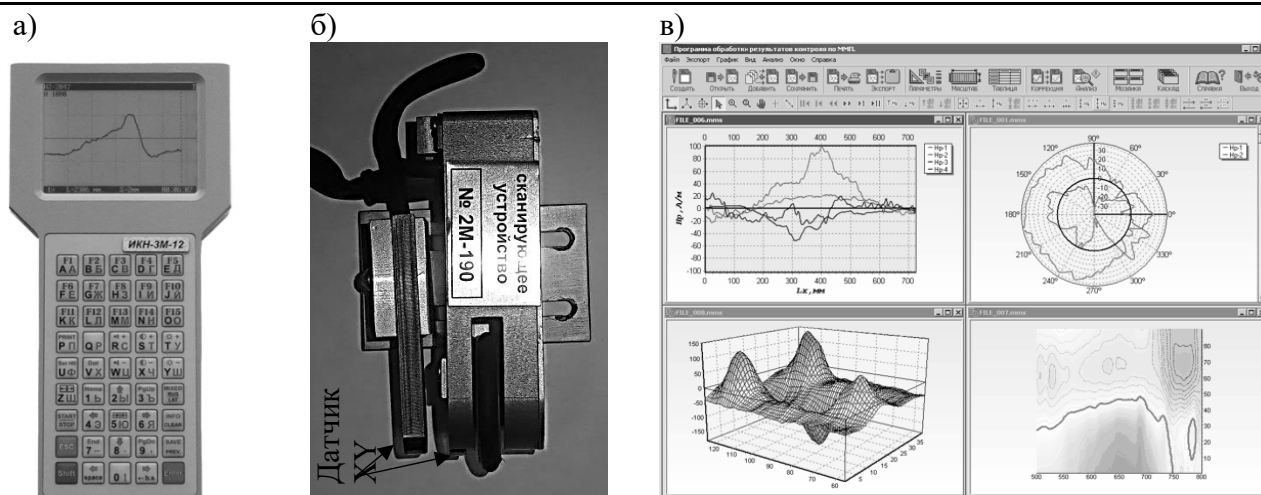


Рис. 2. Приборы и программное обеспечение для проведения, обработки и анализа результатов диагностического контроля по методу магнитной памяти металла:

а – измеритель концентрации напряжений ИКН-3М-12; б – сканирующее устройство № 2 М-190; в – интерфейс программы ММП-система 3.0

Схема сканирования сварных образцов методом МПМ приведена на рис. 3. Сканирование производили в поперечном направлении от линии шва в сторону направления сварки, при этом сварной шов располагался посередине каждой линии сканирования. Расстояние между линиями сканирования 16 мм. Шаг сканирования по оси составлял 1 мм. Отстройка от внешнего поля отключена. Количество сканирующих проходов зависело от качества сформированных валиков и составляло в среднем от 13 до 18. Для равномерного сканирования на лицевой стороне сварных образцов маркером согласно схеме (см. рис. 3) нанесены линии, которые обкатывались колесиком счётчика сканирующего устройства. Начало сканирования (место позиционирования колесика сканирующего устройства в положении «0») смещено от торца пластины на 10 мм для исключения влияния торцевых дефектов, образуемых при рубке заготовок на гильотинных ножницах. Учитывая вышесказанное, середина шва располагается в каждом образце на расстоянии 90 мм от точки «0». В среднем ширина ЗТВ слева и справа от сварного шва имеет протяжённость 20 мм. Общая длина каждой линии сканирования с учётом выпуклости шва составляет 195 мм.

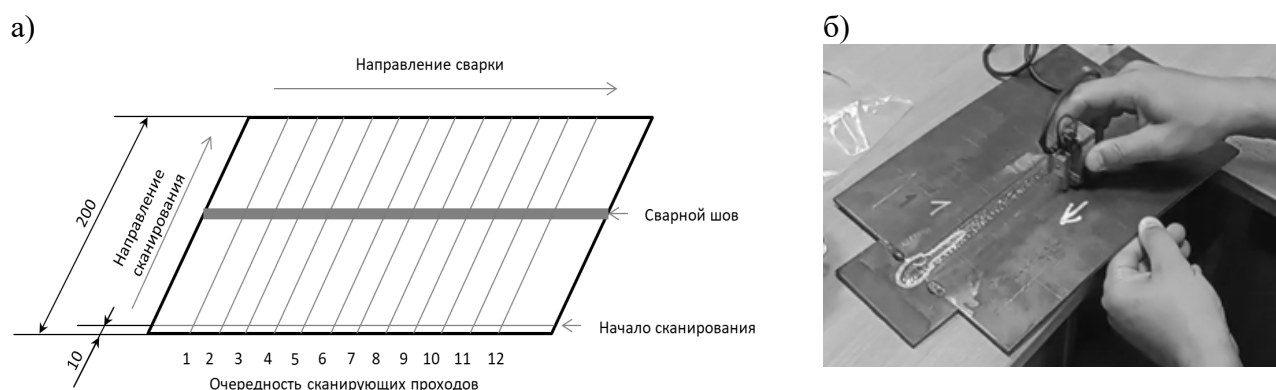


Рис. 3. Схема (а) и процесс (б) проведения сканирования сварных образцов по методу МПМ

Результаты сканирования преобразовывались в график-линию (H_r - и dH_r/dx -графики) и G-график – график абсолютной величины градиента функции $H_r(x, z)$:

$$G = |\text{grad}H_p| = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial z}\right)^2}.$$

При построении H_p - и dH_p/dx -графиков в каждом сканирующем проходе прибором ИКН-3М-12 строилось 4 кривых (2 тангенциальных (чётные номера) и 2 нормальных (нечётные номера), составляющих СМПП – H_p). Каждая кривая названа на графике «Каналом». На общем графике по каждому образцу все кривые объединяются, таким образом, количество каналов на графике соответствует четырёмкратному количеству сканирующих проходов.

В трёхмерном G-графике по оси X откладывается расстояние от начала отчета (Lx) в миллиметрах; по оси Z откладываются номера каналов, начиная с 0, по оси Y откладываются значения абсолютных величин вектора градиента функции $H_p(x,z)$.

Оценку локальных остаточных напряжений на поверхности материала сварных образцов проводили рентгеновской дифрактометрией на установке RIGAKU MSF-3M. Для измерений остаточного напряжения использовалась Cr-рентгеновская трубка, обеспечивающая ограниченное затухание $K\alpha$ -лучей и имеющая атомное число ниже на единицу.

Режим работы дифрактометра: напряжение и ток на трубке 30 kV / 10 mA, диапазон сканирования: 149, 100...163, 500°, угол наклона: 156,400°, метод измерения: Изо-наклон, ширина выборки: 0,200°. Время отсчёта: 6,00 с, метод фиксированного psi. Колебание: Нет.

Метод [сглаживания]: метод сглаживания Савицкого – Голя. Точек сглаживания: 7.

Коэффициент линейного поглощения: 850,4000 (1/см).

Метод поиска пиков: FWHM.

Наклон: 0,3598 град. Постоянное напряжение: –318,00 МПа/град. 2Т (psi=0): 156,378 град. Модуль Юнга: 223 300,00 МПа, Коэффициент Пуассона: 0,280.

Областями измерения напряжений в каждом сварном образце являлись металл шва и ЗТВ. Учитывая факт изготовления заготовок образцов из одного листа, сравнение остаточных напряжений производили в отношении основного металла, где также измерено остаточное напряжение, принятое как исходное.

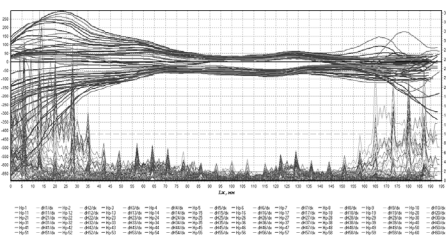
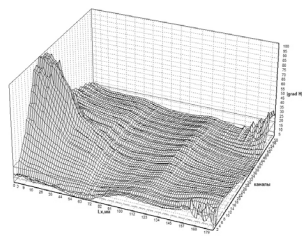
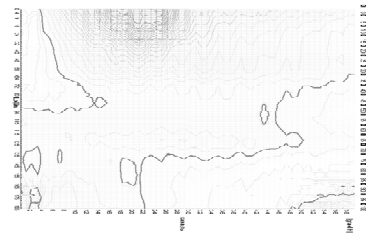
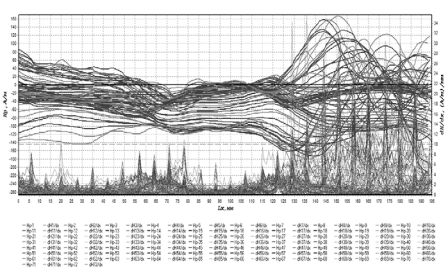
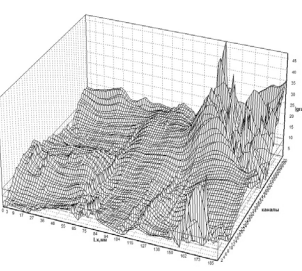
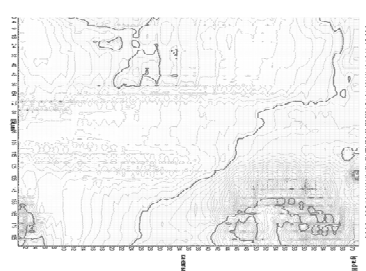
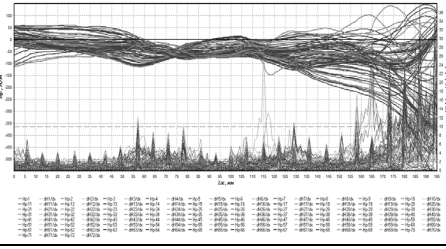
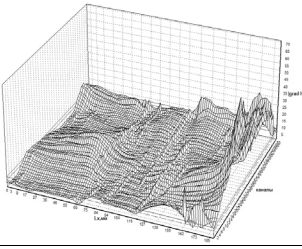
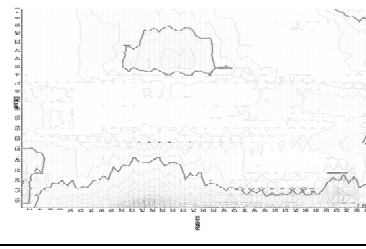
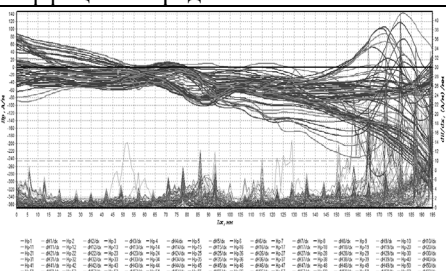
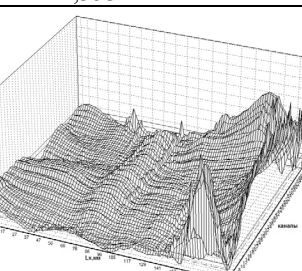
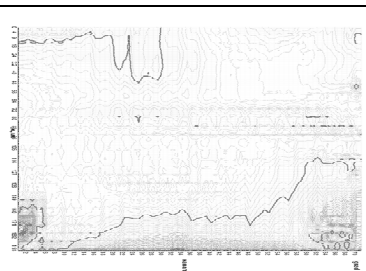
При анализе величины остаточных напряжений приняли следующее определение: продольные и поперечные напряжения определяются по направлению сварного шва, соответственно, вдоль и поперек шва.

Результаты и их обсуждение. Результаты сканирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты диагностики по ММП

Образец	График-линия (H_p - и dH_p/dx -графики)	График-поверхность $ \text{grad} H_p $	Топограммы распределения градиента напряжений по исследуемым образцам
1	2	3	4
1			
<p>Максимальное значение Градиента H_p на участке: $K(x,z)_{\max} = 40,720$. Координаты точки с максимальным значением Градиента H_p: $X = 0,0$; $Z = 380$, . Среднее значение Градиента H_p на участке: $K(x,z)_{\text{cp}} = 12,011$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 3,390$.</p>			

1	2	3	4
2			
<p>Максимальное значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\max} = 149,040$. Координаты точки с максимальным значением Градиента Нр: $X = 0,0; Z = 164,0$. Среднее значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\text{ср}} = 16,442$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 9,064$.</p>			
3			
<p>Максимальное значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\max} = 50,877$. Координаты точки с максимальным значением Градиента Нр: $X = 144,0 ; Z = 484,0$. Среднее значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\text{ср}} = 8,082$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 6,295$.</p>			
4			
<p>Максимальное значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\max} = 101,689$. Координаты точки с максимальным значением Градиента Нр: $X = 192,0; Z = 204,0$. Среднее значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\text{ср}} = 7,085$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 14,353$.</p>			
5			
<p>Максимальное значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\max} = 70,907$. Координаты точки с максимальным значением Градиента Нр: $X = 176,0; Z = 3,0$. Среднее значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\text{ср}} = 7,297$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 9,718$.</p>			

Окончание табл. 2

1	2	3	4
6			
<p>Максимальное значение Градиента H_r на участке: $K(x,z)_{\max} = 87,146$. Координаты точки с максимальным значением Градиента H_r: $X = 174,0$; $Z = 484,0$. Среднее значение Градиента H_r на участке: $K(x,z)_{\text{ср}} = 8,526$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 10,221$.</p>			
7			
<p>Максимальное значение Градиента H_r на участке : $K(x,z)_{\max} = 56,486$. Координаты точки с максимальным значением Градиента H_r : $X = 175,0$; $Z = 548,0$. Среднее значение Градиента H_r на участке : $K(x,z)_{\text{ср}} = 7,581$. Коэффициент предельного состояния металла : $m = 7,451$.</p>			
8			
<p>Максимальное значение Градиента H_r на участке : $K(x,z)_{\max} = 88,162$. Координаты точки с максимальным значением Градиента H_r : $X = 195,0$; $Z = 3,0$. Среднее значение Градиента H_r на участке : $K(x,z)_{\text{ср}} = 7,87801$. Коэффициент предельного состояния металла : $m = 11,190$.</p>			

Как видно из графиков-поверхность $|grad H_r|$ (см. табл. 2), все экспериментальные образцы имеют превышение градиента напряжений по одной из продольных граней пластин. Причиной такого явления может служить перераспределение напряжений при их релаксации с компенсацией пластической деформацией.

Образец 1 имеет наибольшее расхождение по значениям напряжённости магнитного поля нормальной и тангенциальной составляющим, при этом градиент поля не превышает критического уровня $K = 10$ (левый график). Характерным для этого образца распределением градиента напряжений (правый график) является его повышенное значение (15...20 (А/м)/мм) по всей длине шва и околошовной зоны, наличие примыкающей к ней зоны с минимальным градиентом напряжений (2 (А/м)/мм), переходящей к максимальному уровню напряжений (15...30 (А/м)/мм) по кромке исследуемого образца.

Образец 2 по всей длине шва и ЗТВ обладает равным значением градиента напряжений, причём в шве он составляет $2...3$ (А/м)/мм на ширину 60 мм. Линии напряжённости магнитного поля H_p не превышают 40 А/м (соответствуют напряжённости магнитного поля Земли).

В целом, для образца 2 характерно равномерное распределение напряжений по всему объёму образца ($2...5$ (А/м)/мм), но по правому краю пластины в начале сканирования выявлен локальный участок с повышенным градиентом напряжений до 100 (А/м)/мм.

Образец 3 также имеет низкие значения градиента напряжений равномерно вдоль линии шва и прилегающей к нему ЗТВ ($1...5$ (А/м)/мм) с повышением значения от начала к концу шва. Слева от шва наблюдается волнообразное колебание уровня градиента напряжений с впадиной в центре длины шва и выпуклостями в начале и в конце шва. Слева от шва в конце пластины зафиксирован максимум градиента напряжений вблизи кромки (47 (А/м)/мм).

Подобная картина распределения градиента напряжений наблюдается и в образце 4, за исключением максимума градиента по всей длине левой кромки, составляющего $35...70$ (А/м)/мм.

В образце 5 по длине шва имеется повышенный уровень градиента напряжений ($8...12$ (А/м)/мм), наблюдается снижение его уровня в ЗТВ до $2...3$ (А/м)/мм и волнообразное распределение по правой кромке пластины ($2...8$ (А/м)/мм), а слева – повышение градиента до $30...40$ (А/м)/мм.

Образец 6 по линии шва имеет равномерный уровень градиента напряжений, имеющий среднее значение $2...4$ (А/м)/мм с резким возрастанием этого параметра по ЗТВ (по 40 мм в сторону от шва) с превышением критического уровня ($8...15$ (А/м)/мм). Справа от шва по основному металлу градиент напряжений не высок ($0...3$ (А/м)/мм), а слева по основному металлу от начала сканирования имеется участок равномерного распределения ($2...4$ (А/м)/мм), заканчивающийся локальным участком с максимумом уровня (55 (А/м)/мм).

Для образца 7 характерно равномерное распределение градиента напряжений по всей правой стороне образца и началу левой, со средним значением $2...3$ (А/м)/мм. От середины левой стороны образца и шва до его конца наблюдается рост градиента напряжений до 40 (А/м)/мм.

Образец 8 имеет повышенное значение градиента напряжений по всей длине шва ($2...3$ (А/м)/мм). Правая пластина имеет среднее значение dH_p/dx $0...1$ (А/м)/мм с локальным участком протяжённостью 100 мм от ЗТВ в основной металл с повышением до $12...15$ (А/м)/мм. Левая пластина по кромке – до 70 (А/м)/мм. Характерно для образца 8 наличие узкой зоны ($5...8$ мм) вдоль шва (слева и справа от него) с повышенным градиентом напряжений $10...12$ (А/м)/мм. Слева такое явление наблюдается ещё трижды с интервалом 10 мм.

На графиках распределения поля H_p и интенсивности его изменения dH/dx чётко просматриваются ЗКН, проявившиеся в сварных швах экспериментальных пластин.

Таким образом, наиболее равномерный уровень градиента напряжений выявлен в образце 2.

В программе ММП-система 3.0 существует возможность построения топограмм распределения градиента напряжений (см. табл. 2), где синим цветом отмечается плоскость критического значения $K = 15$, а красным – области максимума градиента напряжений.

В программе ММП-система 3.0 возможно проведение анализа получаемых прибором ИКН графиков как в целом по каждому образцу, так и по группе образцов, причём в некоторых выбранных участках. В нашем случае этими участками являются: сварной шов (диапазон расстояния от начала сканирования $90...100$ мм) и ЗТВ справа (диапазон расстояния от начала сканирования $70...90$ мм) и слева (диапазон расстояния от начала сканирования $100...120$ мм) от сварного шва (см. рис. 4).

На рис. 4 приведён результат анализа всех 8 экспериментальных образцов по всей длине ($0...195$ мм). Установлено, что для всей группы образцов $K_{ср}$ составляет 9,122, а наибольшее значение $K(x,z)_{max}$ имеет образец 2 ($-100,887$), а следовательно, и параметр m , характеризующий предельную деформационную способность материала. При этом именно в этом образце наблюдается наименьшее расхождение значений $m(x,z)$ и $m(x)$, что подтверждает стабильность свойств металла образца.

Для зонального анализа характерно небольшое изменение $K(x,z)_{ср}$ сварного шва (7,103) (см. рис. 5) и ЗТВ справа (7,116) и слева (6,760) от сварного шва (см. рис. 6 и 7), подтверждающее равномерность градиента напряжений в этих зонах.

а)

Анализ группы файлов по "К" и "m" критериям.

Критерии отбора:

 $K(x, z) > 0,000$ $K(x) > 0,000$ $K(z) > ---$

Критерии отбраковки:

 $m(x, z) > 0,000$ $m(x) > 0,000$ $m(z) > ---$

Участок длины графиков

Начало : 0

Конец : 195

Средние величины:

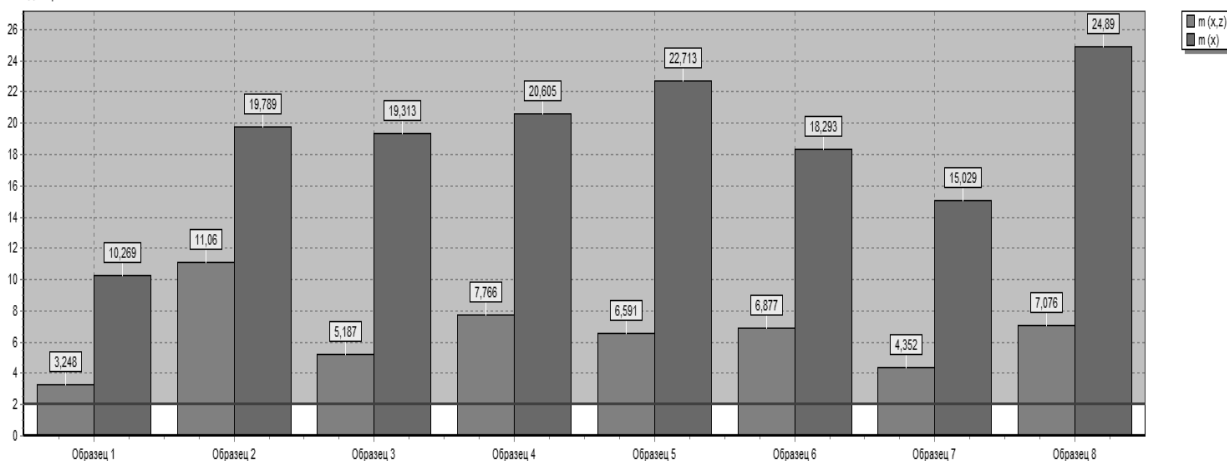
 $K(x, z) \text{ ср} = 9,122$ $K(x) \text{ ср} = 1,838$ $K(z) \text{ ср} = ---$

Имя файла	$K(x, z)_{\max}$	$m(x, z)$	$K(x)_{\max}$	$m(x)$	$K(z)_{\max}$	$m(z)$	H_{\min}	H_{\max}
Образец 1	29,629	3,248	18,875	10,269	---	---	-196,1	151,3
Образец 2	100,887	11,060	36,375	19,789	---	---	-688,0	293,5
Образец 3	47,316	5,187	35,500	19,313	---	---	-259,1	166,9
Образец 4	70,839	7,766	37,875	20,605	---	---	-545,3	146,1
Образец 5	60,124	6,591	41,750	22,713	---	---	-334,6	143,5
Образец 6	62,736	6,877	33,625	18,293	---	---	-336,0	195,1
Образец 7	39,695	4,352	27,625	15,029	---	---	-220,6	297,0
Образец 8	64,546	7,076	45,750	24,890	---	---	-294,5	336,4

Всего отобрано файлов : 8 из 8

б)

m - диаграмма



в)

K - диаграмма

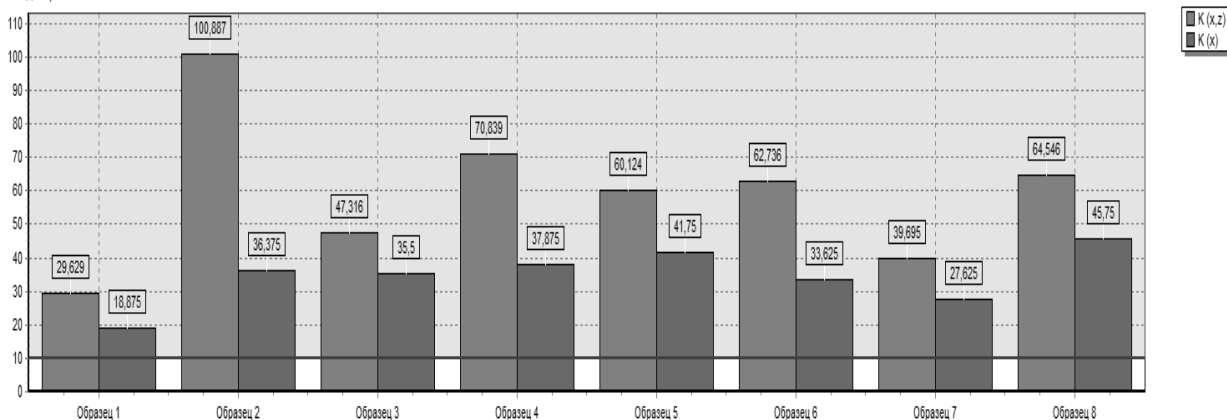
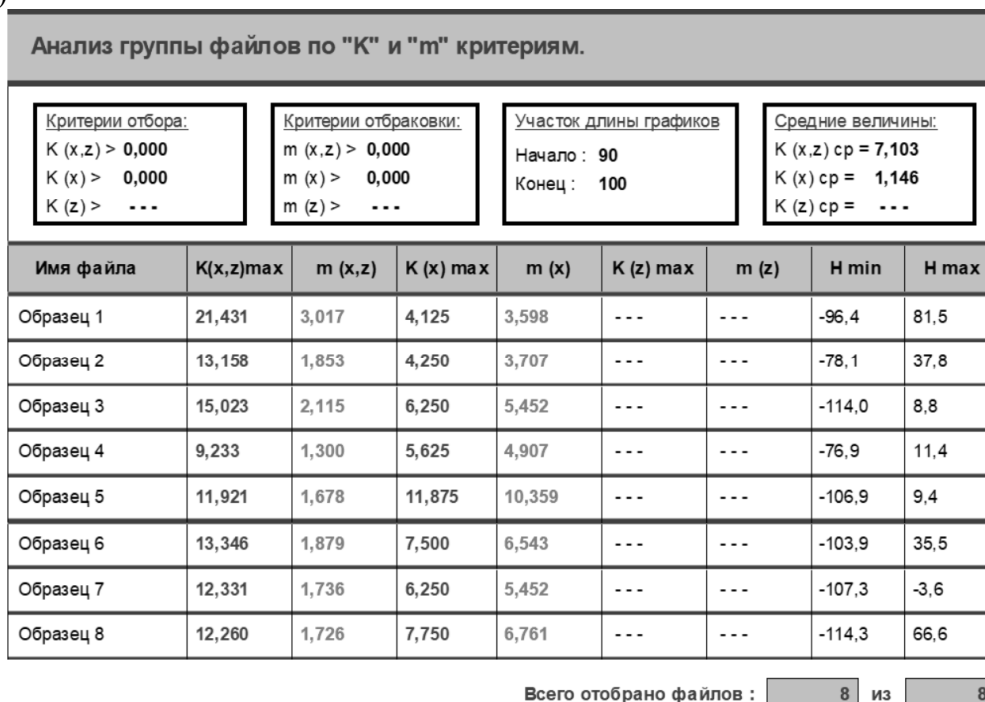
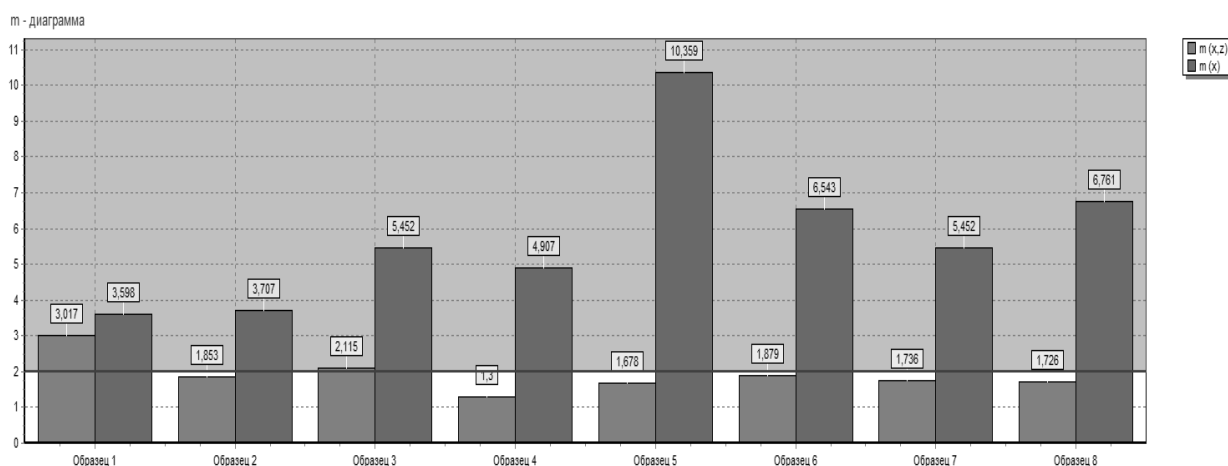


Рис. 4. Результаты общего компьютерного анализа (а); общая m-диаграмма (б) и K-диаграмма (в) по 8 экспериментальным образцам

а)



б)



в)

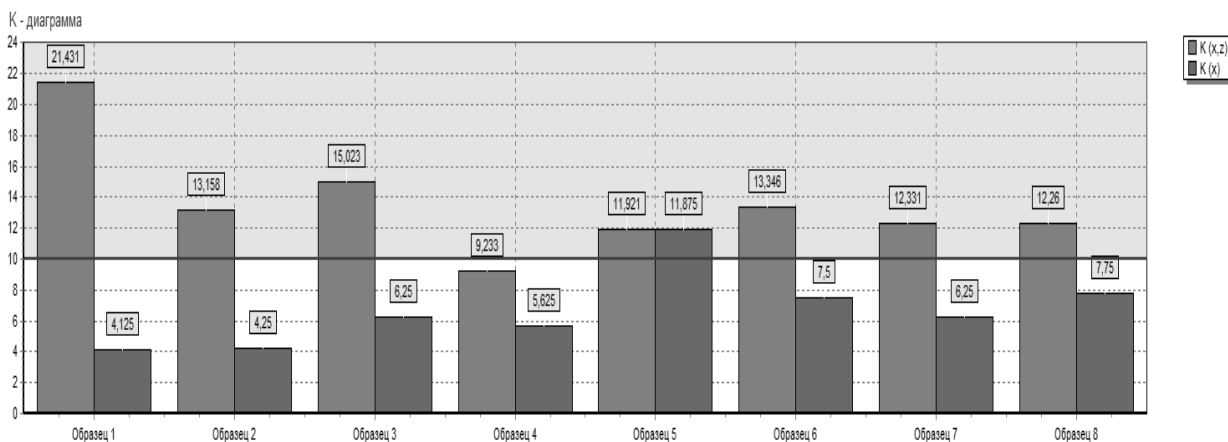


Рис. 5. Результаты общего компьютерного анализа (а); общая м-диаграмма (б) и К-диаграмма (в) в сварных швах экспериментальных образцов

а)

Анализ группы файлов по "К" и "м" критериям.

Критерии отбора:

 $K(x,z) > 0,000$ $K(x) > 0,000$ $K(z) > \dots$

Критерии отбраковки:

 $m(x,z) > 0,000$ $m(x) > 0,000$ $m(z) > \dots$

Участок длины графиков

Начало : 100

Конец : 120

Средние величины:

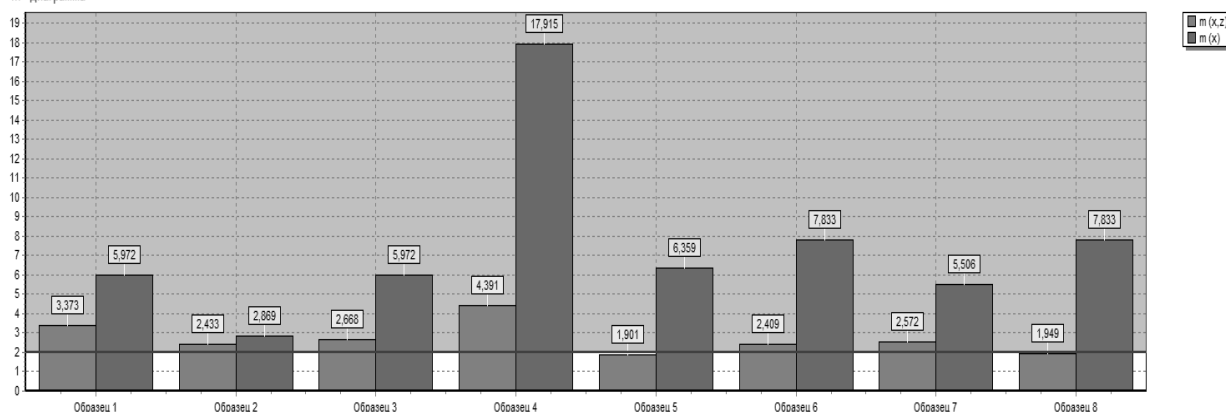
 $K(x,z) \text{ ср} = 6,760$ $K(x) \text{ ср} = 1,612$ $K(z) \text{ ср} = \dots$

Имя файла	$K(x,z)_{\max}$	$m(x,z)$	$K(x)_{\max}$	$m(x)$	$K(z)_{\max}$	$m(z)$	H min	H max
Образец 1	22,803	3,373	9,625	5,972	---	---	-91,9	106,8
Образец 2	16,445	2,433	4,625	2,869	---	---	-86,8	49,5
Образец 3	18,035	2,668	9,625	5,972	---	---	-143,1	22,5
Образец 4	29,682	4,391	28,875	17,915	---	---	-148,4	13,9
Образец 5	12,849	1,901	10,250	6,359	---	---	-144,0	10,0
Образец 6	16,283	2,409	12,625	7,833	---	---	-129,3	38,6
Образец 7	17,386	2,572	8,875	5,506	---	---	-142,6	15,0
Образец 8	13,175	1,949	12,625	7,833	---	---	-144,4	80,0

Всего отобрано файлов : 8 из 8

б)

m - диаграмма



в)

K - диаграмма

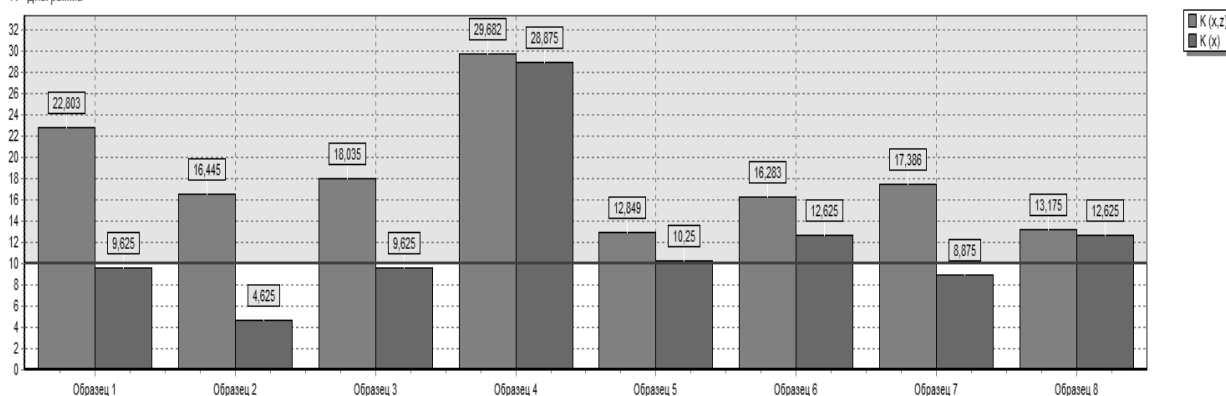


Рис. 6. Результаты общего компьютерного анализа (а); общая m-диаграмма (б) и K-диаграмма (в) по ЗТВ (справа от шва)

а)

Анализ группы файлов по "К" и "m" критериям.

Критерии отбора:

$K(x, z) > 0,000$
 $K(x) > 0,000$
 $K(z) > ---$

Критерии отбраковки:

$m(x, z) > 0,000$
 $m(x) > 0,000$
 $m(z) > ---$

Участок длины графиков

Начало : 100
Конец : 120

Средние величины:

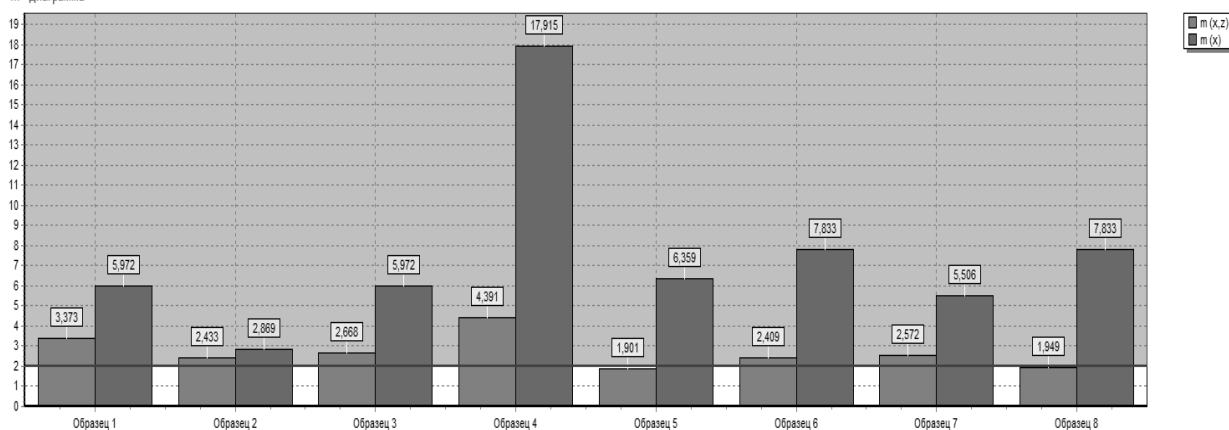
$K(x, z) \text{ ср} = 6,760$
 $K(x) \text{ ср} = 1,612$
 $K(z) \text{ ср} = ---$

Имя файла	$K(x, z)_{\max}$	$m(x, z)$	$K(x)_{\max}$	$m(x)$	$K(z)_{\max}$	$m(z)$	H_{\min}	H_{\max}
Образец 1	22,803	3,373	9,625	5,972	---	---	-91,9	106,8
Образец 2	16,445	2,433	4,625	2,869	---	---	-86,8	49,5
Образец 3	18,035	2,668	9,625	5,972	---	---	-143,1	22,5
Образец 4	29,682	4,391	28,875	17,915	---	---	-148,4	13,9
Образец 5	12,849	1,901	10,250	6,359	---	---	-144,0	10,0
Образец 6	16,283	2,409	12,625	7,833	---	---	-129,3	38,6
Образец 7	17,386	2,572	8,875	5,506	---	---	-142,6	15,0
Образец 8	13,175	1,949	12,625	7,833	---	---	-144,4	80,0

Всего отобрано файлов : 8 из 8

б)

m - диаграмма



в)

K - диаграмма

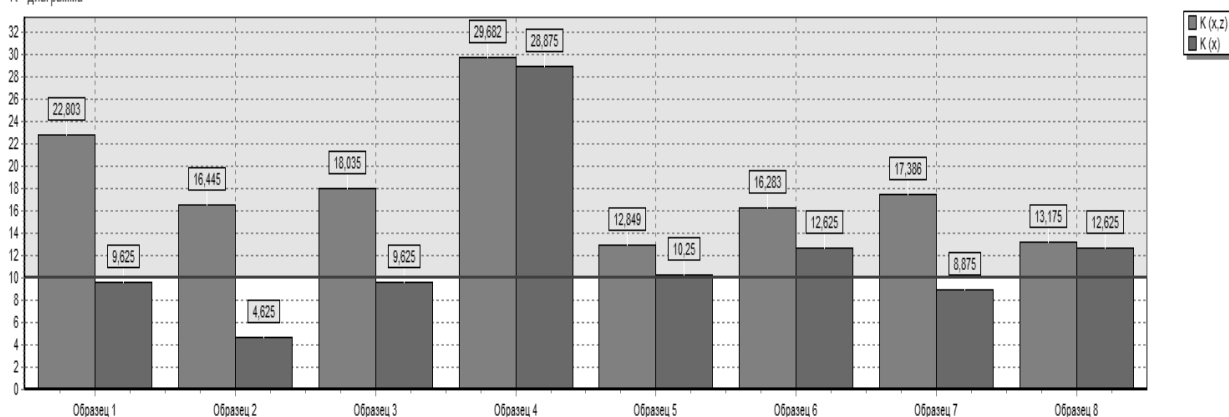


Рис. 7. Результаты общего компьютерного анализа (а); общая m-диаграмма (б) и K-диаграмма (в) по ЗТВ (слева от шва)

На рис. 8 приведены результаты измерения остаточных напряжений в локальных зонах сварного соединения – сварном шве (СШ) и ЗТВ – посредством рентгеновской дифрактографии.

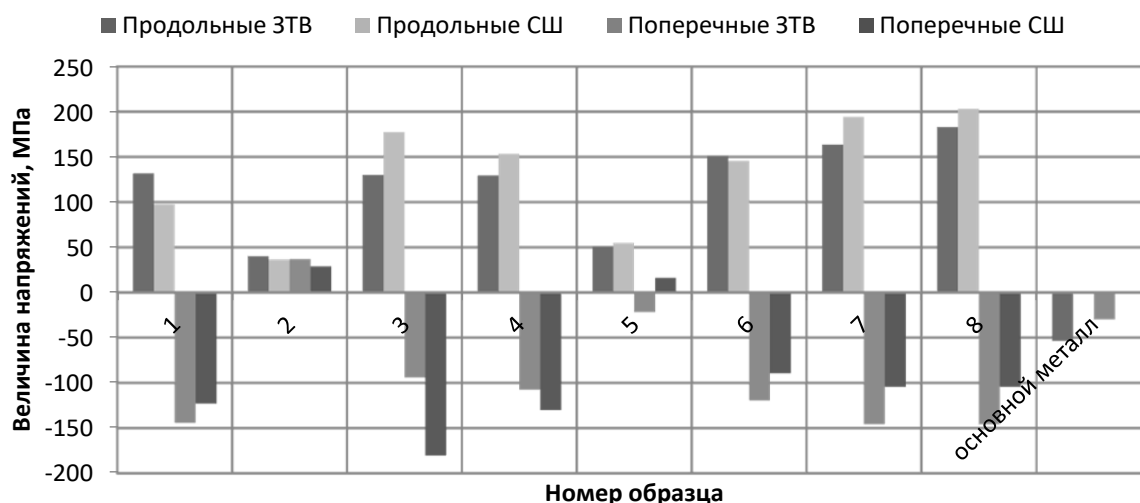


Рис. 8. Величины остаточных напряжений в зависимости от режима сварки образцов

Как видно, для основного металла остаточные напряжения в поперечном и продольном направлении являются сжимающими. Причём в поперечном направлении величина остаточных напряжений в 1,9 раз выше величины остаточных напряжений в поперечном направлении: соответственно 53,47 МПа и 29,92 МПа.

Для всех образцов, как в шве, так и в околошовной зоне, в продольном направлении напряжения являются растягивающими. В поперечном направлении, в целом, выявлены сжимающие остаточные напряжения, исключение составили образец 2 (металл шва и ЗТВ) и металл шва образца 5, где напряжения оказались растягивающими.

Второй образец имеет минимальные значения остаточных напряжений в металле шва и ЗТВ, не превышающие 40 МПа, по значению сопоставимые с основным металлом, но с противоположным знаком, т. е. растягивающие.

Пятый образец также имеет невысокие значения величины остаточных напряжений и полностью соответствующие значения основного металла в продольном и поперечном направлении.

Сравнение результатов измерения величин остаточных напряжений методом МПМ и рентгеновской дифрактографией, в конкретных областях измерений, удовлетворительно сходятся по характеру изменения.

Выводы:

1. Метод магнитной памяти металла позволяет наглядно и экспрессно оценивать распределение остаточных напряжений по всей поверхности объекта контроля без его разрушения, определять зоны концентрации напряжений.

2. Плавление экспериментального флюса в процессе сварки вызвало интенсивное газообразование, проявляющееся в образовании крупной пористости металла шва и максимальном уровне остаточных напряжений при максимальных значениях силы сварочного тока (600 А) и напряжения на дуге (37 В), а сброс давления посредством организации отверстий на тех же режимах позволил исключить пористость и достигнуть минимума значений остаточных напряжений.

3. Во всех сварных образцах максимум градиента напряжений, вне зависимости от значений параметров режима сварки, наблюдается преимущественно по продольным граням, что может быть объяснено максимумом уровня их пластической деформации при протекании фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния.

4. Установлено, что для основного металла остаточные напряжения в поперечном и продольном направлении являются сжимающими. В поперечном направлении величина остаточных



напряжений в 1,9 раз выше, чем в продольном направлении. Для всех образцов в продольном направлении напряжения являются растягивающими. Исключение составляют образец 2 и металл шва образца 5, где напряжения оказались растягивающими. Второй образец имеет минимальные значения остаточных напряжений, не превышающие 40 МПа. Пятый образец также имеет невысокие значения величины остаточных напряжений. Сравнение результатов измерения величин остаточных напряжений методом МПМ и рентгеновской дифрактографией удовлетворительно сходится по характеру изменения.

5. Выявлен наиболее рациональный режим сварки стыковых соединений листовых образцов из низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм при использовании экспериментального флюса при диаметре проволоки 3 мм: сила сварочного тока 450 А, напряжение на дуге 37 В и скорость сварки 54 см/мин. Такой режим обеспечивает хорошее формирование корневого и лицевого валиков, соответствующих размерами значениям ГОСТ 8713-70, соединения С4 и минимальный уровень остаточных напряжений, близкий к основному металлу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория сварочных процессов: учеб. пособие / В. М. Неровный, А. В. Коновалов, Б. Ф. Якушин [и др.]; под ред. В. М. Неровного. – 2-е изд. – М.: МГТУ им. Баумана, 2016. – 702 с.
2. Технология автоматической сварки под флюсом: [обзор / Н. Н. Потапов]. – М.: НИИЭнформэнерго-маш, 1980. – 27 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 767 с.
4. Сидоров, В. П. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / В. П. Сидоров // Сварка и диагностика. – 2013. – № 3. – С. 20-23.
5. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / Н. В. Коберник, Г. Г. Чернышов, П. П. Гвоздев, А. А. Линник // Сварка и диагностика. – 2011. – № 5. – С. 24-27.
6. Обоснование выбора расчётной схемы для определения параметра термических циклов многодуговой сварки под слоем флюса / Л. А. Ефименко, А. П. Деркач, О. Е. Капустин, С. П. Севостьянов // Сварка и диагностика. – 2017. – № 6. – С. 26-27.
7. Бахматов, П. В. Бездеформационная сварка под слоем флюса стыковых соединений листовой судостроительной стали марки А / П. В. Бахматов, Е. Е. Тишкова // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2 (52). – С. 47-53.
8. Технологии экспериментальных исследований: моногр. / А. С. Бубнов, С. А. Зайдес, Е. Ю. Кропоткина [и др.]; Иркутский государственный технический университет. Т. 1. – Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2011. – 255 с.
9. Сероштан, В. И. Неразрушающий контроль сварных соединений металлоконструкций грузоподъёмных машин / В. И. Сероштан, Р. А. Испирян // Известия ТулГУ. Подъёмно-транспортные машины и оборудование. – 2005. – Вып. 6. – С. 167-173.
10. Ким, В. А. Количественная оценка карбидной неоднородности быстрорежущих сталей с помощью компьютерной металлографии / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 105-111.
11. Власов, В. Т. Физические основы метода магнитной памяти металла / В. Т. Власов, А. А. Дубов. – М.: ЗАО «Тиссо», 2004. – 424 с.
12. Дубов, А. А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: учеб. пособие / А. А. Дубов, Ал. А. Дубов, С. М. Колокольников. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 395 с.
13. Дубов, А. А. Проблемы контроля качества сварки и их решение на основе метода магнитной памяти металла / А. А. Дубов, С. М. Колокольников // Технология машиностроения. – 2005. – № 4. – С. 43-47.
14. Bakhmatov, P. V. Impact and effect study of submerged-arc welding conditions on structural changes in weld metal / P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev, B. M. Sobolev // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 65-76. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0_8.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

Мельникова Е. О., Сохацкая Д. Г.
E. O. Melnikova, D. G. Sokhatskaya

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ УЛИЦ
КАК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ**

**PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT AND FORMATION OF CITY STREETS
AS MULTIFUNCTIONAL PUBLIC SPACES**

Мельникова Екатерина Олеговна – студент 4-го курса Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)179-10-92. E-mail: ktyasimagina@mail.ru.

Ekaterina O. – 4th year Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)179-10-92. E-mail: ktyasimagina@mail.ru.

Сохацкая Дарья Геннадьевна – доцент кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, Член Союза дизайнеров России (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(962)288-02-68. E-mail: amurliman-design@yandex.ru.

Darya G. Sokhatskaya – Associate Professor, Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University, Member of the Union of Designers of Russia (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)288-02-68. E-mail: amurliman-design@yandex.ru.

Аннотация. В данной статье рассмотрены принципы развития методов проектирования городских улиц на примере города Комсомольска-на-Амуре. В статье описаны принципы проектирования улиц как комфортных общественных пространств для всех групп городского населения. Рассматривается возможность представления улиц как многофункциональных общественных пространств, способных сформировать облик города и стать одним из факторов его развития.

Summary. This article discusses the principles of development of methods for designing city streets on the example of the city of Komsomolsk-on-Amur. The article describes the principles of designing streets as comfortable public spaces for all groups of the city's population. The possibility of presenting the streets as multifunctional public spaces that can shape the image of the city and become one of the factors of its development is considered.

Ключевые слова: улица, градостроительство, проектирование, общественное пространство, развитие, организация, пешеходные зоны, безопасность, комфорт.

Key words: street, urban planning, design, public space, development, organization, pedestrian zones, safety, comfort.

УДК 72.012

Одной из важных систем в комплексе градостроительства является план сети улиц и дорог города. От расположения жилых кварталов, вокзалов, предприятий, общественных центров, приемыкания загородных дорог, водоёмов и многого другого зависит, где будут проложены улицы и как будет выглядеть схема города. Организация улицы имеет особое значение для общей архитектурной планировки населённого пункта, его облика, а также может послужить развитием экономики города. При проектировании уличной сети необходимо учитывать не только распланированную работу и загруженность улицы транспортом, но и архитектурное решение прилегающих парков, площадей, набережных, зданий [1].

На сегодняшний день тенденция развития городов предполагает создание комфортных общественных пространств для лучшей жизни населения. Во всём мире в практике проектирования имеется подход к формированию среды города, называемый человеко-ориентированным, соответственно указывающий на обеспечение всех потребностей, комфортного и безопасного времяпровождения различных групп населения на территории независимо от их физических качеств, воз-

раста, благосостояния и вида передвижения, например, пешая или велопрогулка, личный или общественный транспорт, а также передвижение людей маломобильных групп [8].

Таким общественным пространством может быть городская улица, которая в современном мире является своеобразной экосистемой и сочетает множество функций для различных целей. Таким образом, можно выделить некоторые виды использования этой территории: это движение транспорта, транзитное движение пешеходов, использование территории длительное время, а также кратковременное. Выделение перечисленных видов обуславливает и предполагает наличие функциональных зон, т. е. территориально разграниченных пространств в одной среде, в которой каждый вид деятельности и активности будет комфортным, безопасным и приносить свою пользу.

В пространстве городской улицы формируются такие зоны, как проезжая часть, пешеходный тротуар, полоса безопасности, которая отделяет движение машин и людей, входные группы, велосипедные дорожки, парковки, остановочные пункты, места торговли, зоны отдыха, пешеходные переходы, озеленение и ландшафтные формы, места общественного питания. Также доказано, что развитие каждой из зон и многофункционального пространства в общем приводит к росту экономики в городе, развитию бизнеса, торговли, экологии и социальной активности населения [3].

Принципы проектирования комфортной и безопасной улицы, а также многофункционального общественного пространства на сегодняшний день существуют на этапах, на которых определяется территория в границах красных линий с обеих сторон улицы на основании необходимого пространства для нужд землепользования пешеходов, велосипедистов, озеленения, отдыха и парковочных мест. В дополнение ещё один этап, на котором определены границы проезжей части: необходимо сбалансированно распределить траекторию и интенсивность движения транспорта при попытке организовать широкий и удобный тротуар для пешеходов и велосипедистов. На основе этих принципов улица приобретает определённые свойства, развивается и становится новым местом притяжения и комфортным общественным пространством.

В качестве анализа существующей ситуации общественных пространств на городских улицах выбран город Комсомольск-на-Амуре, а также перспектива их развития на примере проспектов Первостроителей (см. рис. 1) и Ленина.

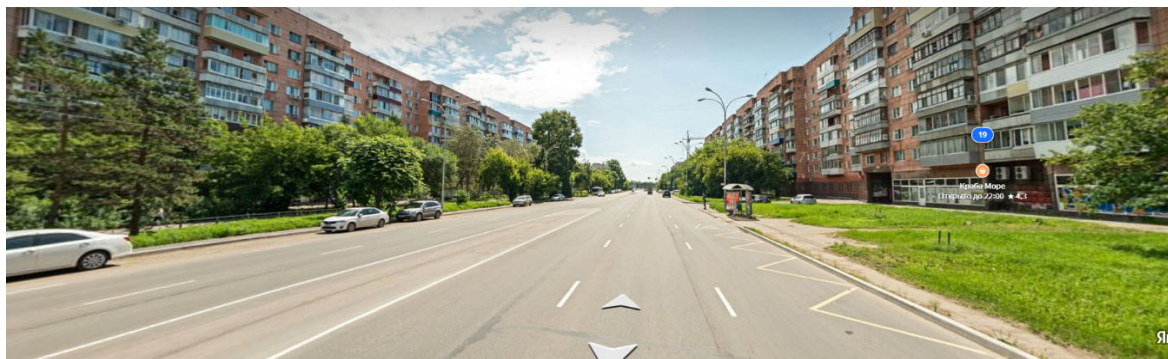


Рис. 1. Фрагмент проспекта Первостроителей

На сегодняшний день Комсомольск-на-Амуре является четвёртым по величине промышленным, культурным и научным центром Дальнего Востока и включает город-спутник Амурск и около десяти сельских и городских поселений. В городе расположилось семьсот девяносто две улицы.

В исследовании проведён градостроительный анализ ситуации существующих улиц города с учётом объектов и фокусов притяжения людей. Рассмотрим оценку использования существующих общественных пространств рассматриваемых улиц для выявления недостатков и обнаружения проблем некоторых участков улиц города.

Проспект Первостроителей является одной из главных улиц города районного значения, т. к. формирует пешеходные и транспортные связи в пределах центрального района и, соответ-

ственно, должна быть организована как многофункциональное общественное пространство; она имеет ширину 100 м и протяжённость 3,5 км [4]. Здесь расположились старые пятиэтажные дома, «сталинские», а также новые кварталы с девяти- и четырнадцатипятиэтажными зданиями. Визуально улица недостаточно благоустроена для комфортного пребывания пешеходов. Данная улица соответствует традиционному подходу к проектированию городских улиц, т. е. ориентирована на пропускную способность дорожного транспорта [2]. Основным фокусом является интенсивность движения транспортных средств, поэтому в соответствии с функциональным наполнением организованность проезжей части, пешеходных переходов и их доступности, безопасности для населения, а также остановочных пунктов является положительным моментом. Но наиболее комфортными и полными по функциональному значению являются улицы, в проектировании которых заложен фокус полной городской среды и её мобильности, – это принцип контекстуального проектирования (см. рис. 2).

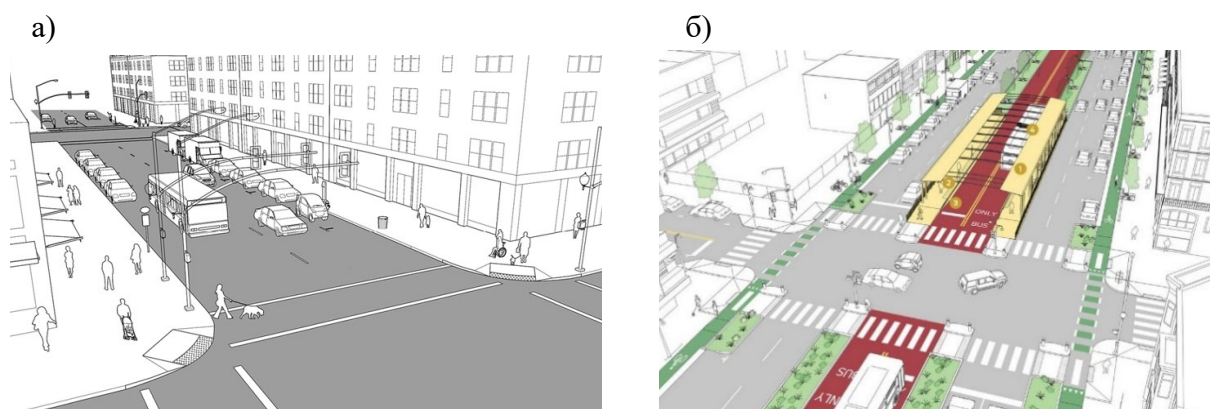


Рис. 2. Подходы к проектированию городских улиц:
а – традиционный подход; б – контекстуальный подход

Соответственно, в ходе анализа проспекта Первостроителей отмечаются такие недостатки, как отсутствие велодорожек и велопарковок, что небезопасно для движения пешеходов, не организован пешеходный тротуар, транзитный путь, места отдыха и торговли, нерациональное использованы территории зелёной зоны. Фасады и входные группы имеют большое значение для комфортного пребывания и положительного влияния на внутреннее состояние населения города, и здесь также имеется отрицательный аспект (см. рис. 3).

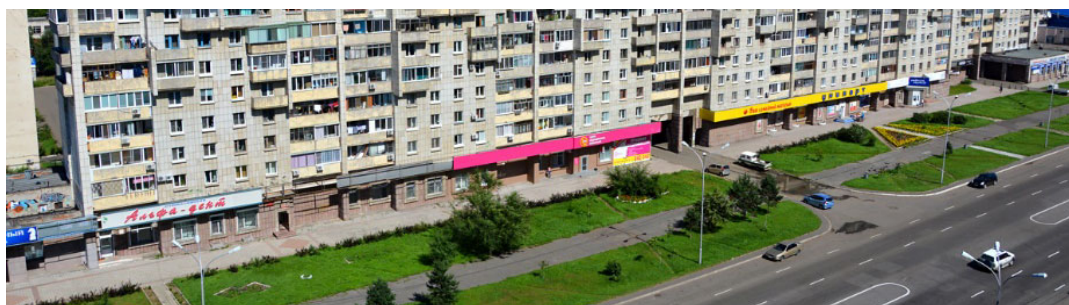


Рис. 3. Отрицательный пример входных групп на проспекте Первостроителей

Проспект Ленина в период до 1980 г. предлагалось проложить через реку Силинку по прямой линии до Ленинского района, и, соответственно, улицей общегородского значения связать два крупных района города. На сегодняшний день проспект является магистралью регионального значения. В отличие от проспекта Первостроителей, имеет меньшую ширину и в основном застройка пятиэтажная (см. рис. 4). Спроектирован традиционно и не имеет нацеленности на комфорт обще-

ственного пространства и пребывание пешеходов. Улица активна и загружена пешеходами, общественным и личным транспортом. В середине проспекта располагается площадь им. В. И. Ленина, которая должна была стать общественным центром, но таковым не является, т. к. нет точек притяжения для людей. Здание Дворца культуры «Строитель», которое является главным на площади, находится в аварийном состоянии и, соответственно, не притягивает взгляды. На площади есть скамьи, но стоят они под открытым небом без навесов, и отдыхающим приходится наблюдать за проезжающими мимо машинами или смотреть на памятник Ленину, что положительно на отдых людей не влияет.

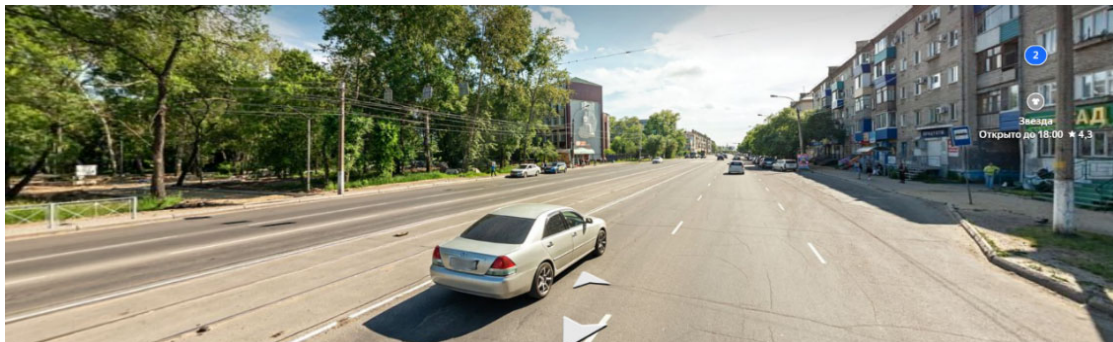


Рис. 4. Фрагмент проспекта Ленина

Главными недостатками улицы являются неорганизованность точек притяжения для людей (такowymi могли бы стать привлекательные вывески магазинов и организация временных мест отдыха и торговли), отсутствие велопарковок и велодорожек. По сравнению с проспектом Первостроителей, проспект Ленина имеет меньше озеленения, но чаще встречаются организованные ландшафтные композиции. Проспект имеет большой фокус тяготения пешеходов, но назвать улицу одним большим многофункциональным общественным пространством также нельзя, присутствует только монотонность и скучность при прогулке. Зона дорожного движения использована нерационально на данный момент, т. к. при отсутствии трамваев в городе существуют трамвайные пути на всём протяжении дороги, что могло бы использоваться как дополнительная полоса для движения автомобилей (см. рис. 5).



Рис. 5. Дорожная разметка с учётом трамвайных путей

С учётом всех недостатков на основе анализа двух городских проспектов Комсомольска-на-Амуре созданы предложения по развитию и изменению каждой улицы.

Проспект Первостроителей. Для улучшения организации пространства проспекта Первостроителей предлагаются озеленение разделительной полосы или демонтаж её в пользу велодорожки и смещение полос движения, устройство мест парковки автомобилей отдельно от проезжей части, организация велодорожек и парковок, которые необходимо отделить от проезжей части сформированным линейным озеленением, а также организация благоустройства пешеходной зоны, предложение использования временных мест пребывания в виде точек торговли на открытом воздухе и мест отдыха через малые архитектурные формы, обновление пешеходного покрытия.

Проспект Ленина. На проспекте Ленина возможно обновление фасадов и вывесок, которые визуально будут приятны для восприятия человеком и будут притягивать больше посетителей и прохожих [9]. Также необходима организация велодорожек и парковок, мест временного отдыха и притяжения людей через благоустройство пешеходного участка улицы.

Чтобы узнать больше о том, как улицы могут развиваться и быть комфортными для всех групп населения, рассмотрим примеры проектов по организации общественных пространств на городских улицах разных регионов мира. В городе Аукланд, Новая Зеландия, реализован проект реконструкции 4-й улицы (см. рис. 6). До реконструкции улица использовалась преимущественно для движения машин и парковки, а пешеходное пространство служило исключительно транзитным путём и не имело функции общественного пространства. В результате реконструкции улица приобрела вид многофункционального общественного пространства. Соответственно, город становится комфортным для жизни населения [4, 4].

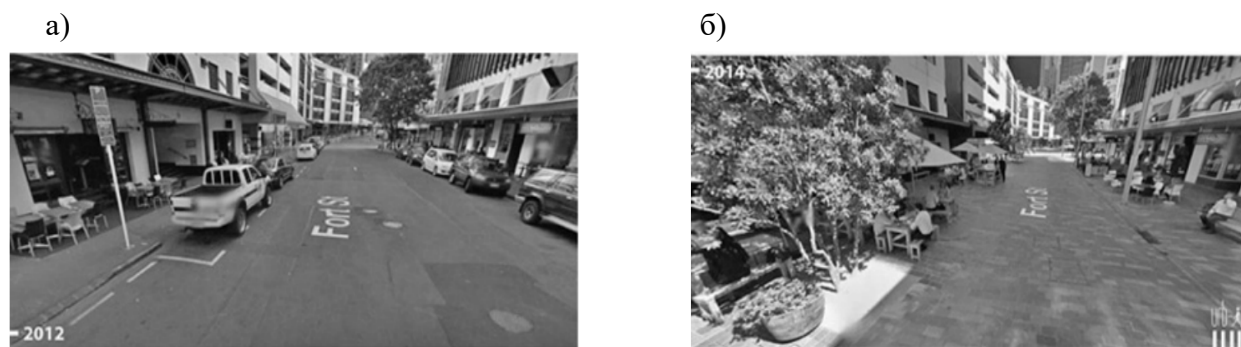


Рис. 6. Реализация проекта городской улицы в городе Аукланд, Новая Зеландия:
а – до реконструкции; б – после реконструкции

Также хорошим примером реорганизации городской улицы является проект городской площади NYC Plaza, город Нью-Йорк (см. рис. 7). Было создано рекреационное место для отдыха горожан на месте стоянки автомобилей. Проект значительно изменил среду улицы, т. к. на территории появилось комфортное пространство для общественной жизни населения [4, 3].



Рис. 7. Реализация проекта городской площади в городе Нью-Йорк:
а – до реконструкции; б – после реконструкции



В результате анализа городских улиц Комсомольска-на-Амуре выяснилось, что при проектировании предпочитались протяжённые и широкие улицы, которые не использовались в интересах жителей для создания качественной городской среды, которая позволяла бы городу развиваться в целом. В критерии оценки улично-дорожной сети входит характер движения, приоритет использования пространства, используемые функции, наличие общественной функции. Но, учитывая все недостатки, возможно развивать и формировать городскую улицу как комфортное общественное пространство, которое доступно всем группам населения и может послужить базой для формирования методик проектирования уличного пространства с целью повышения безопасности, комфортности и сбалансированности функций среды для её пользователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианов, К. А. Проектирование городской улицы / К. А. Андрианов, А. Г. Воронков, В. И. Леденев. – Тамбов: ТГТУ, 2008. – 24 с.
2. СНиП 2.07.01-89* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений = Urban development. Urban and rural planning and development: утверждён и введён в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1034/пр: дата введения 2017-07-01 / Подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 56 с.
3. Смирнова, Т. М. Тенденции развития общественных пространств городских улиц на примере города Краснодара / Т. М. Смирнова, П. В. Тряпкин, И. Д. Теплова. – М.: НИУ МГСУ, 2021. – 9 с.
4. Теплова, И. Д. «Устойчивая» улица – формирование общественных пространств на городских улицах / И. Д. Теплова, Н. В. Данилина. – М.: НИУ МГСУ, 2018. – 7 с.
5. Руководство по проектированию городских улиц и дорог / Центр. ин-т и проектный ин-т по градостроительству Госгражданстроя. – М.: Стройиздат, 1980. – 222 с.
6. Кузьмина, М. А. «Комсомольск начинался с палаток...»: путеводитель по проспектам, улицам и площадям города / М. А. Кузьмина. – Комсомольск-на-Амуре: Жук, 2007. – 166 с.
7. Объекты культурного наследия: памятники ист. и культуры Хабаровского края / сост. А. В. Дыминская, Л. Б. Шокурова, М. К. Янкевич, А. Р. Ласкин; комп. графика В. В. Коркин, Д. В. Шаппо. – Хабаровск: Рос. Медиа Альянс, 2006. – 208 с.
8. Сохацкая, Д. Г. Три вектора измерения городского пространства / Д. Г. Сохацкая // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2018. – № I-2 (33). – С. 63-65.
9. Димитриади, Е. М. Комплексный подход к формированию колористики городской среды / Е. М. Димитриади // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2020. – № I-2 (41). – С. 9-13.

Содержание

ЭНЕРГЕТИКА

Ким К. К., Иванов С. Н.

РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ОБМОТКИ..... 4

Рыжова Е. Л., Ким К. К., Иванов С. Н.

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ..... 8

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Карпенко В. А., Петров В. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ
УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ
ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ ОКНАХ В ГЛУХОДОННОМ СТАКАНЕ 15

Саяпина П. О., Крупский Р. Ф.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА 23

Носков С. И.

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО МЕТОДА
НАИМЕНЬШИХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
КОЛИЧЕСТВА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ..... 30

Григорьев Н. П., Ковалев В. А., Копай И. Г.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СИСТЕМ ТЯГОВОГО И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 36

Челухин В. А., Васильев А. В., Абрамсон Е. В., Пьей Зон Аунг

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ЭНЕРГИИ СУТОЧНОГО ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР 43

Черный С. П., Хрульков В. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО
ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
МНОГОСОСТАВНЫМ ТРАЛОВЫМ МЕХАНИЗМОМ
НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА СЛОЖЕНИЯ 53

Табаров Б. Д., Соловьев В. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕМИСТУПЕНЧАТОГО
КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
ПРИ ДИСКРЕТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ 61

Абарникова Е. Б., Кортун В. С.

ПАРАДИГМА ЦИФРОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ..... 67

Младова Т. А., Муллер Н. В., Младов А. С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ХАБАРОВСКОМ КРАЕ 76

Бахматов П. В., Старцев Е. А.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ФЛЮСА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ОБРАЗЦАХ,
ВЫЯВЛЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛОВ 83

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Мельникова Е. О., Сохацкая Д. Г.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ
ГОРОДСКИХ УЛИЦ КАК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ 97

Научное издание

Учёные записки КНАГТУ
2023 № V (69)
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор
С. Н. Иванов

Подписано в печать 27.09.2023
Дата выхода в свет 29.09.2023

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,63.
Уч.-изд. л. 17,18.
Тираж 200. Заказ 30939

Отпечатано в типографии
КНАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27.

